

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Конструкција артиљеријског оруђа

Број индекса: 506/2013

Марко Д. Симоновић

Отпорност аутофретованих цеви

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. доцент др Александар Кари, дипл. инж. – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да:

1. Проучи отпорност цеви артиљеријских оруђа и начине ојачавања цеви;
2. Опише начине аутофретовања цеви;
3. Постави математичко – механичке моделе одређивања отпорности аутофретованих цеви по различитим методама прорачуна (теоријама чврстоће);
4. За цев оруђа калибра 152 mm и одабрани попречни пресек изврши симулацију аутофретоване цеви за изабране моделе прорачуна;
5. Упореди добијене резултате, да краћи коментар добијених резултата и евентуално постави смернице за даљи рад.

Препоручена литература:

- [1] Винко Павелић, Технологија производње наоружања, ЦВТШ КоБ ЈНА, Загреб, 1988.
- [2] Зоран Ристић, Милисав Јаковљевић, Основи наоружања – артиљеријска оруђа, Војна академија, Београд, 2001.
- [3] Зоран Ристић, Збирка задатака из механике наоружања, Војна академија, Београд, 2004.
- [4] Александар Кари, Предавања из предмета „Конструкција артиљеријских оруђа“, ФИН Крагујевац 2016.
- [5] Kari, A., Dimitrić, S., Ristić, Z., Simulation of resistance autofrettage barrel using to Huber-Mises-Hencky criterion, , 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2014, Military Technical Institute, October 8 – 9 2014, Belgrade (ISBN 978-86-81123-71-3) COBISS.SR-ID 210344204

Крагујевац, јун, 2017.

Ментор:

доцент, др Александар Кари, дипл. инж.

Резиме

У овом раду одрађен је прорачун аутофретоване цеви коришћењем два критеријума: критеријум Сен – Венан и критеријум Хубер – Мисес – Хенки. Пре свега, теоријски је објашњена отпорност цеви, начини њеног ојачавања и поступак аутофретовања кроз две врсте аутофретовања: хидраулично и механичко. Постављени су математички модели поменутих критеријума, након чега је одрађен прорачун отпорности аутофретоване цеви према њима.

Добијени резултати прорачуна су представљени табеларно, након чега су упоређени, како би се видело који је од критеријума бољи за одређивање отпорности цеви.

На крају је закључено који је критеријум поузданији за одређивање отпорности цеви.

Кључне речи: аутофретовање, отпорност цеви, цеви артиљеријског оруђа.

Abstract

Calculations of autofrettage barrel using Saint – Venant and Hubert – Mises – Hencky criteria have been explained. First of all resistance of barrel, methods of its reinforcement and processes of autofrettage, hydraulic and mechanical, have been theoretically explained.

Mathematical models of the mentioned criteria have been set too and calculation of resistance of autofrettage barrel was done accordingly.

The results obtained from this calculation were tabulated then compared in order to see which criterion for determination of resistance is better to use.

Finally it has been concluded which criterion is more reliable to be used to determine resistance of the barrel.

Key words: autofrettage, resistance of barrel, barrel of artillery weapons.

САДРЖАЈ

1. Увод	1
1.1. Отпорност цеви	1
1.2. Еластична отпорност цеви.....	5
1.3. Коефицијент сигурности цеви	8
1.4. Ојачавање цеви	9
2. Аутофретовање цеви	11
2.1. Механичко аутофретовање.....	13
2.1.1. Прорачун силе за механичко аутофретовање	15
2.1.2. Грешке мера код отвора цеви добијених поступком механичког аутофретовања	16
2.2. Хидраулично аутофретовање.....	17
2.3. Математички модел одређивања отпорности цеви према теорији Сен – Венана.	20
2.4. Математички модел одређивања отпорности цеви према теорији Хубер – Мисес - Хенки	22
3. Прорачун отпорности аутофретоване цеви.....	23
3.1. Прорачун отпорности цеви према теорији Сен - Венана	23
3.1.1. Прорачун отпорности цеви за случај 30% аутофретаже.....	23
3.1.2. Прорачун отпорности цеви за случај 60% аутофретаже.....	29
3.1.3. Прорачун отпорности цеви за случај 100% аутофретаже.....	35
3.2. Прорачун отпорности аутофретоване цеви према теорији Хубер – Мисес – Хенки	37
3.2.1. Прорачун отпорности цеви за случај 30% аутофретаже.....	39
3.2.2. Прорачун отпорности за случај 60% аутофретаже.....	45
3.2.3. Прорачун отпорности цеви за случај 100% аутофретаже.....	52
3.3. Симулација у програмском пакету Матлаб	57
4. Графички и табеларни приказ добијених резултата прорачуна.....	58
4.1. Резултати прорачуна по наведеним теоријама за случај 30% аутофретаже цеви..	58
4.2. Резултати прорачуна за случај 60% аутофретаже цеви.....	62
4.3. Резултати прорачуна за случај 100% аутофретаже цеви.....	67

5. Закључак	70
Списак слика	71
Списак табела	72
ПРИЛОГ	74
Програмско решење за одређивање отпорности по теорији Хубер – Мисес – Хенки	75
Литература	78

1. Увод

Цев представља основни део сваког оруђа/оружја. У њој се врши опаљење метка, при чему се задаје правац и почетна брзина пројектилу, али и неопходна ротација, ради стабилности пројектила на путањи током лета.

Унутрашња траса цеви се састоји од:

- лежишта метка,
- прелазног конуса,
- водишта пројектила.

Пројектил ротацију добија помоћу водећег прстена, који се, приликом опаљења, урезује у жлебове цеви, а који се налазе на водишту пројектила.

Цев, у условима експлоатације, трпи изузетно високе притиске и температуре. Због тога је неопходно поради на побољшању отпорности цеви, како би она могла да обавља своју функцију са великом поузданошћу и у дужем временском периоду.

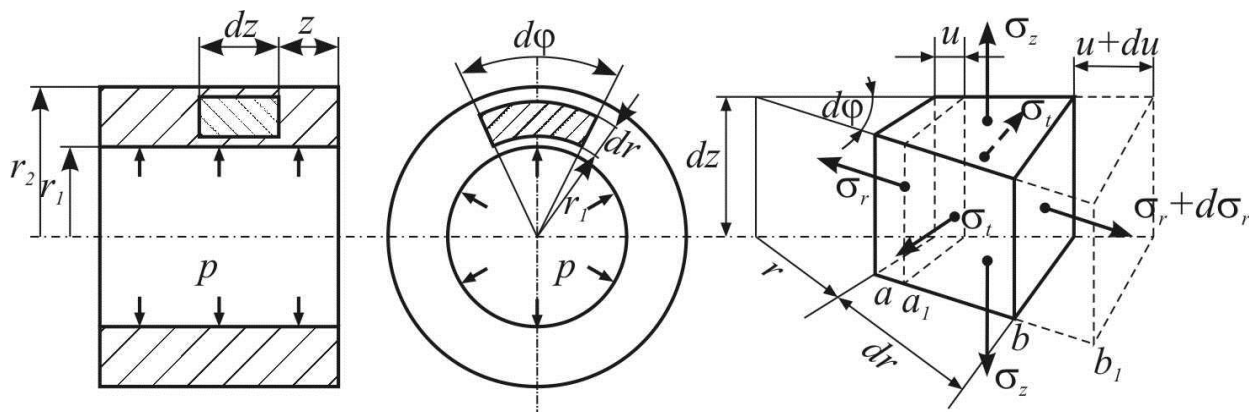
1.1. Отпорност цеви

Цев оруђа представља цилиндар, оптерећен веома високим притисцима. Отпорност цеви зависи од максималних напрезања и деформација, које су настале деловањем сила на цев. Сила притиска барутних гасова представља основну силу од које зависе деформације и напрезања.

Сам прорачун отпорности обухвата прорачун максималних напрезања и деформација у зиду цеви и упоређивање са дозвољеним вредностима тих напрезања и деформација.

Цев је, при опаљењу, изложена сложенom напрезању, које стварају сложене деформације, а које се могу раставити на: аксијалне, радијалне и тангенцијалне.

Слика 1 приказује шему напрезања и деформација цеви. [1]



Слика 1: Шема напрезања и деформација цеви [1]

Ако важи Хуков закон, израз за троосно стање напрезања је облика:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_t + \sigma_r)], \quad (1.1)$$

где су:

E – модул еластичности материјала

μ - Поасонов коефицијент, за челик износи $\mu \cong \frac{1}{3}$

σ_z – аксијално напрезање

σ_t – тангенцијално напрезање

σ_r – радијално напрезање

Ако се еластичне силе пројектују на правац z осе, следи: $d\sigma_z = 0$, односно, $\sigma_z = const$. Такође, ако се горњи израз диференцира по r и ако се изједначи са 0, добија се нови облик истог:

$$\frac{d\varepsilon_z}{dr} = -\mu \frac{d}{dr}(\sigma_r + \sigma_t) = 0 \quad (1.2)$$

Овај услов је могућ, ако је $\sigma_r + \sigma_t = const$, односно, ако је:

$$\sigma_r + \sigma_t = 2A \quad (1.3)$$

A – прва Ламеова константа

Напрезња σ_r и σ_t се могу изразити преко Ламеових константи у облику:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (1.4)$$

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2}. \quad (1.5)$$

B – друга Ламеова константа

Ламеове константе важе, не само за елементарни исечак цеви који се посматра за прорачун, већ важе и за друге слојеве цеви, односно, за целу површину попречног пресека цеви. Одређују се из почетних услова на унутрашњој и спољашњој граници цеви:

$$\sigma_{r1} = (\sigma)_{r=r_1} = -p_1 \sigma_{r2} = (\sigma)_{r=r_2} = p_2$$

Ако се усвоји да је спољни притисак на цев једнак атмосферском, онда се он може занемарити у односу на унутрашњи притисак барутних гасова, односно $p = p_1$, док је $p_2 \cong 0$. [1]

Ако је цев оптерећена само унутрашњим притиском, Ламеове константе се могу написати у облику:

$$A = \frac{p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}; B = \frac{p_1 r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (1.6)$$

Ако је цев оптерећена и спољашњим притиском, односно, $p_2 \neq 0$, Ламеове константе се могу написати у облику:

$$A = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (1.7)$$

$$B = (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

У практичном прорачуну напрезања, за одређене слојеве одређеног пресека цеви, потребно је прво добити вредности Ламеових константи, да би се, након тога, коришћењем горе наведених израза, одредиле и вредности радијалног и тангенцијалног напрезања. [1]

Ради лакшег писања израза, могуће је увести одговарајуће односе радијуса цеви и то:

$$a_{21} = \frac{r_2}{r_1}; a_{2r} = \frac{r_2}{r}; a_{1r} = \frac{r_1}{r}. \quad (1.8)$$

Ако ове односе радијуса унесемо у изразе за напрезања, ти изрази се могу написати у следећем облику:

$$\sigma_t = \frac{p_1(a_{2r}^2+1) - p_2(a_{21}^2 - a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} > 0 \quad (1.9)$$

$$\sigma_r = - \frac{p_1(a_{2r}^2-1) + p_2(a_{21}^2 - a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} < 0 \quad (1.10)$$

Из наведених израза се може видети да је $\sigma_t > 0$, а $\sigma_r < 0$, што даље казује да тангенцијално напрезање карактерише истезање, док радијално карактерише сабијање посматраног слоја цеви.

Постоје два случаја оптерећења цеви, односно, цев може бити оптерећена само спољним притиском, или само унутрашњим притиском. Ова два случаја се могу назвати специјалним случајевима оптерећења цеви. [1]

а) За $p_1 = 0$

У овом случају, оптерећење је присутно док је цев у мировању, односно, док се не врши гађање из ње, али ако је на њу, у топлотном стању навучена друга цев (навлака). Када се изврши опаљење метка, навлака јако притиска цев са спољне стране, стварајући притисак p_2 на спољашњој површини цеви. Изрази за тангенцијално и радијално напрезање се могу написати у облику:

$$\sigma_t = - p_2 \frac{(a_{21}^2 + a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} \quad (1.11)$$

$$\sigma_r = p_2 \frac{(a_{21}^2 - a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} \quad (1.12)$$

б) За $p_2 = 0$

У овом случају, оптерећење је присутно у неојачаној моноблок цеви, током опаљења. Тангенцијално и радијално напрезање се могу написати у облику:

$$\sigma_t = p_1 \frac{a_{2r}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (1.13)$$

$$\sigma_r = -p_1 \frac{a_{2r}^2 - 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (1.14)$$

Што се тиче аксијалног напрезања σ_z , оно је константно, зато што се дефинише као однос укупне уздужне силе F_z и целог попречног пресека, који ову силу преноси. [1]
Ова сила и уздужно напрезање σ_z , зависе од степена затворености цеви ξ . Овај степен је једнак јединици ако се ради о затвореној цеви или цеви са дном, односно, једнак је нули, ако се ради о отвореној цеви или цеви без дна.

$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (1.15)$$

Сила притиска на дно цеви се рачуна помоћу израза: $F_z = p_1 r_1^2 \pi$, тако да се аксијално напрезање може написати у облику:

$$\sigma_z = p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (1.16)$$

За било коју затворену цев, са коефицијентом ξ је:

$$\sigma_z = \xi p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (1.17)$$

Ако се посматрају тангенцијално и радијално напрезање на екстремним полупречницима цеви, ($r = r_1$) и ($r = r_2$), добија се:

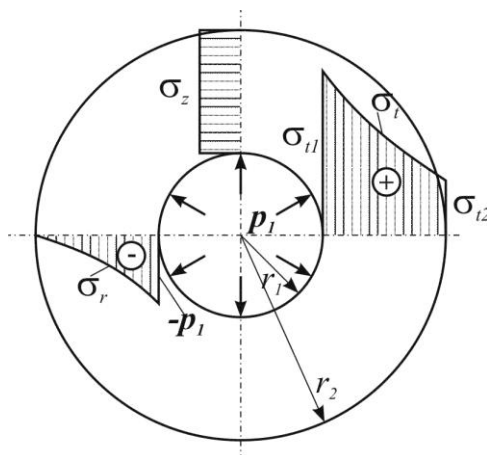
$$\sigma_{t1} = p_1 \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \sigma_{t1max} \quad (1.18)$$

$$\sigma_{t2} = p_1 \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \sigma_{t2max}$$

$$\sigma_{r1} = -p_1 = \sigma_{r1max} \quad (1.19)$$

$$\sigma_{r2} = 0 = \sigma_{r2min}$$

Слика 2 приказује дијаграм напрезања моноблок цеви, добијен резултатима прорачуна.



Слика 2: Дијаграм напрезања моноблок цеви [1]

Резултати, добијени прорачуном, дају закључак да:

- сви слојеви цеви нису равномерно оптерећени,
- најоптерећенији је унутрашњи слој цеви,
- тангенцијално напрезање је највеће,
- аксијално напрезање је најмање.

1.2. Еластична отпорност цеви

Еластична отпорност цеви представља максимални унутрашњи притисак којим се цев може оптеретити, а да, при томе, не дође до пластичних деформација.

Може се означити са p_{1gr} тако да се може рећи да еластична отпорност представља највећи гранични притисак, који цев може еластично да издржи. Експериментима је показано да дефинисање граничног стања није уопште једноставно, јер треба знати, како интензитета главних напрезања, тако и њихове међусобне односе, поготово, ако се ради о троосном стању напрезања и већем броју комбинација тих односа. Из тих разлога је потребно сложено напрезање довести до облика, који може да се пореди са одговарајућим напрезањем једноосно оптерећене епрувете.

Приликом проналажења таквог облика сложеног напрезања, од стране научника су развијене различите теорије чврстоће, односно, критеријуми чврстоће. Следе четири основна критеријума чврстоће. [1]

а) Критеријум највећих нормалних напрезања (Галилеј)

По питању овог критеријума, гранично стање напрезања, односно, пластична деформација, се јавља када, по апсолутној вредности, највеће главно напрезање достигне вредност границе пластичности материјала.

Код моноблок цеви, тангенцијално напрезање представља највеће напрезање на унутрашњем слоју цеви $\sigma_{t1} = \sigma_{t1max}$, тако да се критеријум највећих нормалних напрезања може написати у облику:

$$|\sigma_{t1}| = \sigma_e$$

$$\sigma_e = p_1 \frac{a_{21}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (1.20)$$

$$p_{1gr}^I = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2 + 1} \quad (1.21)$$

Критеријум највећих нормалних напрезања је повољан само за материјале велике кртости, где је утицај других напрезања занемарљив. [1]

б) Критеријум највећих линеарних деформација (Сен – Венан)

За овај критеријум је карактеристично да пластична деформација настаје онда када, по апсолутној вредности, највећа линеарна деформација достигне дозвољену границу еластичности материјала. У општем облику, може се написати као:

$$|\varepsilon| = \varepsilon_e$$

Граница еластичности материјала цеви p_{1gr}^{II} представља притисак изнад кога се цев не сме оптеретити, да не би дошло до трајних деформација.

$$p_{1gr}^{II} = \frac{3}{2} \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{2a_{21}^2 + 1} \quad (1.22)$$

Максимална вредност границе еластичности материјала цеви се одређује када $r_2 \rightarrow \infty$.

Повећање дебљине зида цеви, ради повећавања границе еластичности материјала, је прихватљиво тек до неких одређених вредности a_{21} , јер се не тежи ка томе да се добије несразмерно много већа маса цеви у односу на њену отпорност.

Прихватљив однос спољашњег и унутрашњег радијуса се креће у границама: $a_{21} = 2,2 \div 2,5$.

Овај критеријум има широку примену у свету при прорачуну чврстоће цеви, јер даје боље резултате од првог критеријума. [1]

в) Критеријум највећих тангенцијалних напрезања (Треска)

По овом критеријуму, пластична деформација настаје када највеће резултујуће смицајуће напрезање у зиду цеви достигне величину дозвољеног граничног напрезања.

Максимално резултујуће смицајуће напрезање на унутрашњој површини цеви се рачуна помоћу израза:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{t1} - \sigma_{r1}}{2} = \frac{\sigma_{t1} + p_1}{2} \quad (1.23)$$

Ако се ради о чистом истезању, следи да је: $\sigma = \sigma_e$, па се максимално резултујуће смицајуће напрезање рачуна помоћу израза:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_e}{2} \quad (1.24)$$

Еластична отпорност цеви, по овом критеријуму се одређује релацијом:

$$p_{1gr}^{III} = \frac{\sigma_e}{2} \left(\frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2} \right) \quad (1.25)$$

Ако је цев оптерећена и изнутра и са спољашње стране, а што представља општи случај, p_{1gr}^{III} се може написати у облику:

$$p_{1gr}^{III} = \frac{\sigma_e}{2} \left(\frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2} \right) + p_2 \quad (1.26)$$

г) Критеријум енергије промене облика (Хубер – Мисес - Хенки)

По овом критеријуму, пластична деформација се јавља када потенцијална енергија промене облика јединичне запремине материјала, у посматраној тачки, пређе граничну вредност специфичне енергије деформације, а која је утврђена за исти материјал, при једноосном затезању епрувете до границе еластичности.

