



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI  
MAŠINSKI FAKULTET



**Mr Aleksandar Majstorović, dipl. inž. maš.**

**BEZBJEDNOST IZOLACIONIH APARATA  
PRI EKSPANZIJI KOMPRIMOVANOG  
MEDICINSKOG VAZDUHA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Banja Luka, 2022.



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI  
MAŠINSKI FAKULTET



**Mr Aleksandar Majstorović, dipl. inž. maš.**

**BEZBJEDNOST IZOLACIONIH APARATA  
PRI EKSPANZIJI KOMPRIMOVANOG  
MEDICINSKOG VAZDUHA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Banja Luka, 2022.



UNIVERSITY OF BANJA LUKA  
FACULTY OF MECHANICAL  
ENGINEERING



**Mr Aleksandar Majstorović, B. Sc. E. Mechanical**

**SAFETY OF BREATHING APPARATUS BY  
EXPANSION OF COMPRESSED MEDICAL  
AIR**

DOCTORAL DISERTATION

Banja Luka, 2022.

Република Српска  
УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ  
Сенат Универзитета



Број: 02/04-3.1466-65/17  
Дана, 25.05.2017. године

На основу члана 148. Закона о високом образовању („Службени гласник Републике Српске“, 73/10, 104/11, 84/12, 108/13, 44/15 и 90/16) и члана 33. Статута Универзитета у Бањој Луци, Сенат Универзитета на 11. сједници од 25.05.2017. године,  
д о н о с и

### О Д Л У К У

Даје се сагласност на Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације на Машинском факултету докторанта **мр Александра Мајсторовића** под насловом „Безбједност изолационих апарата при експанзији компримованог медицинског ваздуха“.

За ментора се именује др Младен Тодић, ванредни професор на Машинском факултету Универзитета у Бањој Луци, ужа научна област: Заштита на раду – технички аспект, Производно машинство.

### Образложење

Наставно-научно вијеће Машинског факултета у Бањој Луци доставило је Сенату Универзитету на сагласност Извјештај о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације докторанта мр Александра Мајсторовића под насловом „Безбједност изолационих апарата при експанзији компримованог медицинског ваздуха“.

Сенат Универзитета је оцијенио да је Извјештај у складу са условима утврђеним Законом о универзитету, због чега је одлучено као у диспозитиву ове Одлуке.

Достављено:

1. Именованом,
2. Машинском факултету 2х,
3. а/а.

ПРЕДСЈЕДАВАЈУЋИ СЕНАТА  
РЕКТОР

Проф. др Милан Матаруга

## INFORMACIJA O MENTORU I DISERTACIJI

### 1) **Mentor:**

Prof. dr Mladen Todić, dipl. inž. maš; Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet.

### 2) **Naslov doktorske disertacije:**

“Bezbjednost izoacionih aparata pri ekspanziji komprimovanog medicinskog vazduha”.

### 3) **Rezime:**

Tehničko-tehnološkim razvojem, kako u globalu, tako i u oblasti zaštite od požara (zaštita organa za disanje, lica i očiju), postavljeni su novi uslovi proizvođačima zaštitne opreme, koji se odnose na unapređenje karakteristika konvencionalnih materijala, kao i uvođenje savremenih kompozitnih materijala u upotrebu uz naročit osvrt na primjenu informacionih rehnologija.

Izolacioni aparati kao oprema namijenjena za zaštitu organa za disanje, lica i očiju predstavljaju specifične tehničke sisteme. Ovi tehnički sistemi, sastoje se od sistema visokog (nazivnog pritiska 200 ili 300 bar), srednjeg (5,5-8 bar u zavisnosti od proizvođača) i normalnog pritiska uz opcione ili integrisane elektronske sisteme za monitoring korisnika. Kao i svaki drugi tehnički sistem, a u svrhu zaštite korisnika, podložni su obaveznim (periodičnim i redovnim) pregledima.

Osnovni cilj disertacije je da se analitičkim i eksperimentalnim putem dođe do parametara koji bitno utiču na bezbjednost korisnika u akcidentnim situacijama, naročito pri uspostavljanju modela ponašanja izlaznih veličina pri ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha iz „banki vazduha“ u čelične i polukompozitne boce izolacionih aparata. Poseban problem nastaje pri uspostavljanju veze između boca „banke vazduha“ koji je pod pritiskom 300 bar i boce izolacionog aparata u kome je pritisak ispod 20 bar. Vrijeme izjednačavanja pritiska je bitan parametar radi bezbjednosti prisutnih u trenutku punjenja boce izolacionog aparata tj. ograničavanja brzine protoka fluida. Punjenje boca izolacionih aparata na „banki vazduha“ vrši se iz razloga da se skрати vrijeme odsustva vatrogasca iz zone gašenja požara. Vrijeme brzog

punjenja (ekspanzija iz akumulatora nazivnog pritiska 30 Mpa – „banka vazduha“) boca je oko jedan minut, dok se punjenje boca kompresorom visokog pritiska kreće u vremenskom interalu oko 15 minuta.

Metodom mjernih traka (tenzometrijskih traka), koja je inače i najčešće korištena konvencionalna metoda, vršena su mjerenja uzdužnih, tangencijalnih i rezultujućih napona na čeličnoj i polukompozitnoj boci izolacionih aparata, dok je metodom konačnih elemenata izrađen 3D model posude pod pritiskom i vršen proračun za dobijanje kompletnih polja napona i deformacija na čeličnoj boci. Ispitivanja napona na čeličnoj i polukompozitnoj boci vršena su hladnom vodenom probom i toplom probom na „banka vazduha“.

**4) Ključne riječi:**

Izolacioni aparati, tehnički sistemi, posude pod pritiskom, „banke vazduha“, metoda konačnih elemenata, naponi, deformacije.

**5) Naučna oblast:**

Tehničke nauke – mašinstvo

**6) Naučno polje:**

Industrijsko inženjerstvo

**7) Klasifikaciona oznaka:**

T 210

**8) Tip odabrane licence Kreativne zajednice:**

Autorstvo

**9) UDK broj:**

614.894:621(043.3)

## INFORMATION ABOUT MENTOR AND DISSERTATION

### 1) **Mentor:**

Prof. dr Mladen Todić, B. Sc. E. Mechanical; University of Banja Luka, Mechanical faculty.

### 2) **Title of doctoral dissertation:**

“Safety of Breathing Apparatus by Expansion of Compressed Medical Air”.

### 3) **Summary:**

Technical and technological development, both globally and in the field of fire protection (protection of respiratory organs, face and eyes), has set new conditions for manufacturers of protective equipment, which relate to improving the characteristics of conventional materials and the introduction of modern composite materials in use with special reference to the application of information technology.

Breathing apparatus as equipment intended for the protection of the respiratory organs, face and eyes are specific technical systems. These technical systems consist of high pressure (nominal pressure 200 or 300 bar), medium (5,5-8 bar depending on the manufacturer) and normal pressure with optional or integrated electronic user monitoring systems. Like any other technical system, and for the purpose of user protection, they are subject to mandatory (periodic and regular) inspections.

The main goal of the dissertation is to analytically and experimentally arrive at parameters that significantly affect the safety of users in accident situations, especially when establishing a model of behavior of output quantities in the expansion of compressed medical air from "air banks" in steel and semi-composite bottles of breathing apparatus. A special problem arises when establishing a connection between the bottles of the "air bank" which is under a pressure of 300 bar and the bottle of the breathing apparatus in which the pressure is below 20 bar. The pressure equalization time is an important parameter for the safety of those present at the time of filling the bottle of the insulating apparatus, ie. fluid flow rate limitation. Filling bottles of breathing apparatus at the "air bank" is done for the reason of shortening the time of absence of firefighters from the firefighting zone. The time of fast filling (expansion from the accumulator with a nominal pressure of 30 MPa - "air bank") of the bottle is

about one minute, while filling the bottle with a high pressure compressor starts in a time interval of about 15 minutes.

The method of measuring tapes (tensometric tapes), which is the most commonly used conventional method, was used to measure longitudinal, tangential and resulting stresses on steel and semi-composite bottles of breathing apparatus, while the finite element method was used to make a 3D model of pressure vessel, complete stress and strain fields on the steel cylinder. Stress tests on steel and semi-composite cylinders were performed by cold water test and hot test at the "air bank".

**4) Key words:**

Breathing apparatus, technical systems, pressure vessels, „air banks“, finite element method, stress, strain.

**5) Scientific field:**

Technical sciences – Mechanical engineering

**6) Narrow scientific field:**

Industrial engineering

**7) Classification mark:**

T 210

**8) Typ of selected Creative Commons:**

Authorship

**9) UDK number:**

614.894:621(043.3)



## PREDGOVOR

*Istraživanja u ovoj disertaciji, rezultat su mog višegodišnjeg rada u oblasti zaštite od požara i zaštite na radu sa posebnim osvrtom na zaštitu organa za disanje-izolacionim aparatima.*

*Ovom prilikom, najiskrenije se zahvaljujem prof. dr Todić Mladenu, koji je imao veliko povjerenje u moj rad, na savjetima i smjernicama oko izrade numeričkog modela i motivaciji da disertaciju realizujem u potpunosti.*

*Zahvaljujem se i ostalim članovima Komisije za odbranu, koji su mi pomogli da konačna verzija mog rada bude što kvalitetnija.*

*Naročito bih se zahvalio Vatrogasnom savezu Republike Srpske na ukazanoj finansijskoj pomoći prilikom nabavke mjernih traka za eksperimentalni dio istraživanja.*

*Zahvalnost dugujem svojim roditeljima (naročito majci, koja nažalost nije doživjela radost ovog uspješnog ostvarenja) i sestri što su me naučili da se samo časnim i požrtvovanim radom dolazi do velikih rezultata.*

*Kćerkama Aleksandri i Ivani, sinu Marku i supruzi Višnji zahvaljujem na ljubavi, strpljenju i ukazanoj podršci u toku izrade disertacije.*

## SADRŽAJ

INDEKS SKRAĆENICA I OZNAKA .....	I
SPISAK SLIKA .....	IV
SPISAK DIJAGRAMA .....	VII
SPISAK TABELA .....	IX
<b>1. UVODNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Problem i cilj istraživanja .....	5
2.2 Problem istraživanja i hipoteze .....	6
<b>3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>9</b>
3.1 Ocjena dosadašnjih istraživanja .....	9
3.2 Očekivani rezultati istraživanja .....	10
<b>4. TEORIJSKA RAZMATRANJA .....</b>	<b>11</b>
4.1 Značaj i upotreba izolacionih aparata .....	11
4.2 Sastav vazduha .....	11
4.3 Sastav produkata nekontrolisanog sagorijevanja .....	12
4.4 Standardi za komprimovani medicinski vazduh .....	13
<b>5. SREDSTVA ZA ZAŠTITU ORGANA ZA DISANJE, LICA I OČIJU .....</b>	<b>15</b>
<b>6. ZAŠTITNA SREDSTVA NA BAZI IZOLACIJE-IZOLACIONI APARATI ....</b>	<b>17</b>
6.1 Izolacioni aparati sa komprimovanim kiseonikom-regeneracioni aparati, (aparati zatvorenog sistema) Dräger i Meco .....	17
6.2 Regeneracioni izolacioni aparat sa komprimovanim kiseonikom Dräger PSS BG4 plus .....	20

6.3 Regeneracioni izolacioni aparat sa kiseonikom dobijenim hemijskom reakcijom, MSA Air Elite 4 h .....	22
6.4 Izolacioni aparati na komprimovani vazduh (aparati otvorenog sistema) ....	24
<b>7. VRSTE BOCA ZA IZOLACIONE APARATE .....</b>	<b>31</b>
7.1 Vrste boca za SCBA aparate .....	31
7.1.1 Čelične boce .....	31
7.1.2 Polukompozitne i kompozitne boce .....	32
7.1.3 Potrošnja vazduha u bocama za SCBA aparate .....	38
7.2 Vrste boca za SCUBA aparate .....	38
7.2.1 Potrošnja vazduha u bocama za SCBA aparate .....	40
<b>8. ODRŽAVANJE, KONTROLA I PODEŠAVANJE SCBA I SCUBA APARATA .....</b>	<b>43</b>
8.1 Rokovi za održavanje i kontrolu .....	43
8.2 Pregled i kontrola autonomne ronilačke opreme na komprimovani medicinski vazduh .....	47
8.2.1 Pregled u pripreмноj fazi za ronjenje .....	47
8.2.2 Godišnji pregled .....	48
8.2.3 Vanredni pregled .....	49
<b>9. KOMPRESORI VISOKOG PRITISKA .....</b>	<b>50</b>
<b>10. POSUDE POD PRITISKOM .....</b>	<b>54</b>
10.1 Pokretne posude pod pritiskom .....	58
10.2 Rezervoari komprimovanog medicinskog vazduha „banke vazduha“ .....	61
<b>11. ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE POSUDE POD PRITISKOM .....</b>	<b>65</b>
11.1 Materijal za izradu čelične boce .....	66
11.2 Osnovni model .....	67
<b>12. METOD KONAČNIH ELEMENATA .....</b>	<b>69</b>
12.1 Definisavanje geometrije modela .....	72
12.2 Osobine materijala .....	73
12.3 Opterećenja .....	74

12.4	Oslonci-granični uslovi .....	75
12.5	Rezultati numeričke analize .....	75
12.6	Linearna analiza .....	77
12.6.1	Rezultati numeričkih proračuna za mjerna mjesta 1, 2 i 3 .....	77
13.	<b>EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>80</b>
13.1	Ispitivanja materijala čelične boce na kidalici za ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala – nelinearna analiza .....	80
13.2	Mjerni uređaji pri eksperimentalnim istraživanjima .....	84
13.2.1	Volcraft DT 8820 .....	84
13.2.2	Termovizijska kamera FLIR K65 i njihova primjena u vatrogasnim jedinicama .....	85
13.2.3	Quantum X sistem za akviziciju podataka .....	86
13.2.4	Mjerne trake .....	87
13.2.5	Davač i transmiter pritiska HBM 1-P3IC/3000 bar .....	88
13.2.6	Hidraulična manuelna testna pumpa visokog pritiska CPP 700-H ...	88
13.2.7	Mehanička kidalica Messphysik Beta 200 .....	89
13.2.8	Plan eksperimentalnih istraživanja .....	89
13.3	Distribucija toplote pri kompresorskom punjenju boca izolacionih Aparata i ekspanziji komprimovanog medicinskog vazduha .....	90
13.4.1	Kompresija medicinskog vazduha u sistem sa bocama „banka vazduha” .....	90
13.4.2	Izbor boca za eksperimentalno istraživanje .....	91
13.4.3	Kompresija medicinskog vazduha u boce .....	92
13.5	Distribucija napona kod boca izolacionih aparata pri normalnim i brzim ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha .....	97
13.5.1	Kompresija medicinskog vazduha u boce .....	98
13.6	Ispitivanje hemijskog sastava materijala čelične boce .....	102
13.7	Detekcije dilatacija na površini boca sa vodom pod pritiskom .....	103

13.8.1	Eksperimentalna instalacija i postupak ispitivanja .....	103
13.8	Ispitivanja boca SCBA aparata na „banki vazduha“ .....	106
<b>14.</b>	<b>REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA DILATACIJA</b>	
	<b>NA VANJSKOJ POVRŠINI BOCA .....</b>	<b>108</b>
14.1	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja vodom za čeličnu bocu .....	108
14.1.1	Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	108
14.1.2	Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	109
14.1.3	Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	110
14.1.4	Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	111
14.1.5	Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	112
14.1.6	Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	113
14.2	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja vodom za polukompozitnu bocu ..	114
14.2.1	Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	114
14.2.2	Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	115
14.2.3	Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar .....	116
14.2.4	Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	117
14.2.5	Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	118

14.2.6 Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar .....	119
14.3 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja na „banki vazduha“ za čeličnu bocu .....	120
14.3.1 Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 240 i 220 bar .....	120
14.3.2 Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 i 185 bar .....	121
14.3.3 Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 250 i 240 bar .....	122
14.4 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja na „banki vazduha“ za polukompozitnu bocu .....	123
14.4.1 Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 250 i 240 bar .....	123
14.4.2 Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 210 i 180 bar .....	124
14.4.3 Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 255 i 230 bar .....	125
14.5 Mjerenje temperature na mjernim mjestima čelične i polukompozitne boce .....	125
14.6 Saniranje oštećenja na polukompozitnoj boci .....	127
15. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽVANJA .....	130
15.1 Analiza izolacionih aparata zatvorenog i otvorenog sistema .....	130
15.2 Diskusija numeričkih rezultata .....	132
15.2.1 Faktori koncentracije napona .....	132
15.3 Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja .....	133
15.4 Diskusija eksperimentalnih rezultata .....	135