Овај критеријум се може изразити у следећем облику:

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2 = 2\sigma_e^2 \quad (1.27)$$

Еластична отпорност моноблок цеви, по овом критеријуму, може се написати у облику:

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}} \quad (1.28)$$

Резултати прорачуна чврстоће по овом критеријуму се, у потпуности, слажу са резултатима добијеним експериментима, поготово, ако се ради од танкозидним цевима. За разлику од претходних критеријума, прорачун по овом критеријуму је гломазнији.

Често се користи у комбинацији са другим критеријумом у пракси, при прорачуну отпорности моноблок цеви. [1]

1.3. Коефицијент сигурности цеви

Цев, у својој широкој експлоатацији, трпи изузетно велике притиске и температуре на својој унутрашњој површини. Ту је, такође, присутно и хабање унутрашње трасе цеви, које настаје при гађању из ње. Цев мора да буде отпорна на све што утиче на њу током експлоатације. Један од главних задатака у пројектовању и производњи цеви оруђа је обезбеђивање чврстоће цеви.

При изради цеви, мора се узети у обзир нехомогеност материјала цеви и велике промене механичких особина метала под утицајем температуре. Због тога дозвољени напони морају бити мањи од границе еластичности материјала σ_e , како не би дошло до настанка пластичних деформација приликом опаљења. Може се рећи да треба обезбедити одређену резерву чврстоће цеви.

Коефицијент сигурности се може обезбедити на два начина. Један начин је да се повећа дебљина зида цеви, односно, повећа полупречник r_2 . На овај начин се повећава маса цеви. Други начин је да се повећа граница еластичности материјала цеви σ_e , али то отежава њену производњу. [1]

Коефицијент сигурности цеви се може изрази у следећем облику:

$$n = \frac{p_{1gr}}{p_b} \quad (1.29)$$

p_{1gr} – граница еластичне отпорности цеви

p_b – балистички притисак

С обзиром на то да притисак барутних гасова није исти у сваком попречном пресеку цеви, то је и дебљина зида и тзв. резерва чврстоће различита, што даље казује да сваки попречни пресек цеви има свој коефицијент сигурности.

На основу бројних експерименталних испитивања за одређене попречне пресеке цеви, при прорачуну цеви су препоручљиве следеће минималне вредности коефицијента сигурности:

- за пресек у пределу барутне коморе, $n_k = 0,8 \div 0,9$,
- за пресеке од почетка жлебова цеви, до пресека где се постиже највећи притисак барутних гасова и где се канал цеви излаже највећем загревању, услед дејства температуре при опаљењу, $n_{o\check{z}} \geq 1,2 \div 1,3$,
- за пресеке у области уста цеви, $n_u = 1,9$.

Величина коефицијента сигурности се препоручује највише за теорију највећих релативних деформација. [1]

1.4. Ојачавање цеви

. Цев се може ојачати на различите начине. У зависности од начина ојачања, постоје следеће врсте цеви:

- **Неојачана цев (моноблок)**, најједноставнија и најекономичнија за израду у односу на остале врсте цеви,
- **Ојачана цев**, односно, цев на коју се навлаче неколико цеви,
- **Слободна цев са кошуљицом**,
- **Слободна цев са омотачем**,
- **Самоојачана цев (аутофретована)**, приликом израде се подвргава одређеном унутрашњем притиску, при чему се јављају трајне деформације у унутрашњем слоју, док се еластичне деформације јављају у спољашњем слоју цеви.

Неојачана, односно, **моноблок цев** се израђује из једног комада. По питању сложености конструкције, врло је једноставна за израду. Материјал за израду ове цеви је висококвалитетни легирани челик. Отпорност цеви се може повећати одређеним методама.

Овако квалитетан материјал и могућност повећања отпорности продужују сам век цеви, тако да се из ње може испалити више хиљада метака, а да се, при томе, не наруше њене балистичке карактеристике.

Значајан недостатак овакве цеви је што се, услед истрошености водишта пројектила приликом експлоатације, мора заменити цела цев новом. Ипак, што се тиче улагања средстава за њену производњу, врло је економична.

Највише се примењује код оруђа малог и средњег калибра.

Ојачана цев се састоји од две или више цеви, које су навучене једна на другу са одговарајућим преклопом у загрејаном стању. Спољашња цев стеже унутрашњу приликом хлађења, при чему ствара у њеном зиду, тангенцијални напон стезања. Када се изврши опаљење, цев се шири услед дејства барутних гасова, па се у њеним унутрашњим слојевима јавља тангенцијални напон истезања. [1]

Као резултат алгебарског збира напона који су различити по знаку, следи да ће апсолутна вредност резултујућег напрезања ојачане цеви бити мања од напрезања које се јавља у моноблок цеви, наравно, услов је да су обе цеви изложене дејству притиска истог интензитета. Према томе, ојачана цев може издржати много већи притисак у односу на моноблок цев. Производња ојачане цеви је доста сложенија од производње моноблок цеви, што представља недостатак. Примењује се код оруђа великог калибра.

Слободна цев са кошуљицом садржи унутрашњу цев и кошуљицу навучену на њу, са одговарајућим зазором, који се креће у границама 0,05 – 0,2 mm за оруђа средњег калибра и у границама 0,15 – 0,25 mm за оруђа већег калибра. Када се изврши опаљење, унутрашња цев се шири док не постигне контакт са кошуљицом, да би се, током даљег раста притиска барутних гасова, заједно ширила са кошуљицом. Након завршетка опаљења и престанка дејства притиска барутних гасова, поново се успоставља зазор између цеви и кошуљице.

Када се цев, током експлоатације, истроши толико да мора да се замени новом, мења се само цев, док се кошуљица може и даље користити, што представља добру карактеристику.

Слободна цев са омотачем садржи цев на чији се задебљани задњи део навлачи омотач. Као и код претходне врсте цеви, код ове се такође успоставља зазор одређене ширине, који се губи приликом опаљења, јер се цев шири заједно са омотачем. С обзиром да омотач не покрива целу дужину цеви, њени зидови су дебљи од зидова цеви са кошуљицом.

Самоојачана цев (аутофретована) је израђена од једног комада. При изради, унутрашњост цеви се подвргава унутрашњем притиску тако да унутрашњи слој цеви добије трајне деформације, а спољашњи еластичне деформације. Када престане дејство притиска, спољашњи слој остаје напрегнут на истезање. Када се изврши опаљење, јављају се напрезања узрокована притиском барутних гасова и она се сумирају са напрезањима која су створена самоојачањем. На тај начин се резултујуће напрезање у самоојачаној цеви смањује, тако да је самоојачана цев доста отпорнија од неојачане моноблок цеви. [1]

2. Аутофретовање цеви

Аутофретовање цеви представља поступак ојачавања цеви којим се повећава еластична отпорност моноблок цеви, самим тим и њен животни век.

Аутофретовање заправо представља стварање преднапона у зиду цеви.

Преднапон се може створити на неколико начина:

- Помоћу хидрауличног притиска,
- Провлачењем алата (трна) кроз канал цеви са нешто већим пречником од пречника цеви,
- Гађањем из цеви са повећаним барутним пуњењем које ствара притисак већи од радног.

Најпоузданија метода за аутофретовање цеви је помоћу хидрауличног притиска.

Интензитет притиска аутофретаже треба да буде такав да се слојеви зида цеви, који су ближи унутрашњем радијусу цеви, доведу до стања у ком су присутне пластичне деформације.

Разликују се две врсте аутофретовања:

- Механичко аутофретовање,
- Хидраулично аутофретовање.

Аутофретовање има предности, али и недостатке у односу на остале поступке ојачавања цеви.

Предности аутофретовања су:

- Једноставан је начин ојачавања материјала цеви,
- Поступак је брз и јефтин,
- Поступак се врши прецизно са одређеним степеном аутофретаже с.

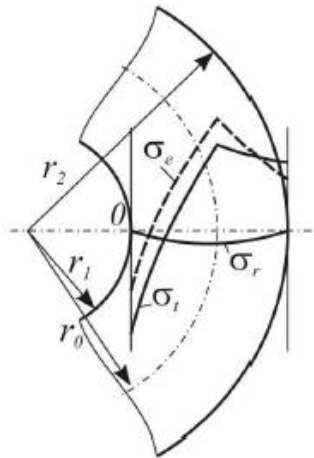
Недостаци аутофретовања су:

- Лоше утиче на ударну жилавост материјала, јер је смањује,
- Смањује и отпорност на хабање,
- Краћи животни век цеви у односу на двослојне и вишеслојне цеви. [1]

Сам поступак аутофретовања се изводи на следећи начин. Моноблок цев, која је изнутра обрађена на радијус r_1 , излаже се унутрашњем притиску, који расте од нуле.

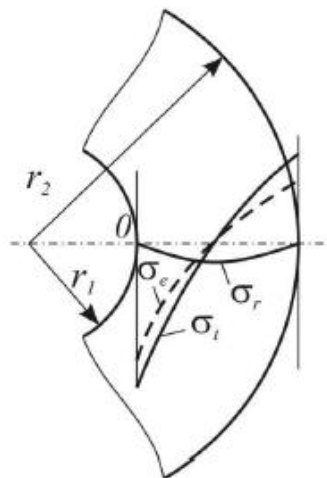
Када тај притисак пређе вредност еластичне отпорности, онда се јављају, а такође и проширују, поред еластичних и пластичне деформације и то, прво на унутрашњој површини, а затим, са даљим порастом притиска и у све вишим слојевима, све до неког граничног радијуса r_0 .

Ако се у том тренутку цео процес заустави, онда цев прелази у стање мировања, али се не враћа у претходно напрегнуто стање, већ остаје у стање са заосталим напрезањем. За овакву цев се каже да је аутофретована у полуеластичном режиму (слика 3), зато што су сви слојеви од радијуса r_0 до радијуса r_2 били напрегнути само у еластичном режиму. [2]
Полуеластични режим аутофретовања се обично користи код ојачавања релативно дебелих цеви.



Слика 3: Полуеластични режим аутофретовања [1]

Ако притисак аутофретовања повећамо и после тренутка у коме су трајне деформације почеле да расту и на радијусу r_2 , онда се сви слојеви цеви све више трајно деформишу и више не постоји зона са чисто еластичним деформацијама. Тада се каже да је цев аутофретована у тоталном режиму (слика 4). Тотални режим се користи за тање цеви и цилиндри.



Слика 4: Тотални режим аутофретовања [1]

Слојеви аутофретоване цеви се равномерно оптерећују. Овим поступком се може, чак и из јефтиних и слабијих материјала, добити цев високе еластичне отпорности.

Код цеви великих калибара се често врши комбиновано ојачавање, односно, аутофретажа и ојачавање навлакама.

2.1. Механичко аутофретовање

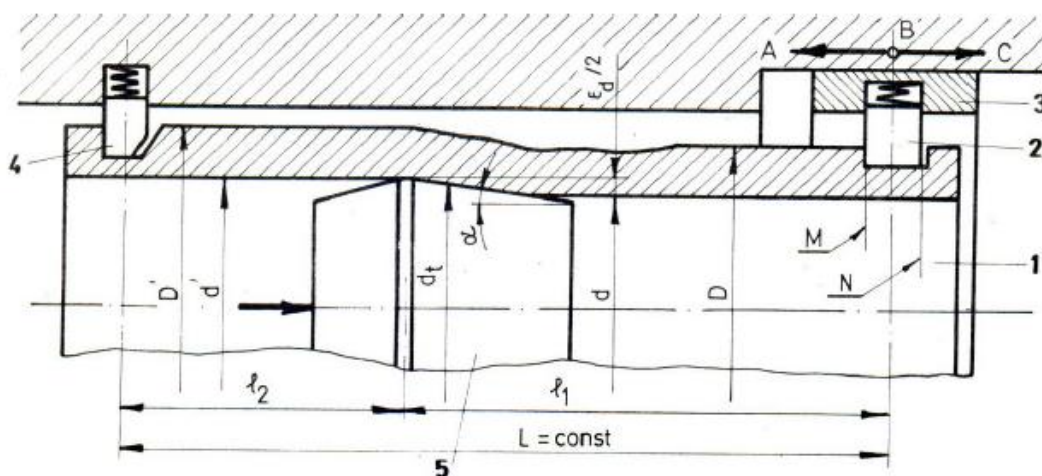
Механичко аутофретовање представља прогресиван поступак обраде цеви хладном пластичном деформацијом. Код овог поступка, алат (трн) се помера уздуж отвора цеви, деформацијом ојачава материјал, при чему се мења попречни пресек цеви, променом мера отвора и променом спољашњег пречника цеви.

Предности механичког аутофретовања у односу на хидраулично су:

- Завршна механичка обрада цеви је знатно мања него код хидрауличног аутофретовања,
- Неке специјалне мере заштите нису неопходне,
- Сам процес аутофретовања је краћи,
- Нису потребни специјални системи заптивања за високе хидрауличне притиске, који се код хидрауличног аутофретовања крећу до 1000 МПа,
- Површинском деформацијом унутрашњих слојева цеви знатно се смањује утицај површинских прскотина.

Недостатак механичког аутофретовања је појава аксијалних напона. Ти напони се могу смањити избором димензија алата (трна), одговарајућим подмазивањем и везивањем радног предмета са граничним елементима. [2]

Слика 5 приказује процес механичког аутофретовања.



Слика 5: Процес механичког аутофретовања [2]

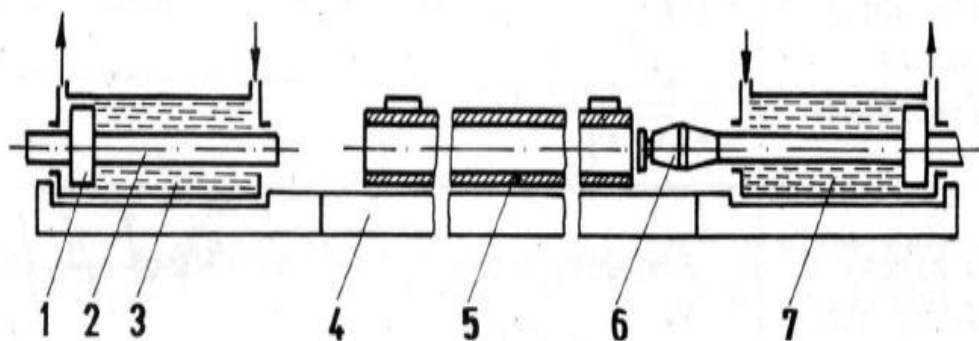
Позиције на слици представљају следеће:

- 1 – цев,
- 2 – граничник,
- 3 – уређај за подешавање граничника,
- 4 – граничник,
- 5 – алат (трн).

Механичко аутофретовање се дели, у зависности од услова деформисања спољашњих површина радног комада, на слободно и затворено. При слободном механичком аутофретовању, увек одсуствују ограничења према деформисању спољашњих сила. Најчешће се обрађују радни комади дебелих и средње дебелих зидова. Затворено механичко аутофретовање захтева да пречник спољне површине буде непроменљив. [2]

Код артиљеријских цеви се, после завршетка аутофретовања, врши обавезно завршна спољашња и унутрашња механичка обрада. Због многобројних утицајних фактора на меру отвора цеви, тешко се жељена мера добија без обимних експеримената. [2]

Слика 6 приказује машину за механичко аутофретовање.

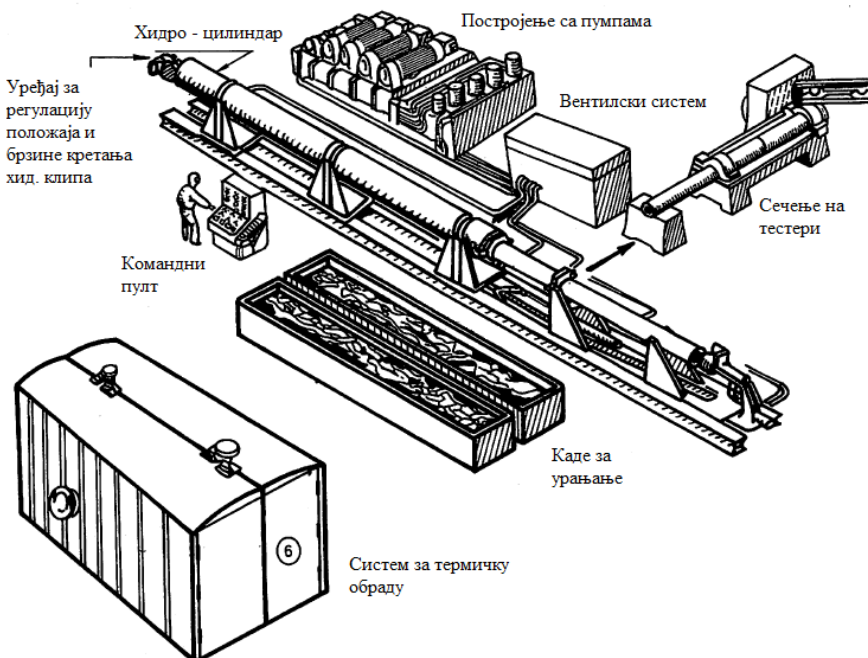


Слика 6: Машина за механичко аутофретовање [2]

Позиције, приказане на слици, представљају следеће:

- 1 и 2 – клип,
- 3 – хидро – цилиндар двостраног дејства,
- 4 – постоље,
- 5 – радни комад,
- 6 – алат (трн),
- 7 – хидро – цилиндар двостраног дејства.

На слици 7 је приказано целокупно постројење за извођење механичког аутофретовања.



Слика 7: Постојење за извођење механичког аутофретовања [2]

2.1.1. Прорачун силе за механичко аутофретовање

Потребан интензитет силе за извођење процеса механичког аутофретовања зависи од димензија полуфабриката, деформације ε , геометрије трна, физичко – механичких карактеристика материјала, трења на контактної површини отвор – трн и других фактора. [2]

Сила механичког аутофретовања се одређује као збир деформације и силе трења:

$$F = F_d + F_{tr} = F_d + F_{tr}^{(1)} + F_{tr}^{(2)} \quad (2.1)$$

F_d – сила деформације

$F_{tr}^{(1)}$ – сила трења на површини радног дела конуса, пројектована на правац кретања трна

$F_{tr}^{(2)}$ – сила трења на цилиндричном појасу трна

$$F_d = \frac{\pi}{2} d_t \varepsilon_d p_k \quad (2.2)$$

d_t – пречник трна

p_k – контактни притисак

$$F_{tr}^{(1)} = \frac{\pi}{2} \mu_M d_t p_k \frac{\varepsilon_d}{\tan \alpha} \quad (2.3)$$

μ_M – коефицијент трења, који, за велике степене деформације, има вредност $\mu_M = 0,055 - 0,086$
 α – угао нагиба предњег конуса трна, обично износи $\alpha = 4 - 7^\circ$

$$F_{tr}^{(2)} = \pi \mu_M d_t b p_k \quad (2.4)$$

b – ширина цилиндричног појаса на трну

Коначно, израз за силу која је неопходна за механичко аутофретовање је:

$$F = \pi d_t p_k \left[0,5 \varepsilon_d \frac{\mu_M}{\tan \alpha} + 1 + \mu_M b \right] \quad (2.5)$$

2.1.2. Грешке мера код отвора цеви добијених поступком механичког аутофретовања

При механичком аутофретовању може се јавити грешка мера код отвора цеви. Укупна грешка обраде дефинише се као разлика између максималног и минималног пречника отвора, добијених аутофретовањем серије полуфабриката, који имају различите геометријске и физичко – механичке карактеристике.