15.4.1 Analiza rezultata za ispitivanja vodom čelične i polukompozitne boce .....	135
15.4.2 Analiza rezultata za ispitivanja na „banki vazduha“ čelične i polukompozitne boce .....	137
15.4.3 Diskusija osnovnih naučnih ciljeva disertacije .....	142
15.4.4 Pravci daljih istraživanja .....	142
16. ZAKLJUČAK .....	144
17. LITERATURA .....	146
PRILOZI .....	153
BIOGRAFIJA .....	160
IZJAVE .....	161

## INDEKS SKRAĆENICA I OZNAKA

KMV	Komprimovani medicinski vazduh;
SCBA	Self contained breathing apparatus – aparati za samostalno disanje sa sopstvenim rezervoarima za vazduh (bez vanjskog napajanja; npr. dovođenje vazduha pomoću cijevnog sistema);
SCUBA	Self contained underwater breathing apparatus – aparati za samostalno disanje pod vodom sa sopstvenim rezervoarima vazduha (ronioci);
CBRN	(Recognition for use in nuclear, biological and chemical conditions) – priznanje za upotrebu u radiološko, biološkim i hemijskim uslovima;
IA	Izolacioni aparat;
<i>aq</i>	Rastvorena materija;
<i>l</i>	Tečna materija;
<i>s</i>	Čvrsta materija u obliku taloga;
<i>g</i>	Gasovita materija;
<i>p</i>	Pritisak vazduha u boci (200 ili 300 bara, odnosno 200 000 000 ili 300 000 000 Pa);
<i>V</i>	Zapremina boce (u litrama);
<i>MP</i>	Minutna potrošnja;
<i>P<sub>ATA</sub></i>	Apsolutni pritisak;
<i>20</i>	Potrošnja vazduha pri apsolutnom pritisku od 1 bar;
<i>T</i>	Vrijeme;
<i>V</i>	Količina vazduha u boci;



V	Visual inspection (renew if necessary*) – vizuelni pregled (po potrebi zamijeniti*);
C	Cleaning – čišćenje;
D	Cleaning and disinfection – čišćenje i dezinfekcija;
S	Short user test – kratki korisnički test;
F	Full inspection and performance test – potpuni pregled i test performansi;
R	Renew – zamjena;
$D$	Prečnik cilindričnog omotača;
$d$	Prečnik priključka;
$e_{ac}$	Debljina zida cilindričnog omotača;
$e_{ap}$	Debljina zida priključka;
$\nu$	Poasonov koeficijent;
$E$	Modul elastičnosti;
$l$	Dužina priključka;
$P$	Vrsta opterećenja-pritisak;
$e$	Potrebna debljina zida;
$D_e$	Vanjski prečnik;
$f$	Nominalni proračunski napon, MPa;
MM1	Mjerno mjesto 1 (donji cilindrični dio boce);
MM2	Mjerno mjesto 2 (cilindrični dio na sredini boce);
MM3	Mjerno mjesto 3 (gornji cilindrični dio boce);
$D_m$	Prečnik posude pod pritiskom, mm;
$e_a$	Debljina zida cilindričnog omotača, mm;

$R_{p1,0/T}$	Tečenje materijala;
$R_{m/T}$	Kidanje materijala;
3D	Trodimenzionalan;
G	Modul smicanja;
$l_0$	Dužina epruvete prije ispitivanja na kidalici,
$l$	Dužina epruvete nakon ispitivanja na kidalici,
$\Psi$	Kontrakcija presjeka,
$a_0$	Debljina epruvete prije ispitivanja na kidalici,
$a_1$	Debljina epruvete poslije ispitivanja na kidalici,
VPP	Ispitivanje vodom pod pritiskom;
$\alpha_k$	Faktor koncentracije napona;
$\sigma_{max}$	Maksimalni napon na odabranom mjestu;
$\sigma_n$	Nominalni napon na mjestu pravilne geometrije;

## SPISAK SLIKA

- Slika 1. Tipovi maski.
- Slika 2. Kombinovani filter u presjeku.
- Slika 3. Prvi regeneracioni izolacioni aparat na komprimovani kiseonik.
- Slika 4. Regeneracioni izolacioni aparat Dräger nakon izmjena.
- Slika 5. Šematski prikaz regeneracionog izolacionog aparata Dräger.
- Slika 6. Regeneracioni izolacioni aparat sa komprimovanim kiseonikom DRÄGER PSS BG4 plus.
- Slika 7. Maska Dräger FPS 7000 RP sa integrisanim brisačem.
- Slika 8. Regeneracioni izolacioni aparat sa KO<sub>2</sub> principom MSA Air Elite 4h.
- Slika 9. Tok vazduha kroz izolacioni aparat MSA Air Elite 4h.
- Slika 10. Tipovi maski za izolacioni aparat MSA Air Elite 4h.
- Slika 11. Izolacioni aparat Interspiro140/QS Spiromatic S.
- Slika 12. Izolacioni aparat MSA Air Maxx nosač aparata bez boce i maske sa jednocijevnim sistemom (u crijevu visokog pritiska nalazi se crijevo srednjeg pritiska).
- Slika 13. Tok vazduha u izolacionim aparatima.
- Slika 14. Maska za izolacioni aparat Interspiro QS.
- Slika 15. Presjek plućnog automata Auto MaXX proizvođača MSA s grafičkim prikazom funkcionisanja.
- Slika 16. Alpha single line proizvođača MSA. Crijevo srednjeg pritiska nalazi se u crijevu visokog pritiska.
- Slika 17. Presjek: a) regulator pritiska; b) akustični uređaj.
- Slika 18. Sistem visokog i srednjeg pritiska.
- Slika 19. Čelična boca s ventilom i gumenom oblogom.
- Slika 20. Izrada čelične boce hladnim izvlačenjem.
- Slika 21. Izrada čelične boce rotacionim vrućim valjanjem.
- Slika 22. Hoop-wrapped kompozitna boca u presjeku.
- Slika 23. Kompozitna boca u presjeku.
- Slika 24. Izrada aluminijumske osnove hladnim izvlačenjem.
- Slika 25. Izrada aluminijumske osnove rotacionim vrućim valjanjem.
- Slika 26. Namotavanje karbonskih i staklenih vlakana na aluminijumsku osnovu.
- Slika 27. Polukompozitna boca proizvođača MSA Auer.
- Slika 28. Čelične boce zapremine 18 i 15 l.
- Slika 29. INT ventil sa oznakama na boci.
- Slika 30. Četvorocilindrični-četvorostepeni kompresor.
- Slika 31. Predfilter.
- Slika 32. Mikronski usisni filter.
- Slika 33. Međustepeni filter.
- Slika 34. Finalni separator ulja i vode.
- Slika 35. DUPLEX filter sistem.
- Slika 36. TRIPLEX filter sistem P 21.
- Slika 37. Nepovratni ventil.
- Slika 38. Sigurnosni ventil.
- Slika 39. Ventili za punjenje „na kipu“, sa po dva ventila 200 bar (crni) i 300 bar (crveni).

Slika 40. Eksplozija čelične boce IA prilikom punjenja na kompresoru.

Slika 41. Posljedica eksplozije čelične boce IA.

Slika 42. „Banka vazduha“ fiksirana za zid.

Slika 43. „Banka vazduha“ sa dvije baterije po dvije boce, fiksirana za pod.

Slika 44. Kompresor visokog pritiska većeg kapaciteta.

Slika 45. „Banka vazduha“ u vatrogasnom vozilu za gašenje požara u tunelima.

Slika 46. Aproksimacija kontinuuma primjenom metode konačnih elemenata.

Slika 47. Solid elementi za modeliranje trodimenzionalnih struktura.

Slika 48. 3D model posude sa mrežom konačnih elemenata.

Slika 49. Pravac opterećenja unutrašnjim pritiskom.

Slika 50. Model posude korišten u simulacij za opterećenje unutrašnjim pritiskom 30 MPa.

Slika 51. Vrijednosti Mizesovih deformacija za mjerna mjesta 1, 2 i 3, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 30 MPa.

Slika 52. Kidalica Messphysik Beta 200.

Slika 53. Epruveta za određivanje mehaničkih karakteristika materijala.

Slika 54. Izrađene epruvete neposredno prije ispitivanja.

Slika 55. Epruvete nakon ispitivanja na kidalici.

Slika 56. Voltcraft sa internim i eksternim senzorima.

Slika 57. Termovizijska kamera FLIR K65.