На величину грешке утичу одступања која се могу поделити у неколико група:

- Грешке мера профила у попречном пресеку полуфабриката,
- Грешке облика профила у попречном пресеку полуфабриката,
- Температурне деформације,
- Промена профила у уздужном пресеку. [2]

Максимални пречник канала цеви (d'_{max}) добиће се при механичком аутофретовању припремака код којих су најмање дебљине зидова и остварене деформације $\varepsilon_d = d_t - d$. Полуфабрикати немају геометријских грешака облика, а материјал припремка има минималне механичке карактеристике. [2]

Максимални пречник отвора зависи од пречника трна и величине утицаја грешака еластичне деформације трна (Δ_{te}''), од температурног ширења полуфабриката (Δ_{t1}''), температурног ширења трна (Δ_{t2}'') и од радијалних деформација полуфабриката (U_e'').

$$d'_{max} = d_t - \Delta_{te}'' + \Delta_{t1}'' - \Delta_{t2}'' - 2U_e'' \quad (2.6)$$

Минимални пречник отвора (d'_{min}) који се добије механичким аутофретовањем настаје код полуфабриката са максималном дебљином зида и при максималним деформацијама $\varepsilon_d = d_t - d$. [2]

Тврдоћа ових полуфабриката има горње граничне вредности, а на мере отвора добијеног аутофретовањем утичу и одступања облика отвора који је припремљен за аутофретовање.

$$d'_{min} = d_t - d - d_{it} - \Delta'_{te} + \Delta'_{t1} - \Delta'_{t2} - 2U'_e - \delta S_0 - \delta HB - \delta \varepsilon - \delta K\sigma - d_t - \delta \Phi \quad (2.7)$$

С обзиром на то да велики број фактора утиче на меру отвора цеви, која се добија после механичког аутофретовања, тешко се жељена мера може добити без обимнијих експеримената на конкретним материјалима.

Зато се редовно код артиљеријских цеви, после аутофретовања, врши спољашња и унутрашња механичка обрада. [2]

2.2. Хидраулично аутофретовање

Основне предности хидрауличног аутофретовања су:

- Повећање еластичне отпорности цеви, односно, нивоа притиска који цев може да издржи без трајних деформација,
- Повећање века цеви на замор кроз спречавање ширења прскотина и то, деловањем негативног тангенцијалног напона на унутрашњем слоју цеви,
- Проверава се структурна отпорност цеви, тако што се цев у току аутофретовања подвргава дејству притисака који су већи од радних. [2]

Ова врста аутофретовања се изводи на следећи начин: У цев оруђа се пре почетка самог процеса постави вретено пречника мањег од пречника цеви за вредност 2 – 4 mm. Након тога се зазор, који се створио између вретена и цеви, попуни течномљом која се подвргава притиску, већем од границе еластичности цеви. Цев се под овим притиском држи неко одређено време. [1]

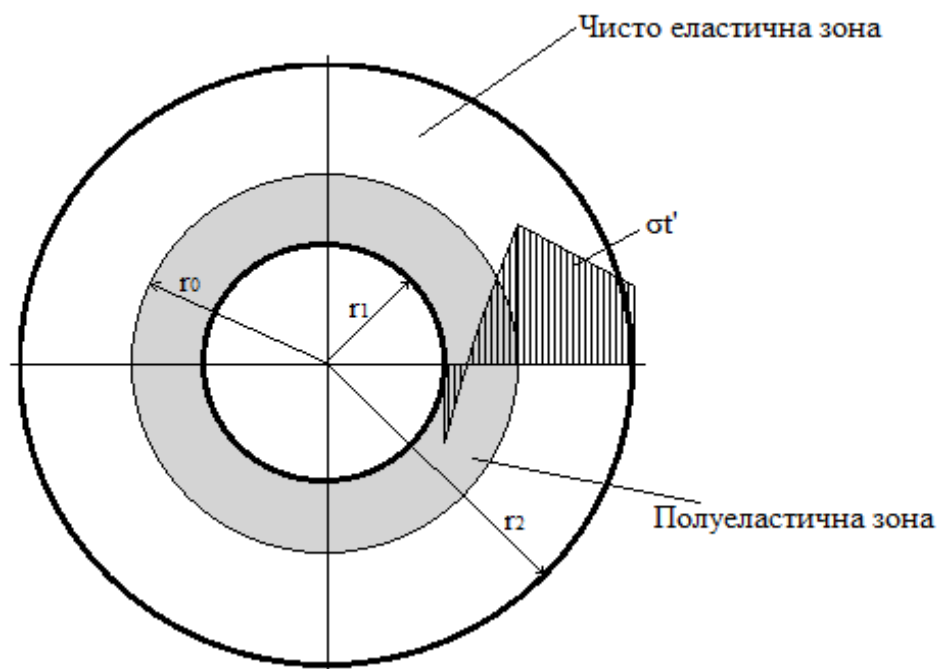
Ако се у каналу цеви створи притисак p_1 , који је већи од границе еластичности цеви p_{1gr} , онда се у зидовима цеви појављују трајне деформације. Те трајне деформације су највеће на унутрашњем слоју цеви и слојевима који су близу њега, док су на спољашњим слојевима најмање. С обзиром на то да су трајне деформације највеће на унутрашњем слоју, нормално је да се после престанка дејства притиска унутрашњи слојеви цеви не враћају у првобитно стање, већ врше притисак на спољне слојеве, тако да спољашњи слојеви цеви остају еластично деформисани. На тај начин се у зидовима цеви јављају преднапони.

Тангенцијално напрезање код самоојачања је карактеристично по томе што постепено прелази из напрезања на притисак, код унутрашњег слоја, у напрезање на истезање код спољашњег слоја цеви. [1]

До повећања отпорности цеви код самоојачања долази, не само због преднапона, већ и због ојачања метала, односно, због вештачког повећања границе еластичности. У зависности од тога колико притисак самоојачавања прелази границу еластичности цеви, метал, од којег је цев израђена, бива доведен у пластично стање.

У почетку, трајне деформације се појављују само на унутрашњем слоју цеви, а затим, у зависности од тога како расте притисак, оне се простиру и на слојеве према спољашњој површини цеви. [1]

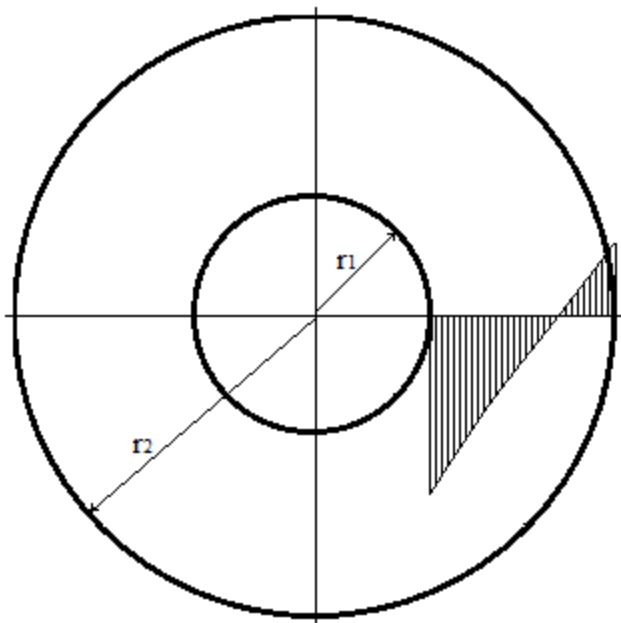
Слика 8 приказује напрезање аутофретоване цеви у полуеластичном режиму.



Слика 8: Напрезање аутофретоване цеви у полуеластичном режиму [1]

Полуеластични режим се састоји од две зоне: зона трајних(на унутрашњем слоју цеви) и зона еластичних деформација (спољашњи слој цеви).

Слика 9 представља напрезање аутофретоване цеви у тоталном режиму. Тотални режим се састоји само од једне зоне и то, зоне трајних деформација, што се може видети на слици.



Слика 9: Напрезање аутофретоване цеви у тоталном режиму [1]

Када се моноблок цев напрегне унутрашњем притиску великог интензитета, већег од радног притиска, појавиће се напон, у слоју цеви до радијуса x и то, већи од границе еластичности σ_e . Тада у слоју цеви до радијуса x настају трајне деформације, а у спољашњем слоју $(r_2 - x)$ настају еластичне деформације. [2]

На основу степена аутофретовања „ C “, одређује се полупречник x . Степен аутофретовања је дат изразом:

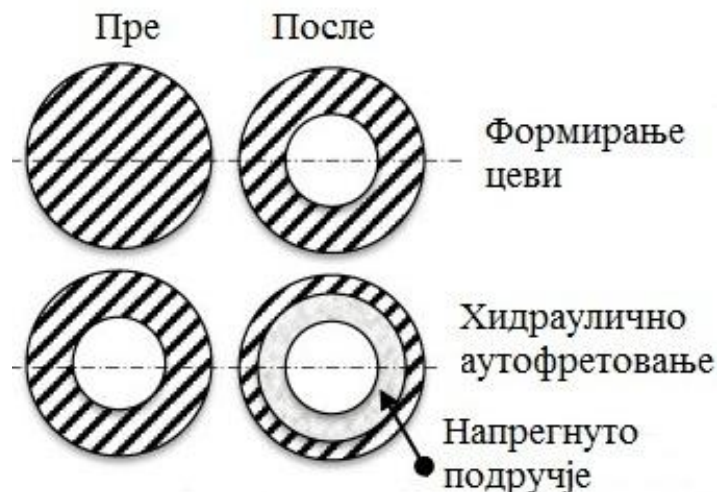
$$C = \frac{x - r_1}{r_2 - r_1} \quad (2.8)$$

Креће се у границама: $0 < C < 1$.

Ако је вредност овог степена 0.3 , 0.6 , онда је реч о 30% или 60% аутофретаже цеви. Ако степен аутофретаже износи $c = 1.0$, ради се од случају 100% аутофретаже.

Напонско стање, које се јавља у цеви, повећава границу еластичности. После растерећења цеви и поновног оптерећења притиском, у материјалу неће доћи до појаве пластичних деформација, јер су код материјала повећане границе еластичности и границе развлачења.

Испитивања су показала да се код дебелозидних цеви граница еластичности повећа за $(10 - 11)\%$, а код танкозидних за $(3 - 4)\%$. [2]



Слика 10: Приказ поступка добијања цеви из полуфабриката и њено ојачавање [4]

На слици се види да цела филозофија око цеви почиње са обичним цилиндричним полуфабрикатом. Следи процес дубоког бушења, односно, формирање цеви из полуфабриката. Када се изради цев, потребно ју је ојачати, тако да је наредни корак хидраулично аутофретовање. Види се на слици које подручје у зиду цеви је напрегнуто унутрашњим притиском. На крају следи цев спремна за употребу и дуг век експлоатације.

2.3. Математички модел одређивања отпорности цеви према теорији Сен – Венана

Одређивање притиска и тангенцијалног напрезања цеви у процесу аутофретаже се може изводити на основу теорија чврстоће, поменутих у тачки 1.2.

Теорија чврстоће, која је, у принципу, највише у примени је теорија Сен – Венана, чији је математички модел приказан у наставку. [1]

Аутофретована цев се може посматрати као цев, састављена од бесконачно великог броја елементарних слојева, који су навучени један на други, стезањем. Претпостави се да је притисак између слојева једнак еластичној отпорности сваког слоја, тако да се може написати у облику:

$$p_{2i} = \frac{3}{2} \sigma_{ei} \frac{r_{2i}^2 - r_{1i}^2}{2r_{2i}^2 + r_{1i}^2} \quad (2.9)$$

r_{1i} и r_{2i} - унутрашњи и спољашњи радијус елементарног слоја

Ако се усвоји да је $\sigma_{e1} = \sigma_{e2} = \sigma_e$, $r_1 = r_{1i}$, $r_2 = r_{2i}$ и $r_3 = r_{3i}$, може се написати израз за еластичну отпорност цеви у следећем облику:

$$p_1 = \frac{3}{2} \sigma_e \left[\frac{r_{2i}^2 - r_{1i}^2}{2r_{2i}^2 - r_{1i}^2} + \frac{3r_{2i}^2}{2r_{2i}^2 + r_{1i}^2} \cdot \frac{r_{3i}^2 - r_{2i}^2}{2r_{3i}^2 + r_{2i}^2} + \dots \right] \quad (2.10)$$

Може се усвојити и релативна дебљина слоја цеви, чији се израз пише у облику:

$$\Delta r = r_{3i} - r_{2i} = r_{2i} - r_{1i} \quad (2.11)$$

Из следећих релација:

$$\begin{aligned} r_{2i}^2 - r_{1i}^2 &= 2r\Delta r + \Delta r^2 \\ r_{3i}^2 - r_{2i}^2 &= 2\Delta r r + 3\Delta r^2 \\ 2r_{2i}^2 + r_{2i}^2 &= 3r^2 \\ 2r_{3i}^2 + r_{2i}^2 &= 3r^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ако се занемаре величине другог реда ($\Delta r^2 \ll 1$) и ако се узме у обзир релација 2.11, након сређивања, израз за еластичну отпорност цеви добија нови облик:

$$p_1 = \sigma_e \sum_1^n \frac{\Delta r}{r} \quad (2.13)$$

n – број елементарних слојева цеви

Ако се усвоји да $n \rightarrow \infty$, следи да је $\Delta r \rightarrow 0$, тако да се може написати нови облик израза за еластичну отпорност цеви:

$$p_1 = \sigma_e \int_{r_1}^r \frac{dr}{r} = \sigma_e \ln \frac{r}{r_1} \quad (2.14)$$

Овим изразом се одређује граница еластичне отпорности аутофретоване цеви у случају највећих тангенцијалних напрезања. Важи у идеалном случају и, у теоријском смислу, показује највећу границу еластичности цеви. [1]

Стварна еластична отпорност цеви после аутофретаже је заправо већа, јер се материјал цеви, у зони пластичних деформација, ојачао. [1]

Да би се створила еластична деформација у стању мировања слојева аутофретоване цеви, који су на периферији, мора да постоји пластично деформисана унутрашња зона, која садржи одговарајући интензитет заосталих деформација услед напрезања у стању мировања, који је већи од границе еластичности. Дебљина зоне пластичних деформација треба бити таква да се може обезбедити, приликом опаљења, највеће збирно еластично стање напрезања слојева цеви који се налазе изнад зоне пластичних деформација. [1]

Може се рећи да за време опаљења, на граници између пластичне и еластичне зоне делује притисак:

$$p_2 = \sigma_e \ln \frac{r_2}{r_0} \quad (2.15)$$

Дејством овог притиска долази до сабијања зоне пластичних деформација, а до истезања зоне еластичних деформација. [1]

Укупна еластична отпорност цеви је:

$$p_1 = \frac{3}{2} \sigma_e \left(\frac{r_0^2 - r_1^2}{2r_0^2 + r_1^2} + \frac{2r_0^2}{2r_0^2 + r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_0} \right) \quad (2.16)$$

2.4. Математички модел одређивања отпорности цеви према теорији Хубер – Мисес – Хенки (МХМ)

Ако важи Хуков закон, специфична енергија деформације се може узети као збир специфичних енергија промене запремине тела и специфичне енергије промена облика тела. [1]

У тачки 1.2 израз 1.27 представља израз за теорију чврстоће по овом критеријуму.

Из тог израза се може добити једноставнији облик израза за еластичну отпорност моноблок цеви, ако се уведу следећи услови: $\sigma_z = 0$; $\sigma_r = -p_1$.

На унутрашњој површини цеви, еластична отпорност се може написати у облику:

$$\sigma_{t1}^2 - 2\sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{t1}^2 = 2\sigma_e^2 \quad (2.18)$$

Овај израз се може написати једноставније, у облику:

$$\sigma_{t1}^2 - \sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 = \sigma_e^2 \quad (2.19)$$

Ако се у овај израз замене изрази 1.18 и 1.19, после целокупног сређивања се добија израз за еластичну отпорност моноблок цеви по овом критеријуму:

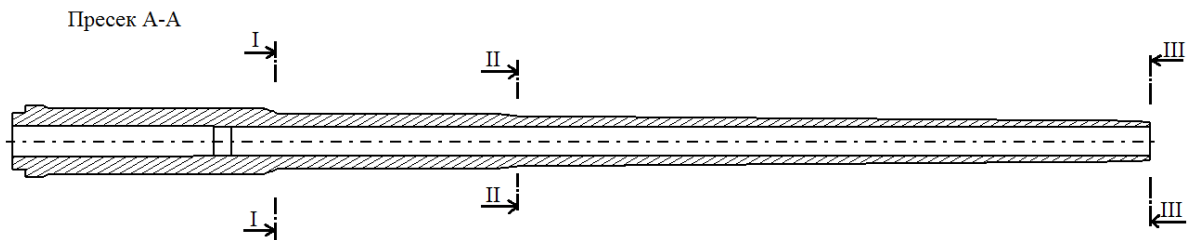
$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}}$$

Израз за еластичну отпорност моноблок цеви је такође приказан у тачки 1.2, под ознаком 1.28. Израз за однос спољашњег и унутрашњег радијуса је приказан у тачки 1.1 под ознаком 1.8. [1]

3. Прорачун отпорности аутофретоване цеви

3.1. Прорачун отпорности цеви према теорији Сен - Венана

Прорачун отпорности аутофретоване цеви према овом критеријуму извршен је за цев калибра 152 mm, при чему су дати одређени полазни подаци. Слика 11 приказује уздужни пресек цеви, на коме су приказана три карактеристична попречна пресека цеви, за које се врши прорачун отпорности, али је овде извршен прорачун само за први попречни пресек.



Слика 11: Уздужни пресек цеви са три карактеристична попречна пресека у којима се одређује отпорност аутофретоване цеви

Прорачун отпорности је извршен за три случаја аутофретаже: 30%, 60% и 100% аутофретаже цеви.

3.1.1. Прорачун отпорности цеви за случај 30% аутофретаже

Полазни подаци су:

Унутрашњи радијус цеви: $r_1 = 76,2 \text{ mm}$

Радијус до ког се врши аутофретавање цеви: $r_0 = 98,34 \text{ mm}$

Спољашњи радијус цеви: $r_2 = 150 \text{ mm}$

Граница еластичности: $\sigma_e = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$,

Модул еластичности: (Youngov) $E = 22 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$,

Коефицијент: $b = 6 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Притисак аутофретаже:

$$p_1 = \frac{\sigma_e}{2} \left[\left(1 - \frac{x^2}{\theta^2} \right) + \frac{\ln x^2 - \alpha(x^2 - 1)}{1 + \alpha} \right] \quad (3.1)$$

$$x = \frac{r_0}{r_1} ; \theta = \frac{r_2}{r_1} \quad (3.2)$$

x – релативна дебљина аутофретованог слоја цеви

θ – релативна дебљина зида цеви

α – коефицијент заосталих деформација

Притисак аутофретаже износи : $p_1 = 432 \frac{N}{mm^2}$

С обзиром на то да се анализа врши за више слојева цеви, од радијуса r_1 до радијуса r_2 , потребно је имати у виду промену притиска кроз све одабране радијусе цеви. Притисак се, у зони, где је присутна пластична деформација, одређује изразом:

$$p = \frac{\sigma_e}{2} \left[x^2 \left(\frac{1}{\xi^2} - \frac{1}{\theta^2} \right) + \frac{\ln \frac{x^2}{\xi^2} - \frac{x^2}{\xi^2} + 1}{1 + \alpha} \right] \quad (3.3)$$

$$\xi = \frac{r}{r_1} \quad (3.4)$$

r – радијус у ком се врши одређивање притиска, на пример:

$$\xi = \frac{78.414}{76.2}$$

Табела 1 приказује вредности промене притиска у зони пластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]
76.2	432
78.414	410.3
80.628	387.7
82.842	365.7
85.056	344.4
87.27	323.7
89.484	303.5
91.698	283.8
93.912	264.7
96.126	246.01
98.34	227.8

Табела 1: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација

Притисак у зони, где су присутне еластичне деформације, се одређује изразом:

$$p = \frac{\sigma_e}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_z^2} \right) \quad (3.5)$$

Вредности промене притиска у овој зони су приказане у табели 2.

r [mm]	p [N/mm ²]
108.67	190.1
113.84	169.6
119	148.2
124.17	125.9
129.34	102.6
134.5	78.4
139.67	53.2
144.83	27.1
150	0

Табела 2: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација

Промена тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација, се одређује изразом:

$$(\sigma_t + p) = \frac{\sigma_e}{1+\alpha} \left(1 + \alpha \frac{x^2}{\xi^2} \right) \quad (3.6)$$

Међутим, овим изразом се не добија вредност тангенцијалног напрезања. По добијању решења из наведеног израза, потребно је ту вредност одузети, већ одређеним притиском, да би се коначно одредила вредност тангенцијалног напрезања.

На тај начин се одређује промена тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација.

Табела 3 садржи вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација.

r [mm]	σ_t [N/mm]	$p+\sigma_t$ [N/mm ²]
76.2	383.6	815.6
78.414	403.1	813.4
80.628	423.7	811.4
82.842	443.9	809.6
85.056	463.5	807.9
87.27	482.6	806.3
89.484	501.4	804.9
91.698	519.7	803.5
93.912	537.5	802.2
96.126	555.1	801.1
98.34	572.2	800.0

Табела 3: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација

У зони еластичних деформација, тангенцијално напрезање се одређује помоћу Ламеових константи, чији су изрази за одређивање приказани у тачки 2.

Табела 4 приказује вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	$p+\sigma_t$ [N/mm ²]
108.67	498.9	689.0
113.84	469.9	639.5
119	444.6	592.8
124.17	422.3	548.2
129.34	402.7	505.3
134.5	385.3	463.7
139.67	369.8	423.0
144.83	355.9	383.0
150	343.4	343.4

Табела 4: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација

Досадашња анализа промене притиска и тангенцијалног напрезања је карактеристична за период док делује аутофретажни притисак.

Потребно је анализирати промену притиска и тангенцијалног напрезања за период када престане дејство аутофретажног притиска, односно, када се цев налази у миру.

Притисак и тангенцијално напрезање се одређују изразима:

$$\begin{aligned} p' &= p - p'' \\ \sigma_t' &= \sigma_t - \sigma_t'' \end{aligned} \quad (3.7)$$

Величине p'' и σ_t'' представљају притисак и тангенцијално напрезање који настају у идеално еластичној цеви због дејства унутрашњег притиска.

Вредности p и σ_t представљају притисак и тангенцијално напрезање у зони пластичних деформација.

Притисак у идеално еластичној цеви, у свим слојевима цеви, се одређује коришћењем Ламеових константи, помоћу израза:

$$p'' = \left| A_1 - \frac{B_1}{r^2} \right| \quad (3.8)$$

Овим изразом се добија негативна вредност притиска, тако да се узима њена апсолутна вредност за даље одређивање тангенцијалног напрезања.

Табела 5 приказује вредности промене притиска у идеално еластичној цеви у свим слојевима.

r [mm]	p'' [N/mm ²]
76.2	432
78.414	399.8
80.628	370.1
82.842	342.6
85.056	317.3
87.27	293.9
89.484	272.2
91.698	252.1
93.912	233.3
96.126	215.9
98.34	199.6
108.67	136.3
113.84	110.9
119	88.7
124.17	69.3
129.34	52.1
134.5	36.9
139.67	23.3
144.83	11.2
150	0

Табела 5: Вредности промене притиска у идеално еластичној цеви

Тангенцијално напрезање, у идеално еластичној цеви, у свим слојевима цеви, се одређује изразом:

$$\sigma_t'' = p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + 1 \right) \quad (3.9)$$

Вредности промене тангенцијалног напрезања у свим слојевима цеви приказане су у табели 6.

r [mm]	σ_t'' [N/mm ²]	p''+ σ_t'' [N/mm ²]
76.2	732.5	1164.5
78.414	700.5	1100.3
80.628	670.9	1041.0
82.842	643.3	985.9
85.056	618.0	935.3
87.27	594.7	888.6
89.484	573.0	845.2
91.698	553.0	805.1
93.912	534.1	767.4
96.126	516.8	732.7
98.34	500.5	700.1
108.67	437.4	573.7
113.84	412.2	523.1
119	390.0	478.7
124.17	371.1	440.4
129.34	354.1	406.2
134.5	339.7	376.6
139.67	327.1	350.4
144.83	319.4	330.6
150	300.9	300.9

Табела 6: Промена тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви

Табела 7 приказује вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања док је цев у стању мировања.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σt' [N/mm ²]	p'+σt' [N/mm ²]
76.2	0	-348.9	-348.9
78.414	10.5	-297.3	-286.8
80.628	17.6	-247.1	-229.5
82.842	23.1	-199.4	-176.3
85.056	27.1	-154.6	-127.5
87.27	29.8	-112.1	-82.3
89.484	31.3	-71.6	-40.3
91.698	31.7	-33.3	-1.6
93.912	31.4	3.4	34.8
96.126	30.1	38.3	68.4
98.34	28.2	71.7	99.9
108.67	53.8	61.5	115.2
113.84	58.7	57.7	116.4
119	59.5	54.6	114.2
124.17	56.6	51.3	107.9
129.34	50.5	48.5	99.0
134.5	41.5	45.6	87.1
139.67	29.9	42.7	72.6
144.83	15.9	36.5	52.4
150	0	42.5	42.5

Табела 7: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања цеви у стању мировања

3.1.2. Прорачун отпорности цеви за случај 60% аутофретаже

Што се тиче прорачуна отпорности цеви за овај случај, све се одређује исто као и за случај 30% аутофретаже, с тим што је радијус, док ког се врши аутофретовање, већи.

Изрази, који су употребљени овде су исти као у случају 30% аутофретаже, с тим што у индексу појединих величина стоји 60%, уместо 30%.

Полазни подаци су исти, само је $r_0 = 120,48 \text{ mm}$.

Дакле, према формули:

$$p_1 = \frac{\sigma_e}{2} \left[\left(1 - \frac{x^2}{\theta^2} \right) + \frac{\ln x^2 - \alpha(x^2 - 1)}{1 + \alpha} \right]$$

Притисак аутофретаже је: $p_1 = 491.2 \frac{N}{mm^2}$

Притисак у осталим радијусима у зони пластичних деформација:

$$p = \frac{\sigma_e}{2} \left[x^2 \left(\frac{1}{\xi^2} - \frac{1}{\theta^2} \right) + \frac{\ln \frac{x^2}{\xi^2} - \frac{x^2}{\xi^2} + 1}{1 + \alpha} \right]$$

У зони еластичних деформација притисак се рачуна изразом:

$$p = \frac{\sigma_e}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_2^2} \right)$$

Табела 8 садржи вредности промене притиска у зони пластичних и еластичних деформација.

r [N/mm ²]	p [N/mm ²]
76.2	491.2
78.414	480.0
80.628	468.1
82.842	445.7
85.056	423.9
87.27	402.8
89.484	382.3
91.698	362.3
93.912	342.8
96.126	323.8
98.34	305.3
102.77	269.6
107.2	235.5
111.62	203.0
116.05	171.8
120.48	141.8
126.38	116.1
129.34	102.6
132.29	88.9
135.24	74.8
138.19	60.5
141.14	45.9
144.1	30.8
147.05	15.6
150	0

Табела 8: Вредности промене притиска у зони пластичних и еластичних деформација

Тангенцијално напрезање, у зони пластичних деформација, се одређује изразом:

$$(\sigma_t + p) = \frac{\sigma_e}{1 + \alpha} \left(1 + \alpha \frac{x^2}{\xi^2} \right)$$

При чему се од добијеног решења одузима вредност притиска, не би ли се добила вредност тангенцијалног напрезања.

У еластичној зони се тангенцијално напрезање одређује помоћу Ламеових константи.

Табела 9 приказује вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних и зони еластичних деформација.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
76.2	344.1	835.3
78.414	352.0	832.0
80.628	360.9	829.0
82.842	380.5	826.2
85.056	399.7	823.7
87.27	418.5	821.3
89.484	436.8	819.1
91.698	454.8	817.1
93.912	472.4	815.2
96.126	489.6	813.4
98.34	506.5	811.8
102.77	539.2	808.8
107.2	570.6	806.2
111.62	600.9	803.9
116.05	630.1	801.8
120.48	658.2	800.0
126.38	620.9	737.0
129.34	604.5	707.1
132.29	589.2	678.1
135.24	574.9	649.7
138.19	561.5	622.0
141.14	548.9	594.8
144.1	537.1	567.9
147.05	526.0	541.6
150	516.4	516.4

Табела 9: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних и зони еластичних деформација

Досадашње вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања су везане за период док траје процес ауофретаже.

Сада треба одредити вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања. Одређују се следећим изразима:

$$p' = p - p''$$

$$\sigma_t' = \sigma_t - \sigma_t''.$$

Прво се одреде притисак и тангенцијално напрезање у идеално еластичној цеви, узроковани дејством унутрашњег притиска. Притисак се одређује помоћу Ламеових константи, при чему се добија негативно решење, тако да је неопходно узети апсолутну вредност тог решења, за даље одређивање тангенцијалног напрезања.

$$p'' = \left| A_1 - \frac{B_1}{r^2} \right|$$

$$\sigma_t'' = p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + 1 \right)$$

Табела 10 садржи вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви.

r [mm]	p'' [N/mm ²]	σ'' [N/mm ²]	p''+ σ'' [N/mm ²]
76.2	491.2	832.9	1324.1
78.414	454.3	796.0	1250.3
80.628	420.5	762.2	1182.7
82.842	389.3	731.0	1120.3
85.056	360.5	702.2	1062.7
87.27	333.9	675.6	1009.5
89.484	309.2	650.9	960.1
91.698	286.3	628.0	914.3
93.912	265.02	606.7	871.7
96.126	245.2	586.9	832.1
98.34	226.7	568.5	795.2
102.77	193.1	534.8	727.9
107.2	163.7	505.5	669.2
111.62	137.7	479.4	617.1
116.05	114.6	456.3	570.9
120.48	93.9	435.3	529.2
126.38	69.8	411.4	481.2
129.34	58.9	400.4	459.3
132.29	48.8	390.5	439.3
135.24	39.3	380.8	420.1
138.19	30.5	372.8	403.3
141.14	22.1	363.4	385.5
144.1	14.3	356.6	370.9
147.05	6.9	347.4	354.3
150	0	341.4	341.4

Табела 10: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви

Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања, за период док је цев у стању мировања, добијене горе наведеним изразима, приказане су у табели 11.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σ_t' [N/mm ²]	$p'+\sigma_t'$ [N/mm ²]
76.2	0.0	-488.8	-488.8
78.414	25.7	-444.0	-418.3
80.628	47.6	-401.4	-353.7
82.842	56.4	-350.5	-294.1
85.056	63.4	-302.5	-239.0
87.27	68.9	-257.1	-188.2
89.484	73.1	-214.0	-141.0
91.698	76.0	-173.2	-97.2
93.912	77.8	-134.3	-56.6
96.126	78.6	-97.3	-18.7
98.34	78.6	-62.0	16.6
102.77	76.5	4.4	80.9
107.2	71.8	65.2	137.0
111.62	65.3	121.4	186.8
116.05	57.2	173.7	230.9
120.48	47.9	222.9	270.8
126.38	46.3	209.6	255.8
129.34	43.7	204.1	247.8
132.29	40.1	198.7	238.8
135.24	35.5	194.1	229.7
138.19	30.0	188.7	218.8
141.14	23.8	185.5	209.3
144.1	16.5	180.5	197.1
147.05	8.7	178.6	187.3
150	0.0	175.0	175.0

Табела 11: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања

3.1.3. Прорачун отпорности цеви за случај 100% аутофретаже

Карактеристично за овај случај је што овде не постоји зона са еластичним деформацијама, с обзиром на то, да се аутофретавање врши до радијуса 150 mm, што је уједно и спољашњи радијус цеви.

Промена притиска и тангенцијалног напрезања по слојевима цеви се одређује исто као и у претходним случајевима, с тим што се прорачун врши само за зону пластичних деформација. И овде су искоришћени изрази као у случају 30% аутофретаже, само што у индексу појединих величина стоји 100% уместо 30%.

Сви полазни подаци, сем радијуса r_0 , су исти, као и у претходним случајевима.

$$r_0 = r_2 = 150 \text{ mm}$$

$$\text{Притисак аутофретаже: } p_1 = 559.2 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 12 садржи резултате притиска у осталим радијусима у зони пластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]
76.2	559.2
83.58	408.4
90.96	343.2
98.34	283.3
105.72	228.0
113.1	176.4
120.48	128.2
127.86	82.9
135.24	40.2
142.62	-0.2
150	0

Табела 12: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација

Вредности промене тангенцијалног напрезања, у зони пластичних деформација, су приказане у табели 13.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
76.2	293.0	852.2
83.58	432.0	840.4
90.96	488.0	831.2
98.34	540.5	823.8
105.72	589.9	817.8
113.1	636.5	812.9
120.48	680.6	808.8
127.86	722.5	805.4
135.24	762.3	802.5
142.62	800.2	800.0
150	776.5	776.5

Табела 13: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација

Вредности притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви, неопходне за одређивање истих за период док је цеви у стању мировања, приказане су у табели 14.

r [mm]	p" [N/mm ²]	σ_t'' [N/mm ²]	p"+ σ_t'' [N/mm ²]
76.2	559.2	948.2	1507.4
83.58	431.7	821.0	1252.7
90.96	334.4	723.4	1057.8
98.34	258.02	647.0	905.0
105.72	197.1	586.1	783.2
113.1	147.6	536.6	684.2
120.48	106.9	496.0	602.9
127.86	73.2	462.2	535.4
135.24	44.8	433.8	478.6
142.62	20.7	409.6	430.3
150	0	389.0	389.0

Табела 14: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви

Табела 15 садржи вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σ_t' [N/mm ²]	p'+ σ_t' [N/mm ²]
76.2	0	-655.2	-655.2
83.58	-23.287	-389.0	-412.2
90.96	8.82047	-235.5	-226.7
98.34	25.3265	-106.6	-81.2
105.72	30.8633	3.8	34.7
113.1	28.8254	99.9	128.7
120.48	21.3193	184.6	205.9
127.86	9.72956	260.3	270.0
135.24	-4.5848	328.5	323.9
142.62	-20.907	390.5	369.6
150	0	387.5	387.5

Табела 15: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација за период цеви у стању мировања

3.2. Прорачун отпорности аутофретоване цеви према теорији ХМХ

За прорачун отпорности цеви по овом критеријуму, посматра се слика уздужног пресека цеви, иста као у тачки 3.1. Овде је такође одрађен прорачун отпорности цеви само у првом попречном пресеку.

Полазни подаци су такође исти:

- граница еластичности: $\sigma_e = 800 \frac{N}{mm^2}$,
- модул еластичности: (Youngov) $E = 2.2 \cdot 10^4 \frac{N}{mm^2}$,
- коефицијент $\omega = 0.03$, представља заосталу трајну релативну деформацију цеви.

Пошто је цев отворена, аутофретажа се врши без појаве уздужних напрезања, односно, $p_2 = 0$ и $\sigma_z = 0$.

Прво се рачуна радијус цеви за случајеве 30%, 60% и 100% аутофретаже. То је радијус који треба да достигну пластичне деформације при аутофретовању у полуеластичном режиму.

- $r_{30\%} = r_1 + 0,3 \cdot (r_2 - r_1) = 76,2 + 0,3 \cdot (150 - 76,2) = 98,34 \text{ mm}$
- $r_{60\%} = r_1 + 0,6 \cdot (r_2 - r_1) = 76,2 + 0,6 \cdot (150 - 76,2) = 120,48 \text{ mm}$
- $r_{100\%} = r_2 = 150 \text{ mm}$

(3.10)

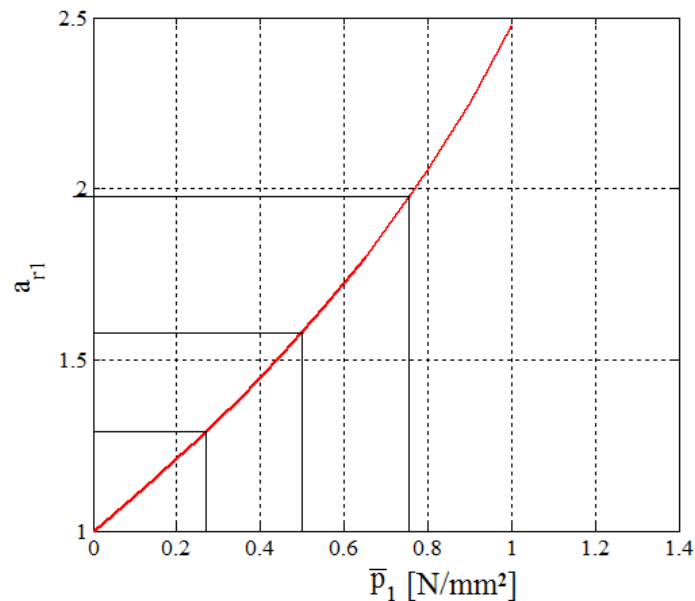
Према теорији деформационог рада, величина a_{21} и граница отпорности аутофретоване цеви су повезане следећим изразом:

$$a_{21} = \sqrt{\left(\sqrt{1 - \frac{3}{4}\bar{p}_1^2 + \frac{\bar{p}_1}{2}}\right) \exp\left[\sqrt{3} \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{p}_1\right)\right]} \quad (3.11)$$

Овај израз се добија из израза за критеријум ХМХ, односно, критеријум ХМХ, који је облика:

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{r_2^2 - r_1^2}{\sqrt{3r_2^4 + r_1^4}}$$

Из првог израза је немогуће да се одреди вредност $\bar{p}_1$ аналитичким путем, па се због тога приступа добијању вредности графичком методом. То се изводи тако што се за одређен број вредности a_{21} израчунавају вредности $\bar{p}_1$, а потом се са добијене криве $a_{21}(\bar{p}_1)$, графички одређује вредност $\bar{p}_1$ (слика 12).