Slika 58. Uređaj QuantumMX440A.

Slika 59. Interfejs softvera Catman Easy za akviziciju i analizu.

Slika 60. Dvostruka mjerna traka XYxx.

Slika 61. Davač i transmiter pritiska HBM 1-P3IC/3000 bar s adapterom.

Slika 62. Hidraulična manuelna testna pumpa visokog pritiska CPP 1000-H.

Slika 63. Mehanička kidalica Messphysik Beta 200.

Slika 64. Termovizijska slika-praćenje temperature prilikom punjenja „banke vazduha“.

Slika 65. Termovizijska slika-polukompozitna boca sa gumenim oblogama na početku i (b) na kraju punjenja; 6.8 l; 300 bar.

Slika 66. Termovizijska slika-polukompozitna boca bez gumenih obloga (a) na početku i na kraju punjenja; 6.8 l; 300 bar.

Slika 67. Termovizijska slika-čelične boce na početku punjenja za SCBA 6 l; 300 bar (a) i SCUBA 12 l; 200 bar aparate (b).

Slika 68. Termovizijska slika-temperatura i kolorizacija polukompozitne boce prije ispuštanja KMV.

Slika 69. Termovizijska slika-temperatura i kolorizacija polukompozitne boce, 13 min. nakon ispuštanja KMV.

Slika 70. Termovizijska slika-temperatura na kompresoru prilikom punjenja.

Slika 71. Termovizijska slika-čelična boca na početku punjenja za SCBA aparate 6 l; 300 bar.

Slika 72. Presjek čelične boce.

Slika 73. Naponi na boci izolacionog aparata.

Slika 74. Termovizijska slika-temperatura čelične boce proizvođača Luxfer u toku punjenja na konzoli "banke vazduha".

Slika 75. Termovizijska slika-temperatura polukompozitne boce proizvođača Luxfer u toku punjenja na konzoli "banke vazduha".

Slika 76. Termovizijska slika-punjenje čelične SCBA boce na kompresoru.

Slika 77. Termovizijska slika-punjenje čelične SCUBA boce na kompresoru.

Slika 78. Termovizijska slika-temperatura polukompozitne boce proizvođača SCI neposredno pred kraj punjenja na kompresoru visokog pritiska.

Slika 79. Isječak čelične boce nakon laboratorijskog ispitivanja.

Slika 80. Čelična boca prije lijepljenja mjernih traka.

Slika 81. Čelična boca sa zalijepljenim mjernim trakama.

Slika 82. Polukompozitna boca sa zalijepljenim mjernim trakama.

Slika 83. Oprema za eksperimentalnu analizu hladnom vodenom probom.

Slika 84. Čelična boca na konzoli „banke vazduha“.

Slika 85. Polukompozitna boca na konzoli „banke vazduha“.

Slika 86. Oštećenja na polukompozitnoj boci.

Slika 87. Sanirano oštećenje na polukompozitnoj boci-rez.

Slika 88. Sanirano oštećenje na polukompozitnoj boci prouzrokovano udarcem. Ostala vidljiva oštećenja na boci su površinska oštećenja boje.

## SPISAK DIJAGRAMA

- Dijagram 1. Sastav vazduha.
- Dijagram 2. Uzdužni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.
- Dijagram 3. Tangencijalni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.
- Dijagram 4. Radijalni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.
- Dijagram 5. Efektivni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.
- Dijagram 6.  $\sigma - \varepsilon$  za materijal 30CrNiMo8, epruveta I.
- Dijagram 7.  $\sigma - \varepsilon$  za materijal 30CrNiMo8, epruveta II.
- Dijagram 8. Grafički prikaz promjena temperature u funkciji promjene pritiska u boci.
- Dijagram 9. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 10. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 11. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 12. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 13. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 14. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 15. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 16. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 17. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 18. Čelična boca – tangencijalne deformacije ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 19. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 20. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 21. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 22. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 23. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 24. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 25. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 26. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 27. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 28. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 29. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 30. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 31. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 32. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.
- Dijagram 33. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.
- Dijagram 34. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 220 bar.
- Dijagram 35. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 200 bar.
- Dijagram 36. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 185 bar.
- Dijagram 37. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar.
- Dijagram 38. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.
- Dijagram 39. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar.
- Dijagram 40. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.

Dijagram 41. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 210 bar.

Dijagram 42. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 180 bar.

Dijagram 43. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 255 bar.

Dijagram 44. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 230 bar.

Dijagram 45. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM3.

Dijagram 46. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar za MM3.

Dijagram 47. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM1.

Dijagram 48. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar za MM1.

Dijagram 49. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM2.

Dijagram 50. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar za MM2.

## ŠEME

Šema 1. Međusobna povezanost Alpha Personal Network (lična veza).

## SPISAK TABELA

Tabela 1. Sastav medicinskog vazduha.

Tabela 2. Filteri za respiratornu zaštitu (oznake bojom).

Tabela 3. Tehničke karakteristike polukompozitnih i kompozitnih boca MSA Auer.

Tabela 4. Podaci na polukompozitnim i kompozitnim bocama proizvođača MSA.

Tabela 5. Potrošnja vazduha u boci.

Tabela 6. Potrošnja vazduha iz dvije boce.

Tabela 7. Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja po preporuci proizvođača Interspiro.

Tabela 8. Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja po preporuci proizvođača MSA Auer.

Tabela 9. Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja prema normama: vfdb 0804 i BGR 190.

Tabela 10. Označavanje boca bojom u zavisnosti od vrste gasa kojim su ispunjene.

Tabela 11. Karakteristike materijala posude pod pritiskom.

Tabela 12. Plan eksperimentalnih istraživanja deformacija na čeličnoj i polukompozitnoj boci.

Tabela 13. Punjenje „banke vazduha“.

Tabela 14. Polukompozitna boca sa gumenim oblogama 6.8 l; 300 bar (int. br. XV).

Tabela 15. Polukompozitna boca bez gumenih obloga 6,8 l; 300 bar (int. br. 16).

Tabela 16. Čelična boca za SCBA aparate 6 l; 300 bar (int. br. 16).

Tabela 17. Čelična boca za SCUBA aparate 12 l; 200 bar.

Tabela 18. Ispuštanje komprimovanog medicinskog vazduha iz polukompozitne boce bez gumenih obloga 6.8 l; 300 bar (int. br. 16),

Tabela 19. Rezultati laboratorijske analize hemijskog sastava materijala čelične boce.

Tabela 20. Tehnički podaci za čeličnu i polukompozitne boce (izmjerene vrijednosti).

Tabela 21. Rezultujuće deformacije.

Tabela 22. Tangencijalne deformacije.

Tabela 23. Uzdužne deformacije.

Tabela 24. Uzdužne deformacije.



## 1. UVODNA RAZMATRANJA

Rezimirajući pregled stanja u području istraživanja pouzdanosti tehničkih sistema danas u svijetu, dolazi se do zaključka da i pored brojnih inicijativa i većih zahtjeva, ovoj problematici nije poklonjeno dovoljno pažnje. Osnovu za kompleksne istraživačke zahtjeve treba da predstavlja teorija pouzdanosti, odnosno metode koje ona koristi. Ciljeve istraživanja u okviru ove doktorske disertacije, realizovaće se kroz korištenje metoda za identifikaciju i sistematizaciju, kao i metode analize otkaza vitalnih (najkritičnijih) dijelova razmatranog tehničkog sistema u određenom vremenskom periodu i planiranim režimima rada (stacionarnim i mobilnim).

Postavljene hipoteze daju mogućnosti za definisanje postupka tehničke dijagnostike razmatranog tehničkog sistema, koje obezbjeđuju maksimalnu efikasnost njegovog radnog procesa.

U posljednje dvije decenije, razvoj tehnologija u velikoj mjeri odrazio se i u oblasti zaštite od požara, kako u cjelini, tako i u oblasti zaštite organa za disanje, lica i očiju, odnosno na izolacionim aparatima.

Prilikom izrade izolacionih aparata, koriste se savremeni materijali koji moraju ispunjavati specifične uslove poput: otpornosti na kidanje, cijepanje, koroziju, toplotu, lomove i što je najvažnije, otpornost na plamen, produkte sagorijevanja, vodu, hemijske, kao i druge opasne i štetne materije sa kojima krajnji korisnici prilikom obavljanja posla mogu doći u dodir.