Слика 12: Одређивање отпорности аутофретоване цеви у првом попречном пресеку

Табела 16 приказује резултате $\bar{p}_1$, добијене програмским решавањем једначине за a_{21} , за познате вредности a_{21} за 30%, 60% и 100% аутофретаже.

Слој аутофретаже	30%	60%	100%
a_{r1}	1,29	1,581	1,968
$\bar{p}_1$ [N / mm ²]	0,2695	0,4998	0,7517

Табела 16: Вредности отпорности аутофретоване цеви

3.2.1. Прорачун отпорности цеви за случај 30% аутофретаже

$$\bar{p}_1 = 0.2695$$

$$p_{1gr}^{IV} = \bar{p}_1 \sigma_e = 0.2695 \cdot 800 = 215.6 \frac{N}{mm^2} \quad (3.12)$$

Ако се усвоји вредност за заосталу трајну релативну деформацију цеви, $\omega = 0,03$, може се одредити нова граница еластичности материјала цеви и то:

$$\sigma_s = \sigma_e + \omega \cdot E = 800 + 0,03 \cdot 2,2 \cdot 10^4 = 1460 \frac{N}{mm^2} \quad (3.13)$$

Притисак, потребан за потпуно аутофретовање, рачуна се помоћу израза:

$$P_{1a} = \sigma_s \cdot \ln a_{21} = 1460 \cdot \ln 1,968 = 992.8 \frac{N}{mm^2} \quad (3.14)$$

Ако се жели извршити аутофретовање до односа полупречника:

$$a_{2r30\%} = \frac{r_2}{r_{30\%}} = \frac{150}{98.34} = 1.525 \quad (3.15)$$

$$p_{1a30\%} = \sigma_s \ln \frac{a_{21}}{a_{2r30\%}} + \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r30\%}^2 - 1}{a_{2r30\%}^2} \quad (3.16)$$

$$p_{1a30\%} = 781.1 \frac{N}{mm^2}$$

Даље се рачуна притисак између пластично деформисане и еластичне зоне и то, помоћу израза:

$$p_{030\%} = \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r30\%}^2 - 1}{a_{2r30\%}^2} = 416.1 \frac{N}{mm^2} \quad (3.17)$$

Табела 17 приказује промену притиска у зони пластичних деформација.

r [mm]	P [N/mm ²]
76.2	781.1
78.414	747.0
80.628	706.3
82.842	666.8
85.056	628.3
87.27	590.8
89.484	554.2
91.698	518.5
93.912	483.7
96.126	449.7
98.34	416.1

Табела 17: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација

Тангенцијално напрезање у слојевима радијуса $r \leq r_{30\%} = 98,34 \text{ mm}$, за полуеластичну зону, рачунају се помоћу следећих израза:

$$\sigma_{t0\%} = \frac{\sigma_s}{1+\omega} \left(1 + \omega \frac{r_{0\%}}{r_1} \right) - p_{1a0\%} = 678.9 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{t30\%} = \frac{\sigma_s}{1+\omega} \left(1 + \omega \frac{r_{30\%}}{r_1} \right) - p_{1a30\%} = 1056.3 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (3.19)$$

Промена тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација приказана је у табели 18.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
76.2	678.9	1460.0
78.414	714.2	1461.2
80.628	756.1	1462.5
82.842	796.9	1463.7
85.056	836.7	1464.9
87.27	875.4	1466.2
89.484	913.2	1467.4
91.698	950.1	1468.6
93.912	986.2	1469.9
96.126	1021.5	1471.1
98.34	1056.3	1472.4

Табела 18: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација

Притисак и тангенцијално напрезање у еластичној зони, у делу зида цеви који није обухваћен аутофретажом, одређују се помоћу израза за Ламеове константе, јер овај део зида обухвата полупречнике од граничног слоја аутофретаже, па до спољашњег пречника.

$$A = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$B = (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

С обзиром на то, да важи услов да је цев отворена и да се поступак аутофретаже врши без појаве уздужних напрезања, односно, $p_2 = 0$ и $\sigma_z = 0$, једначине добијају нови облик:

$$A = \frac{p_{1a30\%} \cdot r_{30\%}^2}{r_2^2 - r_{30\%}^2} = \frac{416.1 - 98.34^2}{150^2 - 98.34^2} = 313.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$B = A \cdot r_2^2 = 313.7 \cdot 150^2 = 7058250 N$$

$$p_{1a30\%} = \left| A - \frac{B}{r_{30\%}^2} \right| = 284 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{1ar2} = \left| A - \frac{B}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 19 приказује вредности промене притиска у зони еластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]
108.67	284
113.84	230.9
119	184.7
124.17	144.1
129.34	108.2
134.5	76.5
139.67	48.1
144.83	22.8
150	0

Табела 19: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација

Тангенцијално напрезање у слојевима радијуса $r \geq r_{30\%} = 98,34 \text{ mm}$, за еластичну зону, одређује се помоћу следећих израза:

$$\sigma_{t30\%>} = A + \frac{B}{r_{30\%>}^2} = 911.4 \frac{N}{mm^2} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{t30\%>} = A + \frac{B}{r_2^2} = 627.4 \frac{N}{mm^2} \quad (3.21)$$

Табела 20 приказује вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]	σ _t [N/mm ²]	p+σ _t [N/mm ²]
108.67	284	911.4	1195.4
113.84	230.9	858.3	1089.2
119	184.7	812.1	996.8
124.17	144.1	771.5	915.6
129.34	108.2	735.6	843.8
134.5	76.5	703.9	780.4
139.67	48.1	675.5	723.6
144.83	22.8	650.2	673.0
150	0	627.4	627.4

Табела 20: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација

За прорачун притиска и тангенцијалног напрезања, у периоду док је цев у мировању, користе се суперпозиције, идентичне као у прорачуну по теорији Сен – Венана:

$$p' = p - p''$$

$$\sigma'_t = \sigma_t - \sigma''_t$$

$$p_{1a30\%} = 781.1 \frac{N}{mm^2}$$

Притисак и тангенцијално напрезање, у зони од унутрашњег полупречника, до спољашњег, рачунају се помоћу следећих Ламеових константи:

$$A_1 = \frac{p_{1a30\%} \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$B_1 = A_1 \cdot r_2^2$$

$$A_1 = 271.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$B_1 = 6113250 \text{ N}$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_1^2} \right| = 781.1 \frac{N}{mm^2} \quad (3.22)$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

Тангенцијално напрезање, у слојевима радијуса, од унутрашњег полупречника, до спољашњег, који су у еластичној зони, одређује се помоћу израза:

$$\sigma''_{tr1} = A_1 + \frac{B_1}{r_1^2} = 6713.1 \frac{N}{mm^2} \quad (3.23)$$

$$\sigma''_{tr2} = A_1 + \frac{B_1}{r_1^2} = 2754.03 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 21 приказује вредности притисака и тангенцијалног напрезања у свим слојевима, у идеално еластичној цеви.

r [mm]	p'' [N/mm ²]	σ _t '' [N/mm ²]	p''+σ _t '' [N/mm ²]
76.2	781.1	1324.5	2105.7
78.414	722.5	1265.9	1988.5
80.628	668.7	1212.1	1880.7
82.842	619.1	1162.5	1781.6
85.056	573.3	1116.7	1690.0
87.27	531.0	1074.4	1605.4
89.484	491.8	1035.2	1526.9
91.698	455.3	998.7	1454.1
93.912	421.5	964.9	1386.3
96.126	389.9	933.3	1323.2
98.34	360.4	903.8	1264.3
108.67	246.0	789.4	1035.3
113.84	200.0	743.4	943.4
119	160.0	703.4	863.4
124.17	124.8	668.2	793.0
129.34	93.7	637.1	730.9
134.5	66.2	609.6	675.9
139.67	41.7	585.1	626.8
144.83	19.7	563.1	582.9
150	0.0	543.4	543.4

Табела 21: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви

За одређивање притиска и тангенцијалног напрезања, за период док је цев у стању мировања, користе се изрази:

$$p' = p_{1a30\%} - p''$$

$$\sigma'_t = \sigma_{t30\%} - \sigma''_t$$

Табела 22 приказује вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σ'_t [N/mm ²]	p'+ σ'_t [N/mm ²]
76.2	0.0	-645.6	-645.7
78.414	24.5	-551.7	-527.2
80.628	37.7	-455.9	-418.3
82.842	47.7	-365.6	-317.9
85.056	55.0	-280.1	-225.1
87.27	59.8	-199.0	-139.2
89.484	62.4	-121.9	-59.5
91.698	63.2	-48.6	14.6
93.912	62.2	21.4	83.6
96.126	59.8	88.2	147.9
98.34	55.7	152.4	208.1
108.67	38.0	122.0	160.1
113.84	30.9	114.9	145.8
119	24.7	108.7	133.4
124.17	19.3	103.3	122.6
129.34	14.5	98.5	113.0
134.5	10.3	94.2	104.5
139.67	6.4	90.4	96.9
144.83	3.1	87.1	90.1
150	0.0	84.0	84.0

Табела 22: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања

3.2.2. Прорачун отпорности за случај 60% аутофретаже

$$\bar{p}_1 = 0.4998$$

У овом случају, коришћени су исти изрази као и у случају 30% аутофретавања, с тим што у индексу појединих величина стоји 60%, а не 30%.

$$p_{1gr}^{IV} = \bar{p}_1 \cdot \sigma_e = 0.4998 \cdot 800 = 399.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_s = 1460 \frac{N}{mm^2} ; p_{1a} = 992.8 \frac{N}{mm^2}$$

Ако се жели извршити аутофретавање до односа полупречника:

$a_{2r60\%} = \frac{r_2}{r_{60\%}} = \frac{150}{120,4} = 1.245$, потребан притисак аутофретаже се рачуна помоћу формуле:

$$p_{1a60\%} = \sigma_s \cdot \ln \cdot \frac{a_{21}}{a_{2r60\%}} + \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r60\%}^2 - 1}{a_{2r60\%}^2}$$

$$p_{1a60\%} = 924.4 \frac{N}{mm^2}$$

Даље се рачуна притисак између пластично деформисане и еластично деформисане зоне и то, помоћу израза:

$$p_{060\%} = \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r60\%}^2 - 1}{a_{2r60\%}^2}$$

$$p_{060\%} = 255.5 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 23 приказује промену притиска у зони пластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]
76.2	924.4
78.414	882.6
80.628	841.9
82.842	802.4
85.056	763.9
87.27	726.3
89.484	689.8
91.698	654.1
93.912	619.2
96.126	585.2
98.34	552.0
102.77	487.6
107.2	426.0
111.62	367.0
116.05	310.2
120.48	255.5

Табела 23: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација

Тангенцијално напрезање у слојевима радијуса $r \leq r_{60\%} = 120.48 \text{ mm}$, за полуеластичну зону, рачуна се помоћу следећих израза:

$$\sigma_{t0\%} = \frac{\sigma_s}{1 + \omega} \left(1 + \omega \frac{r_{0\%}}{r_1} \right) - p_{1a0\%} = 535.6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{t60\%} = \frac{\sigma_s}{1 + \omega} \left(1 + \omega \frac{r_{60\%}}{r_1} \right) - p_{1a60\%} = 1229.2 \frac{N}{mm^2}$$

Промена тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација приказана је у табели 24.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
76.2	535.6	1460.0
78.414	578.7	1461.2
80.628	620.6	1462.5
82.842	661.3	1463.7
85.056	701.1	1464.9
87.27	739.8	1466.2
89.484	777.7	1467.4
91.698	814.6	1468.6
93.912	850.6	1469.9
96.126	885.9	1471.1
98.34	920.4	1472.4
102.77	987.2	1474.8
107.2	1051.3	1477.3
111.62	1112.7	1479.8
116.05	1172.0	1482.2
120.48	1229.2	1484.7

Табела 24: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација

Притисак и тангенцијално напрезање у зони еластичних деформација, одређују се помоћу израза за Ламеове константе:

$$A = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$B = (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

С обзиром на то, да важи услов да је цев отворена и да се поступак аутофретаже врши без појаве уздужних напрезања, односно, $p_2 = 0$ и $\sigma_z = 0$, једначине добијају нови облик, и то:

$$A = \frac{p_{1a60\%} \cdot r_{60\%}^2}{r_2^2 - r_{60\%}^2}$$

$$B = A \cdot r_2^2$$

$$A = 464.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$B = A \cdot r_2^2 = 464.5 \cdot 150^2 = 10451250 \text{ N}$$

$$p_{1a60\%} = \left| A - \frac{B}{r_{60\%}^2} \right| = 189.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{1ar2} = \left| A - \frac{B}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 25 приказује вредности промене притиска у зони еластичних деформација.

r [mm]	p [N/mm ²]
126.38	189.9
129.34	160.2
132.29	132.7
135.24	106.9
138.19	82.8
141.14	60.1
144.1	38.8
147.05	18.8
150	0.0

Табела 25: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација

Тангенцијално напрезање, у зони еластичних деформација, одређује се помоћу израза:

$$\sigma_{t60\%>} = A + \frac{B}{r_{60\%>}^2} = 1118.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{t60\%>} = A + \frac{B}{r_2^2} = 929 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 26 приказује вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
126.38	1118.9	1308.7
129.34	1089.2	1249.5
132.29	1061.7	1194.4
135.24	1035.9	1142.8
138.19	1011.8	1094.6
141.14	989.1	1049.3
144.1	967.8	1006.6
147.05	947.8	966.6
150	929.0	929.0

Табела 26: Вредности промене тангенцијалног напрезања у зони еластичних деформација

За одређивање притиска и тангенцијалног напрезања, за период док је цев у стању мировања, користе се следеће релације:

$$p' = p - p''$$

$$\sigma'_t = \sigma_t - \sigma''_t$$

$$p_{1a60\%} = 924.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$A_1 = \frac{p_{1a60\%} \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$B_1 = A_1 \cdot r_2^2$$

$$A_1 = 321.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$B_1 = A_1 \cdot r_2^2 = 1634,4 \cdot 150^2 = 7233750 \text{ N}$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_1^2} \right| = 924.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

Тангенцијално напрезање, у слојевима, од унутрашњег полупречника, до спољашњег, одређују се помоћу израза:

$$\sigma''_{tr1} = A_1 + \frac{B_1}{r_1^2} = 1567.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma''_{tr2} = A_1 + \frac{B_1}{r_2^2} = 643 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 27 приказује вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања од унутрашњег радијуса, до спољашњег.

r [mm]	p" [N/mm ²]	σ_t " [N/mm ²]	p"+ σ_t " [N/mm ²]
76.2	924.3	1567.3	2491.6
78.414	855.0	1498.0	2352.9
80.628	791.2	1434.2	2225.5
82.842	732.6	1375.6	2108.1
85.056	678.4	1321.4	1999.8
87.27	628.3	1271.3	1899.6
89.484	581.9	1224.9	1806.8
91.698	538.8	1181.8	1720.6
93.912	498.7	1141.7	1640.4
96.126	461.4	1104.4	1565.7
98.34	426.5	1069.5	1496.0
102.77	363.4	1006.4	1369.8
107.2	308.0	951.0	1258.9
111.62	259.1	902.1	1161.2
116.05	215.6	858.6	1074.2
120.48	176.8	819.8	996.7
126.38	131.4	774.4	905.8
129.34	110.9	753.9	864.8
132.29	91.8	734.8	826.7
135.24	74.0	717.0	791.0
138.19	57.3	700.3	757.6
141.14	41.6	684.6	726.3
144.1	26.9	669.9	696.7
147.05	13.0	656.0	669.1
150	0.0	643.0	643.0

Табела 27: Вредности промене притисака и тангенцијалног напрезања од унутрашњег до спољашњег полупречника цеви

Табела 28 приказује вредности промене притисака и тангенцијалног напрезања, од унутрашњег, до спољашњег радијуса цеви, док је цев у стању мировања.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σ_t' [N/mm ²]	$p'+\sigma_t'$ [N/mm ²]
76.2	0.0	-1031.7	-1031.7
78.414	27.6	-919.3	-891.7
80.628	50.7	-813.7	-763.0
82.842	69.8	-714.2	-644.4
85.056	85.5	-620.3	-534.8
87.27	98.0	-531.5	-433.4
89.484	107.9	-447.2	-339.4
91.698	115.3	-367.2	-251.9
93.912	120.5	-291.1	-170.5
96.126	123.9	-218.5	-94.6
98.34	125.5	-149.1	-23.6
102.77	124.2	-19.2	105.0
107.2	118.1	100.3	218.4
111.62	107.9	210.6	318.6
116.05	94.6	313.4	408.0
120.48	78.7	409.4	488.0
126.38	58.4	344.4	402.9
129.34	49.3	335.3	384.7
132.29	40.9	326.9	367.7
135.24	32.9	318.9	351.8
138.19	25.5	311.5	337.0
141.14	18.5	304.5	323.0
144.1	11.9	297.9	309.9
147.05	5.8	291.8	297.6
150	0.0	286.0	286.0

Табела 28: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања од унутрашњег до спољашњег полупречника цеви у стању мировања

3.2.3. Прорачун отпорности цеви за случај 100% аутофретаже

$$\bar{p}_1 = 0.7517$$

Овде су, такође, употребљени исти изрази као у првом случају, али у индексу појединих величина сада стоји 100%, а не 30%.

$$p_{1gr}^{IV} = \bar{p}_1 \cdot \sigma_e = 601.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_s = 1460 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{1a} = 992.8 \frac{N}{mm^2}$$

Ако се жели извршити аутофретавање до односа полупречника:

$$a_{2r100\%} = \frac{r_2}{r_{100\%}} = \frac{150}{150} = 1$$

$$p_{1a100\%} = \sigma_s \cdot \ln \cdot \frac{a_{21}}{a_{2r100\%}} + \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r100\%}^2 - 1}{a_{2r100\%}^2}$$

$$p_{1a100\%} = 988.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{0100\%} = \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{a_{2r100\%}^2 - 1}{a_{2r100\%}^2}$$

$$p_{0100\%} = 0 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 29 приказује вредности промене притиска од унутрашњег, до спољашњег радијуса цеви.

r [mm]	p [N/mm ²]
76.2	988.8
83.58	853.9
90.96	730.3
98.34	616.4
105.72	510.8
113.1	412.2
120.48	320.0
127.86	233.2
135.24	151.2
142.62	73.7
150	0

Табела 29: Вредности промене притиска од унутрашњег до спољашњег радијуса цеви

Тангенцијално напрезање, у слојевима радијуса $r \leq r_{100\%} = 150 \text{ mm}$, рачуна се помоћу следећих израза:

$$\sigma_{t0\%} = \frac{\sigma_s}{1 + \omega} \left(1 + \omega \frac{r_{0\%}}{r_1} \right) - p_{1a0\%} = 7400 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{t100\%} = \frac{\sigma_s}{1 + \omega} \left(1 + \omega \frac{r_{100\%}}{r_1} \right) - p_{1a100\%} = 2596.8 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Промена тангенцијалног напрезања од унутрашњег полупречника до граничног слоја, приказана је у табели 30.

r [mm]	σ_t [N/mm ²]	p+ σ_t [N/mm ²]
76.2	512.4	1501.2
83.58	563.6	1417.5
90.96	687.2	1417.5
98.34	801.1	1417.5
105.72	906.7	1417.5
113.1	1005.2	1417.5
120.48	1097.5	1417.5
127.86	1184.3	1417.5
135.24	1266.2	1417.5
142.62	1343.8	1417.5
150	1417.5	1417.5

Табела 30: Вредности промене тангенцијалног напрезања од полупречника до граничног слоја

С обзиром на то, да се ради о случају 100% аутофретаже, у зиду цеви не постоји еластична зона, која траје од граничног полупречника, до спољашњег полупречника, јер је тај гранични полупречник заправо, једнак спољашњем полупречнику. Због тога, Ламеове константе, притисци и тангенцијална напрезања су једнаки нули.

$$A = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$B = A \cdot r_2^2 = 0 N$$

$$p_{1a100\%} = \left| A - \frac{B}{r_{100\%}^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{1ar2} = \left| A - \frac{B}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{t100\%>} = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{t100\%>} = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$p_{1a100\%} = 988.8 \frac{N}{mm^2}$$

Притисак и тангенцијално напрезање, у идеално еластичној цеви, рачунају се помоћу Ламеових константи:

$$A_1 = \frac{p_{1a100\%} \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$B_1 = A_1 \cdot r_2^2$$

$$A_1 = 343.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$B_1 = 7737750 N$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_1^2} \right| = 988.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$p''_{1ar1} = \left| A_1 - \frac{B_1}{r_2^2} \right| = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma''_{tr1} = A_1 + \frac{B_1}{r_1^2} = 1676.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma''_{tr2} = A_1 + \frac{B_1}{r_2^2} = 687.8 \frac{N}{mm^2}$$

Табела 31 приказује вредности притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви.

r [mm]	p" [N/mm ²]	σt" [N/mm ²]	p"+σt" [N/mm ²]
76.2	988.7	1676.5	2665.2
83.58	763.8	1451.6	2215.3
90.96	591.3	1279.1	1870.4
98.34	456.2	1144.0	1600.2
105.72	348.4	1036.2	1384.6
113.1	261.0	948.8	1209.8
120.48	189.2	877.0	1066.1
127.86	129.4	817.2	946.6
135.24	79.2	767.0	846.1
142.62	36.5	724.3	760.8
150	0.0	687.8	687.8

Табела 31: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања у идеално еластичној цеви

За прорачун притисака и напрезања аутофретоване цеви, за период док је цев у стању мировања, користе се следеће једначине:

$$p' = p_{1a100\%} - p''$$

$$\sigma'_t = \sigma_{t100\%} - \sigma''_t$$

Табела 32 приказује вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања.

r [mm]	p' [N/mm ²]	σ_t' [N/mm ²]	p'+ σ_t' [N/mm ²]
76.2	0.0	-1164.2	-1164.2
83.58	90.1	-887.9	-797.9
90.96	139.0	-592.0	-453.0
98.34	160.2	-343.0	-182.8
105.72	162.4	-129.5	32.9
113.1	151.2	56.4	207.7
120.48	130.8	220.5	351.3
127.86	103.8	367.1	470.9
135.24	72.1	499.3	571.4
142.62	37.1	619.5	656.7
150	0.0	729.7	729.7

Табела 32: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за период док је цев у стању мировања

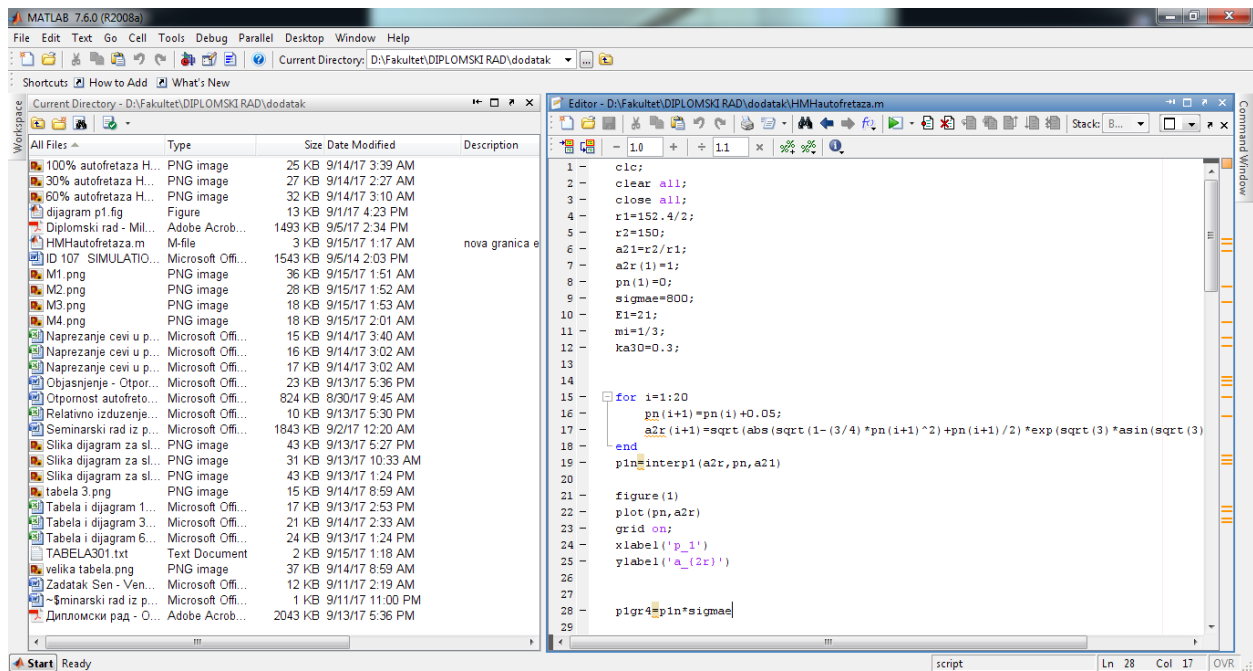
3.3. Симулација у програмском пакету Матлаб

Програмски пакет Матлаб је било неопходно искористити за одређивање притиска $\bar{p}_1$ у тачки 3.2, с обзиром на то, да није било могуће одредити га релацијом:

$$a_{21} = \sqrt{\left(\sqrt{1 - \frac{3}{4}\bar{p}_1^2} + \frac{\bar{p}_1}{2}\right) \exp\left[\sqrt{3} \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\bar{p}_1\right)\right]}.$$

У пакету Матлаб се, постављањем математичког модела и односа a_{21} , добија графички приказ у облику дијаграма, где се може одредити вредност $\bar{p}_1$.

Слика 13 приказује изглед радног прозора пакета Матлаб.



Слика 13: Радни прозор пакета Матлаб

4. Графички и табеларни приказ добијених резултата прорачуна

У овој тачки је извршена упоредна анализа вредности притиска и тангенцијалног напрезања, добијених прорачуном отпорности аутофретоване цеви по теоријама Сен – Венана и ХМХ. Сви резултати су приказани у виду табела, које обухватају вредности целокупног прорачуна. Резултати су приказани и графички, у виду дијаграма, где се још лакше може уочити промена притиска и тангенцијалног напрезања у зонама пластичних и еластичних деформација. За упоредну анализу, узете су вредности притиска и тангенцијалног напрезања у зони пластичних деформација, за унутрашњи радијус (76.2 mm), радијус док којег се врши аутофретавање (у зависности од тога да ли се ради о случају 30%, 60% или 100% аутофретаже, вредности радијуса су 98.34 mm, 120.48 mm и 150 mm) и спољашњи радијус цеви (150 mm).

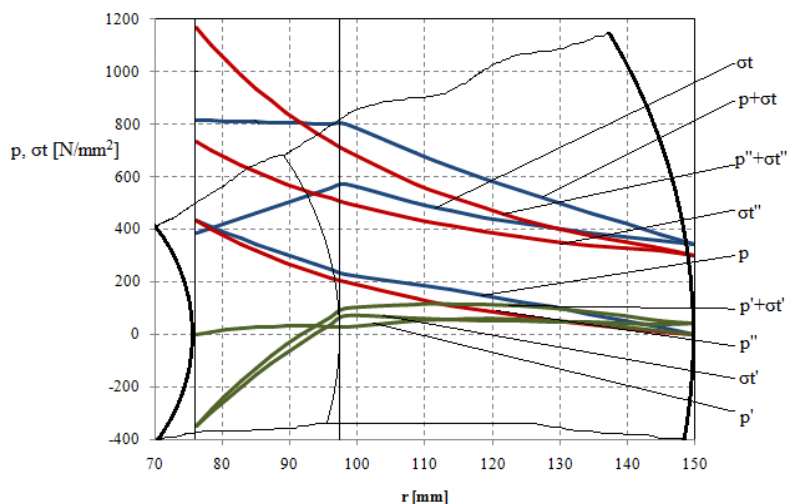
4.1. Резултати прорачуна по наведеним теоријама за случај 30% аутофретаже цеви

Табела 33 садржи резултате, добијене прорачуном отпорности за случај 30% аутофретаже, по теорији Сен – Венана.

r	p	σ_t	$p+\sigma_t$	p''	σ_t''	$p''+\sigma_t''$	p'	σ_t'	$p'+\sigma_t'$
76.2	432	383.6	815.6	432	732.5	1164.5	0	-348.9	-348.9
78.414	410.3	403.1	813.4	399.8	700.5	1100.3	10.5	-297.3	-286.8
80.628	387.7	423.7	811.4	370.1	670.9	1041.0	17.6	-247.1	-229.5
82.842	365.7	443.9	809.6	342.6	643.3	985.9	23.1	-199.4	-176.3
85.056	344.4	463.5	807.9	317.3	618.0	935.3	27.1	-154.6	-127.5
87.27	323.7	482.6	806.3	293.9	594.7	888.6	29.8	-112.1	-82.3
89.484	303.5	501.4	804.9	272.2	573.0	845.2	31.3	-71.6	-40.3
91.698	283.8	519.7	803.5	252.1	553.0	805.1	31.7	-33.3	-1.6
93.912	264.7	537.5	802.2	233.3	534.1	767.4	31.4	3.4	34.8
96.126	246.01	555.1	801.1	215.9	516.8	732.7	30.1	38.3	68.4
98.34	227.8	572.2	800.0	199.6	500.5	700.1	28.2	71.7	99.9
108.67	190.1	498.9	689.0	136.3	437.4	573.7	53.8	61.5	115.2
113.84	169.6	469.9	639.5	110.9	412.2	523.1	58.7	57.7	116.4
119	148.2	444.6	592.8	88.7	390.0	478.7	59.5	54.6	114.2
124.17	125.9	422.3	548.2	69.3	371.1	440.4	56.6	51.3	107.9
129.34	102.6	402.7	505.3	52.1	354.1	406.2	50.5	48.5	99.0
134.5	78.4	385.3	463.7	36.9	339.7	376.6	41.5	45.6	87.1
139.67	53.2	369.8	423.0	23.3	327.1	350.4	29.9	42.7	72.6
144.83	27.1	355.9	383.0	11.2	319.4	330.6	15.9	36.5	52.4
150	0	343.4	343.4	0	300.9	300.9	0	42.5	42.5

Табела 33: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана за случај 30% аутофретаже цеви

Слика 14 приказује дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања, прорачунате по наведеној теорији.



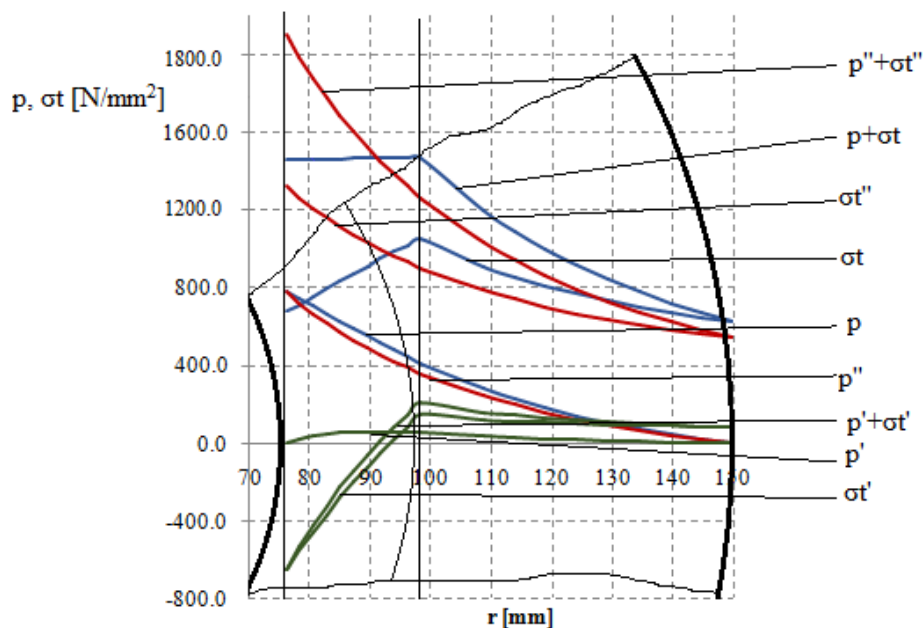
Слика 14: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 30% аутофретаже цеви по теорији Сен – Венана

Табела 34 садржи резултате, добијене прорачуном отпорности за случај 30% аутофретаже цеви, по теорији ХМХ.

r	p	σ	$p+\sigma$	p''	σ''	$p''+\sigma''$	p'	σ'	$p'+\sigma'$
76.2	781.1	678.9	1460.0	781.1	1324.5	2105.7	0.0	-645.6	-645.7
78.414	747.0	714.2	1461.2	722.5	1265.9	1988.5	24.5	-551.7	-527.2
80.628	706.3	756.1	1462.5	668.7	1212.1	1880.7	37.7	-455.9	-418.3
82.842	666.8	796.9	1463.7	619.1	1162.5	1781.6	47.7	-365.6	-317.9
85.056	628.3	836.7	1464.9	573.3	1116.7	1690.0	55.0	-280.1	-225.1
87.27	590.8	875.4	1466.2	531.0	1074.4	1605.4	59.8	-199.0	-139.2
89.484	554.2	913.2	1467.4	491.8	1035.2	1526.9	62.4	-121.9	-59.5
91.698	518.5	950.1	1468.6	455.3	998.7	1454.1	63.2	-48.6	14.6
93.912	483.7	986.2	1469.9	421.5	964.9	1386.3	62.2	21.4	83.6
96.126	449.7	1021.5	1471.1	389.9	933.3	1323.2	59.8	88.2	147.9
98.34	416.1	1056.3	1472.4	360.4	903.8	1264.3	55.7	152.4	208.1
108.67	284	911.4	1195.4	246.0	789.4	1035.3	38.0	122.0	160.1
113.84	230.9	858.3	1089.2	200.0	743.4	943.4	30.9	114.9	145.8
119	184.7	812.1	996.8	160.0	703.4	863.4	24.7	108.7	133.4
124.17	144.1	771.5	915.6	124.8	668.2	793.0	19.3	103.3	122.6
129.34	108.2	735.6	843.8	93.7	637.1	730.9	14.5	98.5	113.0
134.5	76.5	703.9	780.4	66.2	609.6	675.9	10.3	94.2	104.5
139.67	48.1	675.5	723.6	41.7	585.1	626.8	6.4	90.4	96.9
144.83	22.8	650.2	673.0	19.7	563.1	582.9	3.1	87.1	90.1
150	0	627.4	627.4	0.0	543.4	543.4	0.0	84.0	84.0

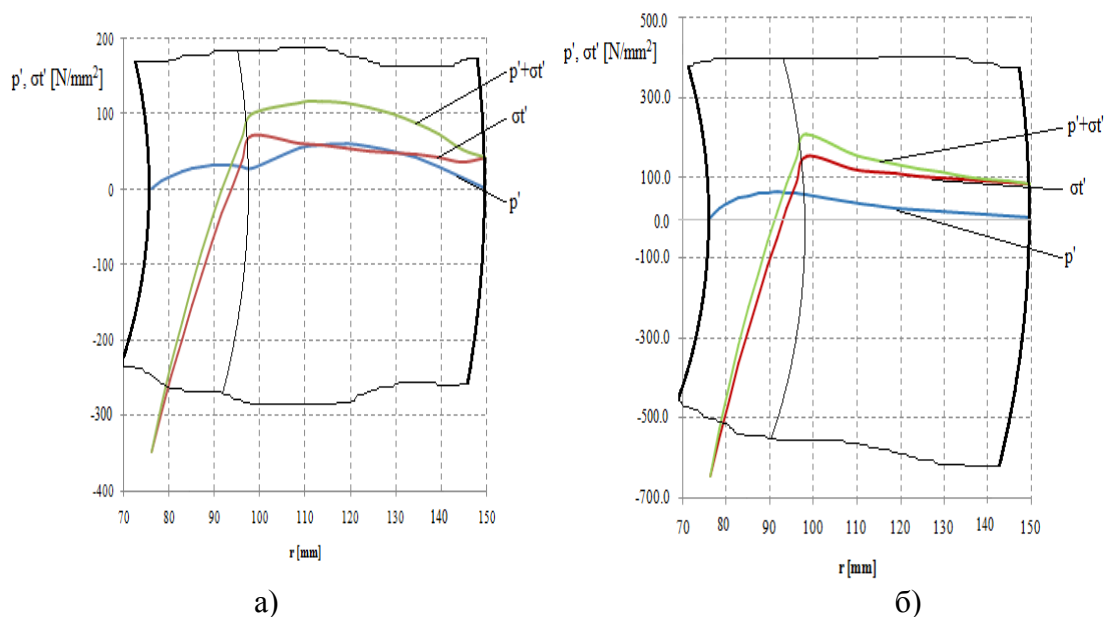
Табела 34: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији ХМХ за случај 30% аутофретаже цеви

Слика 15 приказује графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 30% аутофретаже, по наведеној теорији.



Слика 15: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 30% аутофретаже цеви по теорији ХМХ

Слика 16 приказује промену притиска и тангенцијалног напрезања цеви у стању мировања, по теорији Сен – Венана (слика 16а) и теорији ХМХ (слика 16б).