Najveće promjene uočavaju se u vrsti materijala od kojih se izrađuju vitalni dijelovi izolacionih aparata. Uvode se nove vrste materijala-kompoziti koji imaju veću otpornost na toplotu i mehanička oštećenja, a od ovih materijala izrađuju se nosači aparata, boce/cilindri<sup>1</sup> za komprimovani medicinski vazduh<sup>2</sup> koje su za 50 % lakše od konvencionalnih – čeličnih. Takođe se teži smanjenju vremenskog intervala zastoja u akcidentnim situacijama, te se iz tog razloga prišlo rješenju brzog punjenja boca komprimovanim medicinskim vazduhom iz tzv. „banki vazduha“ ili akumulatora vazduha, [24].

U skladu sa standardom EN 144<sup>3</sup>, izrađuju se boce za komprimovani medicinski vazduh, a one mogu biti: čelične, polukompozitne i kompozitne. Polukompozitne boce izrađuju

---

<sup>1</sup> **Boce/cilindri** – u daljem tekstu boce.

<sup>2</sup> **Komprimovani medicinski vazduh** – u nekim dijelovima teksta, skraćeno KMV.

<sup>3</sup> **EN 144** – respiratorni zaštitni uređaji.

se naizmjeničnim namotavanjem karbonskih i staklenih vlakana, koja su međusobno povezana epoksidnom smolom oko aluminijumskog cilindra koji čini osnovu ove vrste boca. Kompozitne boce iste su strukture kao i polukompozitne samo sa termoplastičnom osnovom. Na pomenutim vrstama boca, nalazi se ventil za obezbjeđenje protoka vazduha sa integrisanim mehanizmom protiv slučajnog zatvaranja prilikom intervenisanja.

Čelične boce su dugotrajnije u odnosu na polukompozitne i kompozitne boce, jer se podvrgavaju redovnom vizuelnom pregledu spolja i u unutrašnjosti, te hladnoj vodenoj probi u propisanim vremenskim intervalima. Otpornije su na direktnu toplotu i mehanička oštećenja, a nedostatak im je veća masa u odnosu na polukompozitne i kompozitne. Prednost polukompozitnih i kompozitnih u odnosu na čelične boce, ogleda se prvenstveno u maloj masi sa povećanom bezbjednosti. Na novijim bocama ugrađeni su transponderi koji imaju funkciju očitavanja podataka prilikom testiranja.

U praksi na polukompozitnim i kompozitnim bocama, moraju se koristiti tzv. zaštitne navlake, kako bi se izbjegnula mehanička i termička oštećenja.

Iz navedenog, može se zaključiti, da se razvoj informacionih tehnologija odrazio i u ovoj oblasti. Naime, pored očitavanja podataka sa boce pomoću transpondera ili praćenjem korisnika izolacionih aparata<sup>4</sup> u toku intervenisanja pomoću uređaja za monitorig, značajno je povećana bezbjednost korisnika.

Čelične, polukompozitne i kompozitne boce, moraju se testirati jednom godišnje (zaptivenost ventila boce) prilikom ispitivanja kompletnog izolacionog aparata, ali i nakon upotrebe u jedinicama koje posjeduju sopstveni uređaj za kompletno testiranje izolacionih aparata, dok se svake pete godine, vrši se zamjena ventila boce i testiranje iste hladnom vodenom probom. Nakon ispitivanja, na čeličnim bocama, ukucavaju se datum zadnjeg testiranja i ispitni pritisak, dok na kompozitnim i ful kompozitnim bocama iz bezbjednosnih razloga (nastaje mehaničko oštećenje plašta), ovi podaci se upisuju posebnom bojom (koja ne rastvara epoksidne smole) na tijelu boce.

Dešavalo se u praksi, da prilikom prenošenja boce ili prilikom zamjene iste tokom intervencije, dođe do njihovog ispadanja, te se u kontaktu sa podlogom lomi ventil. U ovom slučaju zbog velikog pritiska u boci, dolazi do njenog pražnjenja, stvaranja potiska, prouzrokujući nekontrolisano (haotično) kretanje i povređivanje više radnika u njoj

---

<sup>4</sup> **Izolacioni aparat** – u nekim dijelovima teksta, skraćeno IA.

neposrednoj blizini. Iz ovakvih nepredvidivih i nepovoljnih iskustava u praksi, proizvođači i razne institucije nastoje naći nova rješenja za ventil kako bi se spriječilo nekontrolisano isticanje vazduha iz boce i ujedno zaštitili korisnici u neposrednoj blizini.

Poseban problem predstavlja vrijeme punjenja boca komprimovanim medicinskim vazduhom tokom intervenisanja pri gašenju požara, koje je smanjeno zamjenom boca (sa prethodno napunjenim bocama) ili brzim punjenjem na „banki vazduha“.

Komprimovanjem vazduha iz okoline pomoću kompresora visokog pritiska 200 i 300 bar i filtriranjem istoga kroz sistem filtera, dobija se komprimovani medicinski vazduh iz kojega su odstranjene razne nečistoće i krupnije čestice, te je isti spreman za upotrebu. Međutim, vrijeme punjenja boca, direktno kompresorima, je dugo pa se u zadnje vrijeme boce pune iz sistema sa bocama „banki vazduha“. Ovi spremnici, odnosno „banke vazduha“ koriste se kao stabilne (u kompresorskim stanicama) i mobilne jedinice (posebna je primjena na specijalnim vozilima za gašenje požara u tunelima, koje su namijenjene za dopunjavanje boca izolacionih aparata i napajanje SUS motora vazduhom za omogućavanje njihovog rada u specifičnim uslovima – nedostatak okolnog vazduha za sagorijevanje smjese u motornom prostoru), [25, 26].

Poseban problem nastaje pri uspostavljanju veze između boca „banke vazduha“ koji je pod pritiskom 300 bar i boce izolacionog aparata u kome je pritisak ispod 20 bar. Vrijeme izjednačavanja pritiska je bitan parametar radi bezbjednosti prisutnih u trenutku punjenja boce izolacionog aparata tj. ograničavanje brzine protoka fluida. Akcenat istraživanja se usmjerava na ovaj fenomen tj. donje granice vremena punjenja boce izolacionih aparata iz banke vazduha u svrhu povećanja bezbjednosti korisnika.

Ovaj problem čini polje multidisciplinarnih istraživanja, prateći savremene trendove u međunarodnim standardima u cilju poboljšanja performansi kvaliteta i bezbjednosti u radnoj sredini.

Naprijed navedeni problem, biće podvrgnut analizama:

- Ljudske greške (Human Error Analysis) – razmatra se ljudski faktor, jer i najbolja tehnička rješenja bezbjednog funkcionisanja sistema, mogu biti ugrožena zbog ljudske greške. Ta greška u ovom slučaju mora se svesti na minimum.

- Bezbjednog rada (Job Saety Analysis) – koristi definisane procedure u toku punjenja boca, definisati minimalno vrijeme punjenja boca koje neće dovesti sistem na granicu novog akcidenta u već postojećem akcidentu.
- Odstupanja (Deviation Analysis) – proučavanje sistema u cilju identifikacije i analize devijacija koje mogu prouzrokovati akcidente ili druge događaje u toku punjenja boce.
- Funkcije bezbjednosti (Safety Function Analysis) – tehnička i/ili organizaciona funkcija koja može smanjiti vjerovatnoću i posljedicu udesnih ili drugih neželjenih događaja u sistemu.
- Promjena (Change Analysis) – odnosi se na promjene koje nastaju pri funkcionisanju tehnoloških sistema, a mogu izazvati nove opasnosti i time uticati na nivo rizika.

## 2. PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

### 2.1 Problem i cilj istraživanja

Problem i cilj istraživanja je u stvari definisanje pouzdanosti tehničkih sistema, imajući u vidu da svaki sistem u sebi nosi veliku potencijalnu opasnost od moguće pojave otkaza ili havarije, opasnih po neposredne korisnike, ali i okolinu.

U posljednje dvije decenije, razvoj tehnologija u velikoj mjeri odrazio se u oblasti zaštite od požara, kako u cjelini, tako i u oblasti zaštite organa za disanje, lica i očiju, odnosno na izolacionim aparatima.

Eksperimentalna istraživanja treba da potvrde ili opovrgnu tačnost postavljenih hipoteza.