Слика 16: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 30% аутофретаже
 а) по теорији Сен – Венана
 б) по теорији ХМХ

Крива промене притиска, за период цеви у стању мировања, по теорији Сен – Венана, расте од нуле, до одређене вредности, да би, затим, почела да опада. Вредност притиска опада до радијуса, до ког се врши аутофретовање (овај радијус, у овом случају, износи 98.34 mm). Након тога поново почиње да расте до одређеног слоја цеви, где почиње да опада све нуле на спољашњем радијусу цеви.

Крива промене притиска, по теорији ХМХ је видно другачија. Притисак расте до одређене вредности и одређеног слоја цеви, да би, након тога, опао до нуле, на спољашњем радијусу цеви. Максимална вредност притиска по другој теорији, је готово иста као максимална вредност притиска по првој теорији.

Тангенцијално напрезање расте од негативног дела графика до радијуса до ког се врши аутофретовање, а након тога опада до одређене вредности.. Напрезање, по другој теорији је око 2 пута веће од напрезања по првој.

Ове две теорије су повезане следећим изразом, с обзиром на то да су димензије цеви једнаке за обе теорије:

$$\frac{p_{1gr}^{II}}{p_{1gr}^{IV}} = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}}{2a_{21}^2 + 1} > 1 \quad (4.1)$$

Из релације следи:

$$p_{1gr}^{II} = 1.16 p_{1gr}^{IV}$$

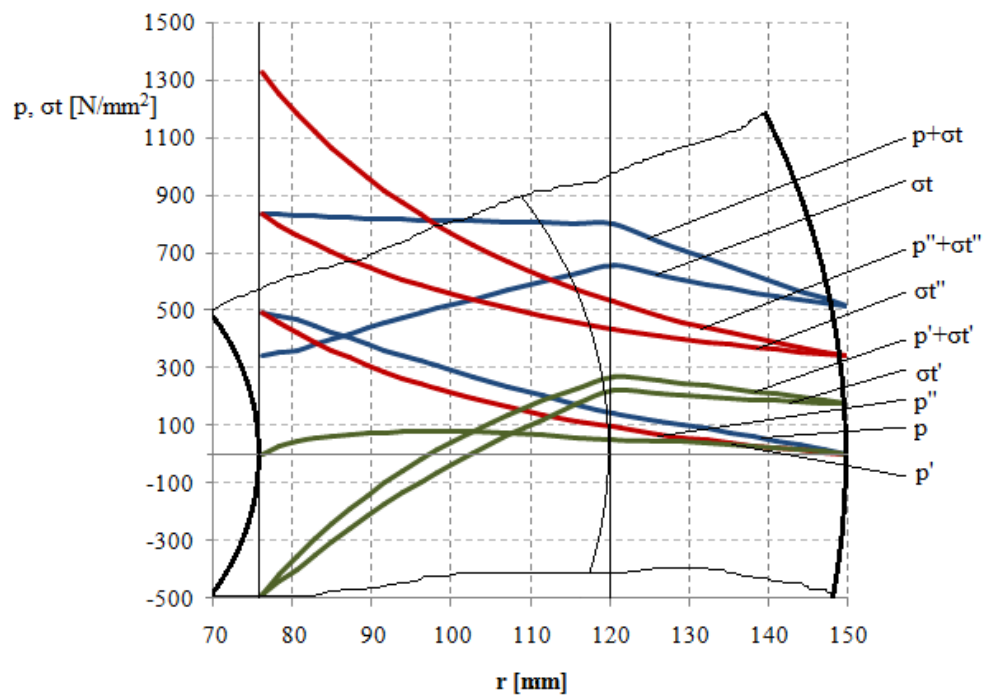
4.2. Резултати прорачуна за случај 60% аутофретаже цеви

Табела 35 садржи резултате прорачуна притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана за случај 60% аутофретаже цеви.

r	p	σ_t	$p+\sigma_t$	p''	σ_t''	$p''+\sigma_t''$	p'	σ_t'	$p'+\sigma_t'$
76.2	491.2	344.1	835.3	491.2	832.9	1324.1	0.0	-488.8	-488.8
78.414	480.0	352.0	832.0	454.3	796.0	1250.3	25.7	-444.0	-418.3
80.628	468.1	360.9	829.0	420.5	762.2	1182.7	47.6	-401.4	-353.7
82.842	445.7	380.5	826.2	389.3	731.0	1120.3	56.4	-350.5	-294.1
85.056	423.9	399.7	823.7	360.5	702.2	1062.7	63.4	-302.5	-239.0
87.27	402.8	418.5	821.3	333.9	675.6	1009.5	68.9	-257.1	-188.2
89.484	382.3	436.8	819.1	309.2	650.9	960.1	73.1	-214.0	-141.0
91.698	362.3	454.8	817.1	286.3	628.0	914.3	76.0	-173.2	-97.2
93.912	342.8	472.4	815.2	265.02	606.7	871.7	77.8	-134.3	-56.6
96.126	323.8	489.6	813.4	245.2	586.9	832.1	78.6	-97.3	-18.7
98.34	305.3	506.5	811.8	226.7	568.5	795.2	78.6	-62.0	16.6
102.77	269.6	539.2	808.8	193.1	534.8	727.9	76.5	4.4	80.9
107.2	235.5	570.6	806.2	163.7	505.5	669.2	71.8	65.2	137.0
111.62	203.0	600.9	803.9	137.7	479.4	617.1	65.3	121.4	186.8
116.05	171.8	630.1	801.8	114.6	456.3	570.9	57.2	173.7	230.9
120.48	141.8	658.2	800.0	93.9	435.3	529.2	47.9	222.9	270.8
126.38	116.1	620.9	737.0	69.8	411.4	481.2	46.3	209.6	255.8
129.34	102.6	604.5	707.1	58.9	400.4	459.3	43.7	204.1	247.8
132.29	88.9	589.2	678.1	48.8	390.5	439.3	40.1	198.7	238.8
135.24	74.8	574.9	649.7	39.3	380.8	420.1	35.5	194.1	229.7
138.19	60.5	561.5	622.0	30.5	372.8	403.3	30.0	188.7	218.8
141.14	45.9	548.9	594.8	22.1	363.4	385.5	23.8	185.5	209.3
144.1	30.8	537.1	567.9	14.3	356.6	370.9	16.5	180.5	197.1
147.05	15.6	526.0	541.6	6.9	347.4	354.3	8.7	178.6	187.3
150	0.0	516.4	516.4	0	341.4	341.4	0.0	175.0	175.0

Табела 35: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана за случај 60% аутофретаже цеви

Слика 17 приказује дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 60% аутофретаже цеви по теорији Сен – Венана.



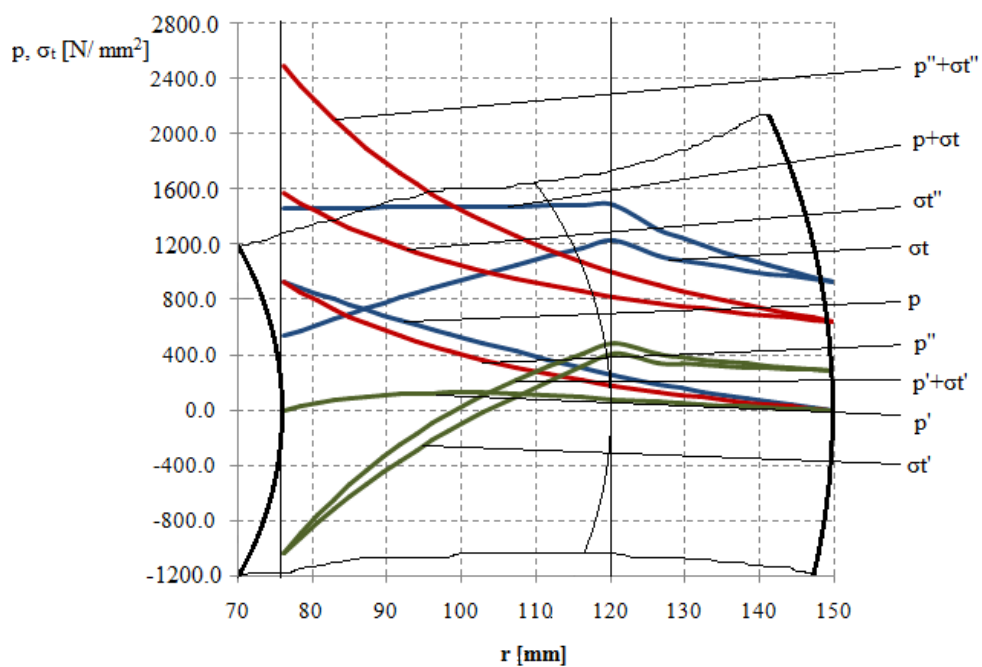
Слика 17: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 60% аутофретаже цеви по теорији Сен – Венана

Табела 36 садржи резултате прорачуна притиска и тангенцијалног напрезања по теорији ХМХ.

r	p	σ_t	$p+\sigma_t$	p''	σ_t''	$p''+\sigma_t''$	p'	σ_t'	$p'+\sigma_t'$
76.2	924.4	535.6	1460.0	924.3	1567.3	2491.6	0.0	-1031.7	-1031.7
78.414	882.6	578.7	1461.2	855.0	1498.0	2352.9	27.6	-919.3	-891.7
80.628	841.9	620.6	1462.5	791.2	1434.2	2225.5	50.7	-813.7	-763.0
82.842	802.4	661.3	1463.7	732.6	1375.6	2108.1	69.8	-714.2	-644.4
85.056	763.9	701.1	1464.9	678.4	1321.4	1999.8	85.5	-620.3	-534.8
87.27	726.3	739.8	1466.2	628.3	1271.3	1899.6	98.0	-531.5	-433.4
89.484	689.8	777.7	1467.4	581.9	1224.9	1806.8	107.9	-447.2	-339.4
91.698	654.1	814.6	1468.6	538.8	1181.8	1720.6	115.3	-367.2	-251.9
93.912	619.2	850.6	1469.9	498.7	1141.7	1640.4	120.5	-291.1	-170.5
96.126	585.2	885.9	1471.1	461.4	1104.4	1565.7	123.9	-218.5	-94.6
98.34	552.0	920.4	1472.4	426.5	1069.5	1496.0	125.5	-149.1	-23.6
102.77	487.6	987.2	1474.8	363.4	1006.4	1369.8	124.2	-19.2	105.0
107.2	426.0	1051.3	1477.3	308.0	951.0	1258.9	118.1	100.3	218.4
111.62	367.0	1112.7	1479.8	259.1	902.1	1161.2	107.9	210.6	318.6
116.05	310.2	1172.0	1482.2	215.6	858.6	1074.2	94.6	313.4	408.0
120.48	255.5	1229.2	1484.7	176.8	819.8	996.7	78.7	409.4	488.0
126.38	189.9	1118.9	1308.7	131.4	774.4	905.8	58.4	344.4	402.9
129.34	160.2	1089.2	1249.5	110.9	753.9	864.8	49.3	335.3	384.7
132.29	132.7	1061.7	1194.4	91.8	734.8	826.7	40.9	326.9	367.7
135.24	106.9	1035.9	1142.8	74.0	717.0	791.0	32.9	318.9	351.8
138.19	82.8	1011.8	1094.6	57.3	700.3	757.6	25.5	311.5	337.0
141.14	60.1	989.1	1049.3	41.6	684.6	726.3	18.5	304.5	323.0
144.1	38.8	967.8	1006.6	26.9	669.9	696.7	11.9	297.9	309.9
147.05	18.8	947.8	966.6	13.0	656.0	669.1	5.8	291.8	297.6
150	0.0	929.0	929.0	0.0	643.0	643.0	0.0	286.0	286.0

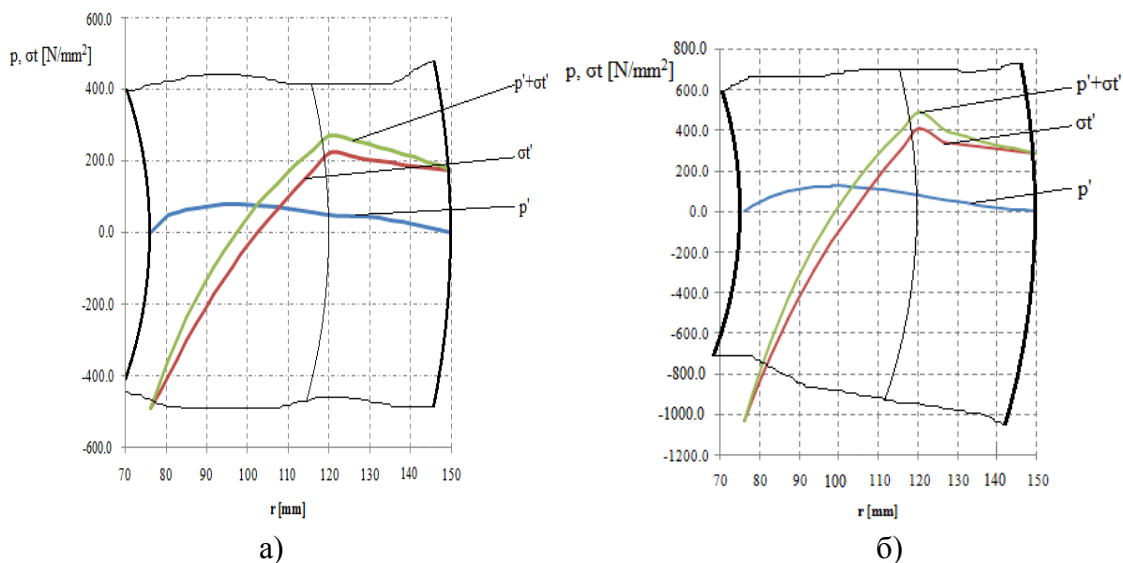
Табела 36: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији ХМХ за случај 60% аутофретаже цеви

Слика 18 приказује дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији ХМХ, за случај 60% аутофретаже цеви.



Слика 18: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 60% аутофретаже цеви по теорији ХМХ

Слика 19 представља графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана (слика 19а) и теорији ХМХ (слика 19б) за период цеви у стању мировања.



Слика 19: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 60% аутофретаже цеви
а) по теорији Сен – Венана
б) по теорији ХМХ

На претходном графику се може уочити да притисак и по једној и по другој теорији, за период цеви у стању мировања, расте од нуле, која се налази на унутрашњем радијусу, да би у одређеном слоју зида цеви почео да опада до нуле, која се налази на спољашњем радијусу цеви. Максимални притисак на дијаграму по теорији ХМХ је већи од максималног притиска по теорији Сен – Венана за 1.16 пута, што, у принципу, представља релативно блиске вредности прорачуна, које дају ове теорије.

Тангенцијално напрезање расте из негативног дела графика ка позитивном, све док не достигне радијус до ког се врши аутофретовање цеви (у овом случају радијус износи 120.48 mm), што је карактеристично за зону пластичних деформација, да би, у зони еластичних деформација, опало до одређене вредности.

Напрезање је, по теорији ХМХ, веће од напрезања по теорији Сен – Венана за око 2 пута.

$$\frac{p_{1gr}^{II}}{p_{1gr}^{IV}} = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}}{2a_{21}^2 + 1} > 1$$

И овде је такође:

$$p_{1gr}^{II} = 1.16 p_{1gr}^{IV}$$

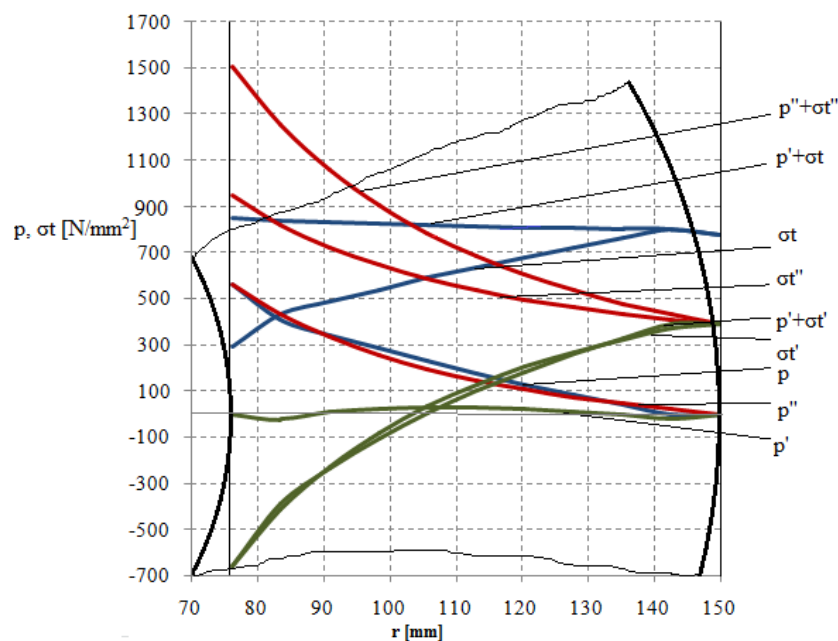
4.3. Резултати прорачуна за случај 100% аутофретаже цеви

Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана за случај 100% аутофретаже цеви, приказане су у табели 37.

r	p	σ_t	$p+\sigma_t$	p''	σ_t''	$p''+\sigma_t''$	p'	σ_t'	$p'+\sigma_t'$
76.2	559.2	293.0	852.2	559.2	948.2	1507.4	0	-655.2	-655.2
83.58	408.4	432.0	840.4	431.7	821.0	1252.7	-23.287	-389.0	-412.2
90.96	343.2	488.0	831.2	334.4	723.4	1057.8	8.82047	-235.5	-226.7
98.34	283.3	540.5	823.8	258.02	647.0	905.0	25.3265	-106.6	-81.2
105.72	228.0	589.9	817.8	197.1	586.1	783.2	30.8633	3.8	34.7
113.1	176.4	636.5	812.9	147.6	536.6	684.2	28.8254	99.9	128.7
120.48	128.2	680.6	808.8	106.9	496.0	602.9	21.3193	184.6	205.9
127.86	82.9	722.5	805.4	73.2	462.2	535.4	9.72956	260.3	270.0
135.24	40.2	762.3	802.5	44.8	433.8	478.6	-4.5848	328.5	323.9
142.62	-0.2	800.2	800.0	20.7	409.6	430.3	-20.907	390.5	369.6
150	0	776.5	776.5	0	389.0	389.0	0	387.5	387.5

Табела 37: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана за случај 100% аутофретаже цеви

Слика 19 представља графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже цеви по теорији Сен – Венана.