Osnovni cilj rada je da se dođe do parametara koji bitno utiču na bezbjednost korisnika u akcidentnim situacijama, ali i da se dođe do signifikantnih parametara koji utiču na povećanje bezbjednosti korisnika, posebno pri izboru opreme.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja, može se zaključiti da se veoma mali broj autora fokusirao na oblast zaštite organa za disanje, lica i očiju, odnosno na oblast izolacionih aparata, što potvrđuje i nedostatak odgovarajućih baza podataka i baza znanja, koje bi se mogle koristiti u realnim uslovima, ali i u trenutnim i daljim istraživanjima.

Iz opširne analize dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da još uvijek nisu uspostavljeni dovoljno pouzdani modeli ponašanja izlaznih veličina pri ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha iz „banki vazduha“ i da li će prouzrokovati trajne mehaničke deformacije na bocama izolacionih aparata SCBA<sup>5</sup> (čeličnim, polukompozitnim i kompozitnim) i SCUBA<sup>6</sup> čeličnim bocama pri kontrolisnom gradijentu protoka vazduha koji je veoma bitan za bezbjednost korisnika istih.

---

<sup>5</sup> **SCBA self contained breathing apparatus** – aparati za samostalno disanje sa sopstvenim rezervoarima za vazduh (bez vanjskog napajanja; npr. dovođenje vazduha pomoću cijevnog sistema).

<sup>6</sup> **SCUBA self contained underwater breathing apparatus** – aparati za samostalno disanje pod vodom sa sopstvenim rezervoarima vazduha (ronioci).

## 2.2 Problem istraživanja i hipoteze

Imajući u vidu da savremena vatrogasna oprema posljednjih nekoliko godina, prati svjetske trendove u pogledu kvaliteta materijala od kojih se izrađuje, uz naročitu posvećenost na bezbjednost korisnika i drugih lica koja se spašavaju, informacija koje se prikupljaju sa akcidentnih situacija (pri intervencijama) postavljaju se novi zahtjevi proizvođačima opreme. Treba napomenuti da u svijetu nema mnogo proizvođača vatrogasne opreme, koja je uglavnom specifična zbog svoje namjene. Osim toga prilikom intervenisanja koristi se oprema, pribor i alati iz svakodnevnog života.

Materijali za izradu vatrogasne opreme su visokog kvaliteta uz ispunjavanje različitih mehaničkih, fizičkih i hemijskih karakteristika.

U posljednje dvije decenije, došlo je do značajnog pomaka u razvoju opreme za zaštitu organa za disanje, odnosno izolacionih aparata, bilo da se radi o izolacionim aparatima na komprimovani medicinski vazduh, izolacionim aparatima na komprimovani kiseonik, ili izolacionim aparatima na kiseonik dobijen putem hemijske reakcije, otvorenog ili zatvorenog sistema. Kompletne promjene uočavaju se na cijelom izolacionom aparatu (tipa SCBA i SCUBA) počevši od noseće konstrukcije izolacionog aparata koji se više ne izrađuje od čeličnih profila već od kompozitnih materijala znatno manje mase (u odnosu na čelične) otpornih na toplotu i mehanička oštećenja, uvođenjem kompozitnih materijala za izradu boca, zatim uvođenja jednocijevnih sistema komprimovanog medicinskog vazduha, gdje se u crijevu visokog pritiska nalazi crijevo srednjeg pritiska, pa do materijala za izradu obrazine maske i pojednostavljivanja plućnog automata, ali i uvođenja u upotrebu CBRN<sup>7</sup> membrana u plućne automate, čime je postignuta bolja radiološko-hemijska i mikrobiološka zaštita korisnika. Sve ove inovacije u pravom smislu odrazile su se na bezbjednost, pouzdanost pri korištenju, uz znatno smanjenje mase izolacionih aparata, [27].

Razvoj informacionih tehnologija uopšteno, odrazio se i u ovoj oblasti, pa je tako danas moguće praćenje korisnika izolacionih aparata uz pomoć računara integrisanih u nosače izolacionih aparata. Pomoću bežičnog umrežavanja u lokalnu mrežu, rukovodilac akcije gašenja požara na prenosnom računaru u svakom trenutku ima podatke o kretanju i bezbjednosti korisnika, količini preostalog vazduha u bocama, koncentraciji eksplozivnosti, temperaturi

---

<sup>7</sup> CBRN (Recognition for use in nuclear, biological and chemical conditions) – priznanje za upotrebu u radiološko, biološkim i hemijskim uslovima.

okoline i dr. Svi pristigli podaci automatski se memorišu, kako bi se kasnije mogli analizirati u cilju poboljšavanja intervenisanja ili uočavanja eventualnih grešaka nastalih tokom intervencija. Ovi podaci su i od velikog značaja za proizvođače, tako što se njihovim analiziranjem i proučavanjem modifikuje oprema i otklanjaju eventualni nedostaci na njihovim proizvodima.

Procjenom rizika, određuje se stepen vjerovatnoće za utvrđivanje faktora koji mogu ugroziti bezbjednost korisnika, ali i definisanje preventivnih mjera u rješavanju problema za koje postoji vjerovatnoća da mogu dovesti do udesa i izvršiti procjena mogućnosti njihove pojave.

Kada su u pitanju tehnički sistemi poput ovoga, identifikacija opasnosti, vrši se još u fazi projektovanja, što dalje omogućava bezbjedno funkcionisanje instalacije i komponenata sa visokom pouzdanošću tokom upotrebe.

„Bezbjednost korisnika izolacionih aparata je veoma bitna, a bazira se na tri stepena zaštite ukoliko bi:

1. Došlo do otkaza na regulacionom ventilu (regulatoru pritiska), aktivirao bi se sigurnosni ventil koji se nalazi u sklopu regulacionog ventila.
2. Zakazao sigurnosni ventil, došlo bi do pucanja crijeva srednjeg, odnosno povišenog pritiska.
3. Zakazale prethodno pomenute zaštite, došlo bi do rasterećenja pritiska na plućnom automatu, tako da ni u kom slučaju visoki pritisak ne može doći do samog korisnika, odnosno prodrijeti u unutrašnjost maske“, [4].

Redovnim dnevnim i periodičnim pregledima uz obavezne edukacije, povećava se svijest korisnika ove vrste opreme koja zbog pouzdanosti zahtijeva stalni monitoring.

Brzo punjenje boca izolacionih aparata vrši se iz razloga da se skрати vrijeme odsustva vatrogasca iz zone gašenja požara. Vrijeme brzog punjenja (ekspanzija iz akumulatora nazivnog pritiska 30 MPa – „banka vazduha“) boca je oko jedan minut, dok se punjenje boca kompresorom visokog pritiska kreće u vremenskom intervalu oko 15 minuta. Međutim, tokom brzog punjenja boca, vatrogasac se izlaže opasnosti usljed mogućeg akcidenta-eksplozije boce. Poznati su smrtni slučajevi pri ovakvom brzom punjenju boca. Cilj istraživanja je da se definiše gradijent brzine punjenja boce koje obezbjeđuje bezbjednost i pouzdanost ovoga postupka, a na koji utiču parametri kao što su: materijal boce, ispravnost boce, ispravnost ventila na protok

vazduha, porast temperature, granično minimalno vrijeme punjenja boce, itd. Potrebno je definisati parametre pri punjenju sistema na koje korisnik ne može nesvjesno uticati. Posebno se mora definisati sistem prigušenja pri protoku vazduha iz banke vazduha u bocu.

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja, kao i iscrpnog obrazloženja ciljeva istraživanja do rješenja postavljenog problema u doktorskoj disertaciji, doći će se razradom sljedećih hipoteza:

**Glavna hipoteza:**

Termičke dilatacije prouzrokovane ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha iz "banki vazduha" neće prouzrokovati trajne mehaničke deformacije na bocama izolacionih aparata SCBA (čeličnim, polukompozitnim i kompozitnim) i SCUBA čeličnim bocama pri kontrolisnom gradijentu protoka vazduha.

**Pomoćna hipoteza:**

Oštećenja na polukompozitnim i kompozitnim bocama (do 12 procenata od debljine stijenke) nastala mehaničkim uticajima, nakon saniranja epoksidnim smolama bez dodavanja staklenih ili karbonskih vlakana, biće bezbjedna ako zadovolji ispitivanje vodom pod pritiskom, odnosno nakon izlaganja pritisku koji je za 50 procenata veći od nazivnog pritiska vazduha u boci.



### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

#### 3.1 Ocjena dosadašnjih istraživanja

Svaki tehnički sistem nosi u sebi veliku potencijalnu opasnost od moguće pojave otkaza i havarija, opasnih po neposredne korisnike, ali i širu okolinu. Pouzdanost tehničkih sistema određuje trajanje vremenskog intervala u kojem će sistem funkcionisati bez otkaza. Istraživanja upućena na povećanje stepena pouzdanosti i upravljanje pouzdanošću tokom životnog vijeka objekta, imaju za cilj definisanje mjera zaštite i njihovu optimizaciju sa aspekta istovremenog obezbjeđenja ekonomičnosti eksploatacije i ostvarivanja složenih propisa vezanih za zaštitu životne sredine i sigurnost mikro i makro regiona.

Definišući osnovne pojmove i parametre vezane za bezbjednost i pouzdanost sistema uopšte, ali i naprijed pomenutih sistema sa posebnim akcentom na sistem radne sredine, teži se ka smanjenju vjerovatnoće događaja sa mogućim posljedicama u pogledu:

- Ugrožavanja fizičkog, psihičkog i moralnog integriteta radnika (gubitak života ili radne sposobnosti, odnosno lakše i teže povrede);
- Ekonomskih posljedica (materijalne štete, nastale kao posljedica nepredvidivih događaja);
- Ugrožavanje u radnoj sredini (u ovom slučaju prisustvo toksičnih gasova, para i čvrstih materija, oslobađanje energije sa posljedicama narušavanja bezbjednosti korisnika).

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja, može se zaključiti da se mali broj autora fokusirao na oblast zaštite organa za disanje, lica i očiju to jest, na oblast izolacionih aparata, što potvrđuje i nedostatak odgovarajućih baza podataka i baza znanja, koje bi se mogle koristiti u realnim uslovima, ali i u trenutnim i daljim istraživanjima.

Iz opširne analize dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da još uvijek nisu uspostavljeni dovoljno pouzdani modeli ponašanja izlaznih veličina pri ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha iz "banki vazduha" i da li će prouzrokovati trajne mehaničke deformacije na bocama izolacionih aparata SCBA (čeličnim, polukompozitnim i kompozitnim) i SCUBA čeličnim bocama pri kontrolisanom gradijentu protoka vazduha koji je veoma bitan za bezbjednost korisnika istih.

### 3.2 Očekivani rezultati istraživanja

Istraživanje treba da pruži odgovore na pitanja vezana za izbor najoptimalnijeg i najbezbjednijeg modela korištenja „banki vazduha“ u vatrogasnim jedinicama za SCBA i SCUBA aparate, kao i sistema izolacionih aparata, a naročito korištenja polukompozitnih i kompozitnih boca izoacionih aparata nakon saniranja mehaničkih oštećenja na bocama.

Očekuje se da će rezultati istraživanja potvrditi postavljene hipoteze i predstavljati naučni doprinos, koji će se ogledati u povećanju pouzdanosti i bezbjednosti pri korištenju izolacionih aparata.

Saznanja do kojih treba doći, treba da omoguće neophodne preventivne mjere i procedure u cilju bezbjednosti korisnika pri pretakanju vazduha iz tzv. banki vazduha.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja treba da daju doprinos povećanja bezbjednosti korisnika u akcidentnim situacijama. Doprinos usavršavanju kontinuirane edukacije sa ciljem podizanja svijesti, odgovornosti i obučenosti korisnika, kao i unapređenju pouzdanosti i bezbjednosti sistema.

Očekuje se da će istraživanja imati praktičnu vrijednost, prije svega u vidu primjenljivosti dobijenih rezultata za obezbjeđivanje kvalitetne osnove za donošenje odluka u podsistemima održavanja i korištenja.

Primjenom rezultata istraživanja, obezbijediće se doprinos u pogledu povećanja bezbjednosti korisnika „banki vazduha“. Pored navedenog, očekuje se da se neposrednom primjenom saznanja stečenih ovim istraživanjima ostvari kompatibilnost sa svjetskim standardima i trendovima u ovoj oblasti.

## 4. TEORIJSKA RAZMATRANJA

### 4.1 Značaj i upotreba izolacionih aparata

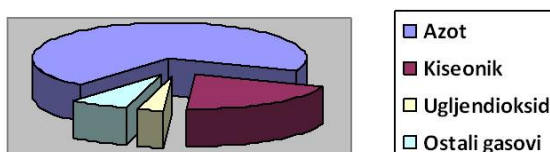
Prilikom intervenisanja vatrogasnih jedinica, zaštita organa za disanje, pored zaštitne odjeće i obuće predstavlja primarnu ulogu, tako da se nijedna intervencija (požar, hemijski udes i sl.) kod nas i u svijetu ne može desiti, a da se pri tome ne koriste izolacioni aparati. Njihova važnost i uloga ogleda se u zaštiti organa za disanje, lica i očiju od produkata sagorijevanja-iritirajućih i toksičnih svojstava dima u požaru, kao i iritirajućih i toksičnih dejstava hemijskih spojeva i supstanci pri hemijskim udesima. Zaštita od raznih vrsta mikroba i antraksa, povećeva se ugradnjom različitih vrsta membrana u plućne automate izolacionih aparata.

Imajući u vidu namjenu i princip rada izolacionih aparata, potrebno je pridržavati se uputa proizvođača, vršiti svakodnevne (nakon upotrebe) i periodične preglede u vlastitim radionicama u vatrogasnim jedinicama, te redovno godišnje atestiranje kod ovlaštenih institucija u svrhu izbjegavanja posljedica prouzrokovanih nepravilnim korištenjem i održavanjem, [16].

Upotrebom izolacionih aparata u praksi je omogućeno nesmetano obavljanje različitih aktivnosti bez posljedica po zdravlje i život korisnika, što je u direktnoj zavisnosti od edukovanosti korisnika, pravilnog rukovanja, kontrolnih i periodičnih pregleda i održavanja.

### 4.2 Sastav vazduha

Glavni sastojci vazduha koji udišemo u životnoj i radnoj sredini (dijagram 1), imaju približno konstantne vrijednosti, koje uglavnom variraju promjenom atmosferskog pritiska, a kao prosječne vrijednosti u sastavu vazduha, uzimaju se: azot 78,9 %, kiseonik ( $O_2$ ) 20,95 %, ugljendioksid ( $CO_2$ ), 0,03 % i plemeniti gasovi helijum (He), neon (Ne), argon (Ar), kripton (Kr), ksenon (Xe) i radon (Rn) 0,93 %.



Dijagram 1. Sastav vazduha, [4].

U radnim sredinama sa lošom ventilacijom, sadržaj kiseonika rijetko kad padne ispod 19 %, a sadržaj ugljendioksida rijetko kad prelazi 0,3 %, što negativno utiče na čovjekov organizam i na njegovu aktivnost.

Opadanjem koncentracije kiseonika u vazduhu ispod 17 % nastaju problemi sa disanjem, dok pri koncentraciji od 15 % kiseonika prestaje gorenje većine materija. Povećanjem koncentracije ugljendioksida u vazduhu iznad 3 %, nastaju problemi sa disanjem, dok pri koncentraciji od 14 % nastaje gušenje, a pri koncentraciji od 25 % nastupa trenutna smrt, jer je ugljendioksid običan zagušljivac (oko tri puta je teži od vazduha) i neotrovan gas, [2, 4, 22].

### 4.3 Sastav produkata nekontrolisanog sagorijevanja

Požari predstavljaju nekontrolisano sagorijevanje uzrokujući višestruke promjene u životnoj i radnoj sredini, zagađujući je dimom i njegovim otrovnim produktima u gasovitom stanju, kao i zagrijavanjem vazduha u neposrednoj blizini. Razlikujemo dvije vrste sagorijevanja:

- Potpuno ili kontrolisano u kojem prilikom sagorijevanja organskih materija nastaju ugljendioksid i vodena para.
- Nepotpuno ili nekontrolisano pri kojem nastaje ugljenmonoksid (CO) koji je veoma otrovan i eksplozivan gas, zatim ugljendioksid, vodena para, aldehidi, hlor, aminokiseline, fenol, metil alkohol sirćetna kiselina i dr; [4, 11].