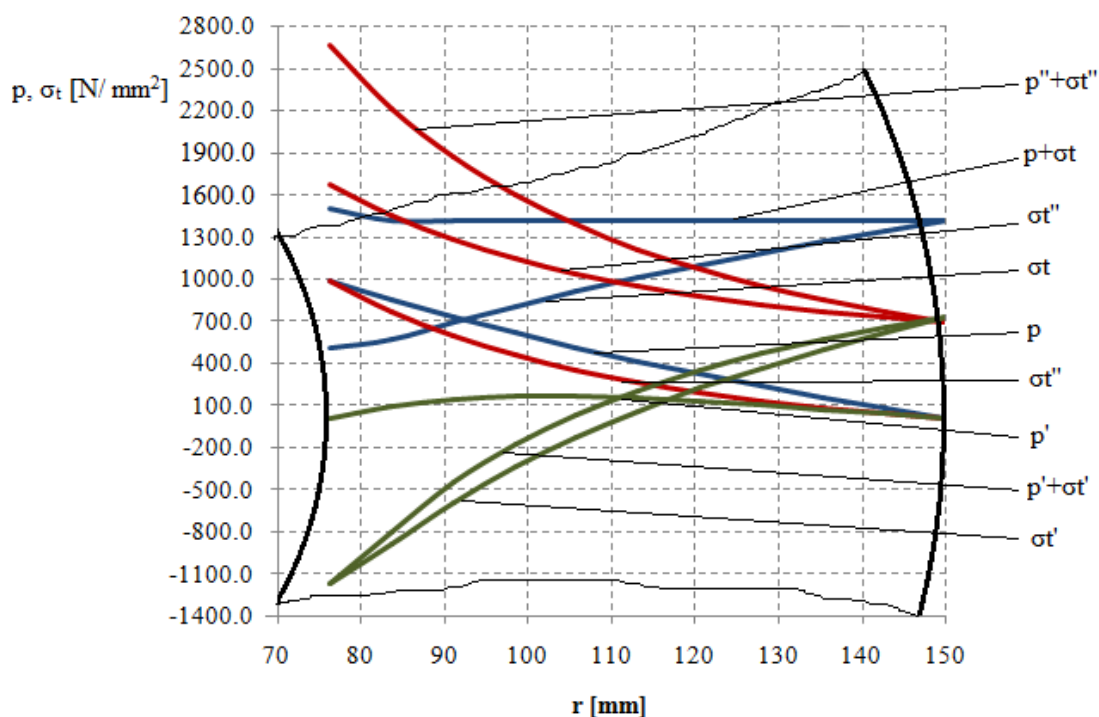
Слика 20: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже цеви по теорији Сен – Венана

Табела 38 садржи вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже цеви, по теорији ХМХ.

r	p	σ_t	$p+\sigma_t$	p''	σ_t''	$p''+\sigma_t''$	p'	σ_t'	$p'+\sigma_t'$
76.2	988.8	512.4	1501.2	988.7	1676.5	2665.2	0.0	-1164.2	-1164.2
83.58	853.9	563.6	1417.5	763.8	1451.6	2215.3	90.1	-887.9	-797.9
90.96	730.3	687.2	1417.5	591.3	1279.1	1870.4	139.0	-592.0	-453.0
98.34	616.4	801.1	1417.5	456.2	1144.0	1600.2	160.2	-343.0	-182.8
105.72	510.8	906.7	1417.5	348.4	1036.2	1384.6	162.4	-129.5	32.9
113.1	412.2	1005.2	1417.5	261.0	948.8	1209.8	151.2	56.4	207.7
120.48	320.0	1097.5	1417.5	189.2	877.0	1066.1	130.8	220.5	351.3
127.86	233.2	1184.3	1417.5	129.4	817.2	946.6	103.8	367.1	470.9
135.24	151.2	1266.2	1417.5	79.2	767.0	846.1	72.1	499.3	571.4
142.62	73.7	1343.8	1417.5	36.5	724.3	760.8	37.1	619.5	656.7
150	0.0	1417.5	1417.5	0.0	687.8	687.8	0.0	729.7	729.7

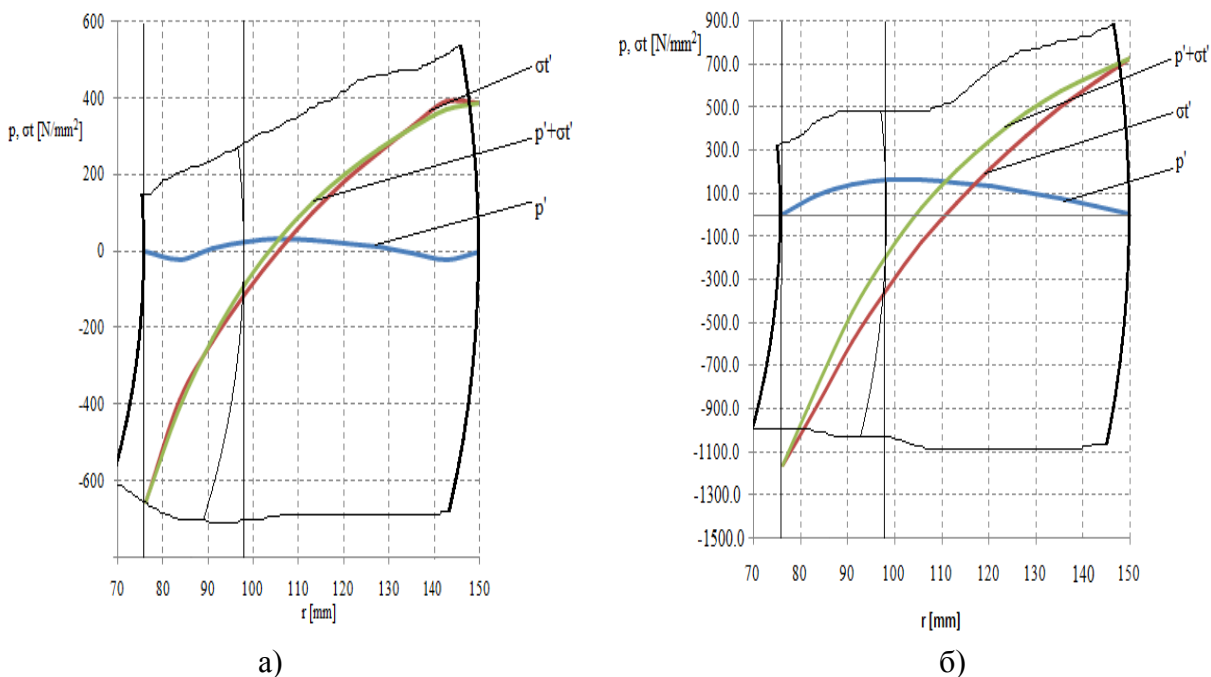
Табела 38: Вредности промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији ХМХ за случај 100% аутофретаже цеви

Слика 20 представља графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже цеви, по теорији ХМХ.



Слика 21: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже цеви по теорији ХМХ

Слика 22 представља графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања по теорији Сен – Венана (слика 22а) и теорији ХМХ (слика 22б) за период цеви у стању мировања.



Слика 22: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 100% аутофретаже
а) по теорији Сен – Венана
б) по теорији ХМХ

На слици 22а се може видети да притисак почиње од нуле да опада до неке вредности, да би потом почео да расте. Пораст притиска траје скоро до половине зида цеви, након чега поново почиње да опада до негативних вредности, али на крају поново расте до нуле.

Слика 22б показује другачије. Притисак расте од нуле, до одређеног слоја, да би потом опао до нуле.

Обе слике показују да тангенцијално напрезање све време расте, од негативне вредности, ка позитивној, али је, на основу прорачуна, добијено да је тангенцијално напрезање по другој теорији око 2 пута веће од вредности по првој теорији.

$$\frac{p_{1gr}^{II}}{p_{1gr}^{IV}} = \frac{3\sqrt{3a_{21}^4 + 1}}{2(2a_{21}^2 + 1)} > 1$$

$$p_{1gr}^{II} = 1.16 p_{1gr}^{IV}$$

5. Закључак

У овом раду обухваћено је више целина које омогућавају увид у начин продужетка животног века артиљеријске цеви. На самом почетку је дефинисана отпорност цеви, где је објашњено дејство притиска и напрезања на цев. Објашњено је понашање цеви током дејства како унутрашњег, тако и спољашњег притиска. С обзиром на то, да је неопходно повећати чврстоћу цеви, дефинисана су четири критеријума чврстоће, неопходна за прорачун отпорности цеви, као и степен сигурности, чија вредност варира, у зависности од пресека цеви, за који се рачуна. Постоји више начина ојачавања цеви, што је такође дефинисано.

Пошто је тема везана за поступак аутофретаже, дефинисан је и појам аутофретажа и начини њеног извођења.

Отпорност аутофретоване цеви је одређена на основу две теорије чврстоће: по теорији Сен – Венана и теорији ХМХ. Постављени су и математички модели ових теорија, након чега је одрађен и прорачун отпорности на основу њих.

На целој дужини цеви, дефинисана су три попречна пресека, за које се одређује отпорност, али је у раду представљен прорачун само за први попречни пресек. Такође, прорачун је извршен за три случаја: 30%, 60% и 100% аутофретаже цеви.

По теорији ХМХ, притисак аутофретаже $\bar{p}_1$ није било могуће одредити класичним прорачуном, тако да се приступило одређивању графичком методом у програмском пакету Матлаб. Даљи прорачун је углавном извршен табеларно у програму Excel, што је знатно убрзало време рада на прорачуну.

Резултати прорачуна притиска и тангенцијалног напрезања су приказани у табелама, које обухватају вредности промене истих за све случајеве аутофретаже и за све периоде: период дејства аутофретажног притиска и период када се цев налази у миру. Дати су и графички прикази промене притиска и тангенцијалног напрезања, у виду дијаграма.

На крају је извршена упоредна анализа добијених резултата по обе теорије, где се могло закључити да прорачуни по овим теоријама дају практично блиске резултате, уз мала одступања.

Оно што теорију Сен – Венана чини прикладнијом за прорачун, у односу на теорију ХМХ је то што је прорачун отпорности краћи и лакши.

Добра ствар је та, што су и једна и друга теорија доста примењене у свету, што обухватају целокупну анализу отпорности и што дају добре резултате.

Отпорност аутофретованих цеви представља тему која пружа могућности за још детаљније одређивање отпорности цеви. На пример, ради наставка рада на овој теми, може се узети у обзир анализа дејства радијалног напрезања у слојевима цеви.

Списак слика

Слика 1: Шема напрезања и деформација цеви.....	1
Слика 2: Дијаграм напрезања моноблок цеви	5
Слика 3: Полуеластични режим аутофретавања.....	12
Слика 4: Тотални режим аутофретавања.....	13
Слика 5: Процес механичког аутофретавања.....	14
Слика 6: Машина за механичко аутофретавање.....	15
Слика 7: Постројење за извођење механичког аутофретавања.....	15
Слика 8: Напрезање аутофретоване цеви у полуеластичном режиму.....	19
Слика 9: Напрезање аутофретоване цеви у еластичном режиму.....	19
Слика 10: Поступак добијања цеви из полуфабриката и њено ојачавање.....	20
Слика 11: Уздужни пресек цеви.....	24
Слика 12: Одређивање отпорности аутофретоване цеви у првом попречном пресеку....	40
Слика 13: Радни простор пакета Матлаб.....	57
Слика 14: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 30% аутофретаже по критеријуму Сен – Венана.....	59
Слика 15: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 30% аутофретаже по критеријуму ХМХ.....	60
Слика 16: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 30% аутофретаже за обе теорије.....	60
Слика 17: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 60% аутофретаже по критеријуму Сен – Венана.....	63
Слика 18: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 60% аутофретаже по критеријуму ХМХ.....	65
Слика 19: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 60% аутофретаже за обе теорије.....	65
Слика 20: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже по критеријуму Сен – Венана.....	66
Слика 21: Дијаграм промене притиска и тангенцијалног напрезања за случај 100% аутофретаже по критеријуму ХМХ.....	68
Слика 22: Графички приказ промене притиска и тангенцијалног напрезања за период цеви у стању мировања за случај 100% аутофретаже за обе теорије.....	69

Списак табела

Прорачун отпорности цеви према теорији Сен – Венана

Случај 30% аутофретаже цеви

Табела 1: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација.....	26
Табела 2: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација.....	26
Табела 3: Вредности промене т. напрезања у зони п.деформација.....	27
Табела 4: Вредности промене т. напрезања у зони ел. деформација.....	27
Табела 5: Вредности промене притиска у идеално еластичној цеви.....	29
Табела 6: Вредности промене т. напрезања у идеално еластичној цеви.....	30
Табела 7: Вредности промене притиска и т. напрезања цеви у стању мировања.....	31

Случај 60% аутофретаже цеви

Табела 8: Вредности промене притиска у пластичној и еластичној зони.....	33
Табела 9: Вредности промене т. напрезања у пластичној и еластичној зони.....	34
Табела 10: Вредности промене притиска и т. напрезања у идеално еластичној цеви.....	35
Табела 11: Вредности промене притиска и т. напрезања цеви у стању мировања.....	46

Случај 100% аутофретаже цеви

Табела 12: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација.....	37
Табела 13: Вредности промене т. напрезања у зони пластичних деформација.....	38
Табела 14: Вредности промене притиска и т. напрезања у идеално еластичној цеви.....	38
Табела 15: Вредности промене притиска и т. напрезања цеви у стању мировања.....	39

Прорачун отпорности цеви према теорији ХМХ

Табела 16: Вредности отпорности аутофретоване цеви.....	41
---	----

Случај 30% аутофретаже цеви

Табела 17: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација.....	42
Табела 18: Вредности промене т. напрезања у зони пластичних деформација.....	42
Табела 19: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација.....	43
Табела 20: Вредности промене т. напрезања у зони еластичних деформација.....	44
Табела 21: Вредности промене притиска и т. напрезања у идеално еластичној цеви.....	45
Табела 22: Вредности промене притиска и т. напрезања цеви у стању мировања.....	46

Случај 60% аутофретаже цеви

Табела 23: Вредности промене притиска у зони пластичних деформација.....	47
Табела 24: Вредности промене т. напрезања у зони пластичних деформација.....	48
Табела 25: Вредности промене притиска у зони еластичних деформација.....	49
Табела 26: Вредности промене т. напрезања у зони еластичних деформација.....	49
Табела 27: Вредности промене притиска и т.напрезања од унутрашњег, до спољашњег радијуса у идеално еластичној цеви.....	51
Табела 28: Вредности промене притиска и т. напрезања од унутрашњег, до спољашњег радијуса цеви у стању мировања.....	52

Случај 100% аутофретаже цеви

Табела 29: Вредности промене притиска од унутрашњег до спољашњег радијуса цеви.....	53
Табела 30: Вредности промене т. напрезања од унутрашњег, до спољашњег радијуса цеви.....	54
Табела 31: Вредности промене притиска и т. напрезања у идеално еластичној цеви.....	55
Табела 32: Вредности промене притиска и т. напрезања цеви у стању мировања.....	56

Графички и табеларни приказ добијених резултата по оба критеријума

Табела 33: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији Сен – Венана за случај 30% аутофретаже цеви.....	58
Табела 34: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији ХМХ за случај 30% аутофретаже цеви.....	60
Табела 35: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији Сен – Венана за случај 60% аутофретаже цеви.....	62
Табела 36: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији ХМХ за случај 60% аутофретаже цеви.....	64
Табела 37: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији Сен – Венана за случај 100% аутофретаже цеви.....	66
Табела 38: Вредности промене притиска и т. напрезања по теорији за случај 100% аутофретаже цеви.....	67

ПРИЛОГ

Програмско решење -

теорије Хубер – Мисес – Хенки за прорачун отпорности

Програмско решење за одређивање отпорности по теорији ХМХ

```
clc;
clear all;
close all;
r1=152.4/2;
r2=150;
a21=r2/r1;
a2r(1)=1;
pn(1)=0;
sigmae=800;
E1=21;
mi=1/3;
ka30=0.3;

for i=1:20
    pn(i+1)=pn(i)+0.05;
    a2r(i+1)=sqrt(abs(sqrt(1-
(3/4)*pn(i+1)^2)+pn(i+1)/2)*exp(sqrt(3)*asin(sqrt(3)*pn(i+1)/2))
);
end
p1n=interp1(a2r,pn,a21)

figure(1)
plot(pn,a2r)
grid on;
xlabel('p_1')
ylabel('a_{2r}')

p1gr4=p1n*sigmae

omega=0.03;
%nova granica elasticnosti materijala cevi
sigmas=sigmae+omega*E1

%pritisk autofretaze po teoriji najvecih deformacija
pla=sigmas*log(a21);

R30=r1+ka30*(r2-r1)

a2R30=r2/R30;

pla30=sigmas*log(a21/a2R30)+(sigmas/2)*((a2R30^2)-1)/(a2R30^2)
```

```

p030=(sigmas/2)*((a2R30^2)-1)/(a2R30^2)

korak=(R30-r1)/10;
pla30promena(1)=pla30;
sigmat(1)=sigmas/(1+omega)*(1+omega*(R30/(r1)))-pla30promena(1);
rr(1)=R30;
for kk=1:10
    rr(kk+1)=R30-kk*korak;
    pla30promena(kk+1)=sigmas*log((R30-
kk*korak)/r1)+(sigmas/2)*(1-(R30^2)/(r2^2));
    sigmat(kk+1)=sigmas/(1+omega)*(1+omega*(R30/(r1+kk*korak)))-
pla30promena(kk+1);
end
for i=1:11
    r(i)=rr(kk+2-i);
end

pla30promena;
sigmat;
sigmat+pla30promena;

% Lameove konstante
A=pla30promena(kk+1)*R30^2/(r2^2-R30^2);
B=A*r2^2;

korak2=(r2-R30)/10;

for i=kk+2:kk+10
    r(i)=R30+(i-10)*korak2;
    sigmat(i)=A+B/r(i)^2;
    pla30promena(i)=abs(A-B/r(i)^2);
end

% Nove Lameove konstante
A1=pla30*r1^2/(r2^2-r1^2);
B1=A1*r2^2;

for j=1:kk+10
    stsec(j)=A1+B1/r(j)^2;
    psec(j)=abs(A1-B1/(r(j)^2));

    pprim(j)=abs(pla30promena(j)-psec(j));

```

```

        stprim(j)=sigmat(j)-stsec(j);
end

```

```

TABELA(:,1)=r;
TABELA(:,2)=pla30promena;
TABELA(:,3)=sigmat;
TABELA(:,4)=pla30promena+sigmat;
TABELA(:,5)=psec;
TABELA(:,6)=stsec;
TABELA(:,7)=psec+stsec;
TABELA(:,8)=pprim;
TABELA(:,9)=stprim;
TABELA(:,10)=pprim+stprim;

```

```

figure(2)
plot(r,pla30promena,'-.b',r,sigmat,'-
.b',r,pla30promena+sigmat,'-.b',r,psec,'--r',r,stsec,'--
r',r,psec+stsec,'--r',r,pprim,'-k',r,stprim,'-
k',r,pprim+stprim,'-k','LineWidth',2)
grid on;
xlabel('r,mm')
ylabel('S_t, S_r, N/mm2')

dlmwrite('TABELA301.txt',TABELA,' ')

```

Литература

- [1] Зоран Ристић, Милисав Јаковљевић, Основи наоружања – артиљеријска оруђа, Војна академија, Београд, 2001.
- [2] Винко Павелић, Технологија производње наоружања, ЦВТШ КоБ ЈНА, Загреб, 1988.
- [3] Зоран Ристић, Збирка задатака из механике наоружања, Војна академија, Београд, 2004.
- [4] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612513000789>