Količina i vrsta toksičnih produkata u svakom požaru varira i nema konstantne vrijednosti, a dijele se prema načinu djelovanja na organizam u tri funkcionalne grupe:

#### 1. „Materije koje izazivaju asfiksiju”<sup>8</sup>

a. Fizikalni zagušljivci – u požaru, najčešći je ugljendioksid (CO<sub>2</sub>), teži je od vazduha i vrši njegovo istiskivanje, čime se smanjuje koncentracija kiseonika koja prouzrokuje asfiksiju.

b. Hemijski zagušljivci – ugljenmonoksid, cijanovodonik, sumporvodonič i drugi

---

<sup>8</sup> Asfiksija – gušenje.

uzročnici methemoglobina<sup>9</sup> (npr. nitriti, nitrati)

2. **Respiratorni iritansi (nadražljivci):** predstavljaju gasove i krute čestice dima (čađi) koje su nastale gorenjem. Dim je aerosol, sastavljen od parne faze čestica ugljenika i čađi (koja je manja od 1  $\mu\text{m}$  u prečniku i proizvod je materija koje sadrže ugljenik). U zavisnosti od oblika i veličine, čestice dima, mogu prodrijeti u različite dijelove respiratornog sistema. Pomenuti produkti nekontrolisanog sagorijevanja štetno utiču na zdravlje vatrogasaca.
3. **Kancerogeni:** policiklični aromatski ugljovodonici, benzopiren, benzen, formaldehid,“ [4].

Stepen intoksikacije i posljedice u sastavu produkata sagorijevanja, povećavaju se sa porastom temperature, stoga je upotreba izolacionih aparata od presudnog značaja u prevenciji nastanka akutnih, hroničnih i kumulativnih trovanja, [4].

#### 4.4 Standardi za komprimovani medicinski vazduh

Komprimovanjem vazduha iz okoline kompresorima visokog pritiska, dobija se komprimovani medicinski vazduh.

Evropskim standardom EN 12021<sup>10</sup> definisan je kvalitet komprimovanog medicinskog vazduha koji se upotrebljava u izolacionim (SCBA) i ronilačkim (SCUBA) aparatima i odnosi se prvenstveno na dozvoljene koncentracije: kiseonika, vlage, ugljenmonoksida, ugljendioksida i uljnih para (t. 1). Komprimovani medicinski vazduh ne smije imati nikakve arome niti mirise.

**Tabela 1.** Sastav medicinskog vazduha prema:[80]

Sastav medicinskog vazduha	JUS-u	dr Gošoviću	Baueru	EN 12021
Kiseonik O <sub>2</sub>	20-21 %	20-22 %	20-21 %	20-22 %
Vlaga	50 mg/m <sup>3</sup>	Ne ograničava se	30 mg/m <sup>3</sup>	200 bara±50 mg/m <sup>3</sup> 300 bara±35 mg/m <sup>3</sup>
Ugljenmonoksid CO	0.001 % (10 ppm)	0.001 % (10 ppm)	0.001 % (10 ppm)	5 mg/m <sup>3</sup>
Ugljendioksid CO <sub>2</sub>	0.05 % (500 ppm)	0.05 % (500 ppm)	0.04 % (400 ppm)	500 mg/m <sup>3</sup>
Uljne pare	0.3 mg/m <sup>3</sup>	0.5 mg/m <sup>3</sup>	0.25 mg/m <sup>3</sup>	0,5 mg/m <sup>3</sup>

<sup>9</sup> **Methemoglobin** – vrsta hemoglobina koji ne prenosi kiseonik.

<sup>10</sup> **EN 12021** – evropski standard za komprimovani medicinski vazduh.

Unutrašnjost boca izolacionih (SCBA) i ronilačkih (SCUBA) aparata ispunjena je komprimovanim medicinskim vazduhom koji predstavlja mikroklimu u specifičnoj radnoj sredini u kojoj se prilikom obavljanja poslova zahtijeva maksimalna psihofizička spremnost pojedinca, a procentom vlage u komprimovanom medicinskom vazduhu reguliše se fizički stres, ali i kondenzacija i mržnjenje prilikom skladištenja i korištenja [80].

U životnoj i radnoj sredini, zagađenost vazduha, nepovoljno utiče na organizam ukoliko su prekoračene određene granice, a prisustvo otrovnih materija nepovoljno utiče na zdravlje i radnu sposobnost i u određenim ekspozicijama prouzrokuje povrede i dovode do pojave profesionalnih oboljenja zaposlenih, [10, 31].

## 5. SREDSTVA ZA ZAŠTITU ORGANA ZA DISANJE, LICA I OČIJU

Pomenuta sredstva u zavisnosti od atmosferskog okruženja i potrebe za korištenjem svrstavaju se u dvije grupe:

### 1. „Zaštitna sredstva na bazi filtracije-zavisno okruženje (sl. 1):

- Zaštita od aerosola (respiratori-mehanički zaštitni filteri sa polumaskama za zaštitu organa za disanje, sl. 1a),
- Kombinovana zaštita od plinova i aerosola (polumaska ili maska za cijelo lice i filterom sa aktivnim punjenjem određene namjene za zaštitu organa za disanje, lica i očiju, sl. 1b i 1c),“ [2].



Slika 1. Tipovi maski, [2].

Filteri se u zavisnosti od namjene mogu podijeliti na: mehaničke (zaštita od čestica i aerosola), gasne (zaštita od jednog ili više gasova), kombinovane (zaštita od organskih i anorganskih gasova – za jedan ili više gasova, čestica i aerosola, sl. 2) i specijalne (zaštita od gasova sa niskom tačkom ključanja, uključujući radioaktivni jod, živine pare, azotne gasove i ugljenmonoksid, t. 2), [63]



Slika 2. Kombinovani filter u presjeku, [63].

Tabela 2. Filteri za respiratornu zaštitu (oznake bojom), [63].

OZNAKA	TIP	PRIMJENA	STANDARD
	<b>A</b>	Organski gasovi i pare (tačka ključanja > 65 <sup>0</sup> C).	EN 14387 <sup>11</sup>
	<b>B</b>	Neorganski gasovi i pare (ne CO); npr: hlor, H <sub>2</sub> S, HCN.	EN 14387
	<b>E</b>	Sumpordioksid i kiseli gasovi i pare.	EN 14387
	<b>K</b>	Amonijak i organski derivati amonijaka.	EN 14387
	<b>AX</b>	Organski gasovi i pare (tačka ključanja < 65 <sup>0</sup> C) ili supstance sa niskom tačkom ključanja grupe 1 i 2.	EN 371 <sup>12</sup> ili EN 14387
	<b>NO-P3</b>	Azotni oksidi; npr: NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> i čestice	EN 14387
	<b>Hg-P3</b>	Živine pare i čestice.	EN 14387
	<b>CO*</b>	Ugljenmonoksid.	DIN 58620 <sup>13</sup> EN 14387
	<b>Reactor P3*</b>	Radioaktivni jod i čestice.	DIN 3181* <sup>14</sup>
	<b>P</b>	Čestice.	EN 143 EN 14387

\* Samo su oznaka bojom i tip standardizovani.

## 2. „Zaštitna sredstva na bazi izolacije (nezavisno okruženje) za zaštitu organa za disanje, lica i očiju:

- Cijevne sprave (cijevni aparati s vazduhom iz nezagađene okoline, cijevni aparati s mijehom, cijevni aparati bez mijeha, cijevni aparati s vazduhom pod pritiskom iz voda).
- Izolacioni aparati otvorenog sistema (uređaji sa spremnikom komprimovanog vazduha, samospasioci).
- Regeneracioni aparati zatvorenog sistema (izolacioni aparati sa komprimovanim kiseonikom i aparati sa hemijski vezanim kiseonikom)\*, [2].

<sup>11</sup> EN 14387 – zahtjevi ispitivanje i označavanje zaštitnih respiratornih uređaja, gasnih i kombinovanih filtera.

<sup>12</sup> EN 371:1992 – sertifikovanje zaštitnih respiratornih uređaja, gasnih i kombinovanih filtera za organska jedinjenja sa niskom tačkom ključanja.

<sup>13</sup> DIN 58620:2007-2 – zahtjevi ispitivanje i označavanje zaštitnih respiratornih uređaja, gasnih i kombinovanih filtera od ugljenmonoksida.

<sup>14</sup> DIN 3181 – gasovi i pare organskih i neorganskih komponenti, kiselina i para sa tačkom ključanja > 65<sup>0</sup> C.



## 6. ZAŠTITNA SREDSTVA NA BAZI IZOLACIJE-IZOLACIONI APARATI

Od momenta uvođenja u upotrebu izolacionih aparata, obezbijeđena je zaštita respiratornih organa, lica i očiju, kako od agresivnih materija, produkata dima, tako jednim dijelom od toplote.

Izolacionim aparatima, korisnik se potpuno izoluje od atmosferskog okruženja u kojem se nalazi, a samim tim od djelovanja kontaminirane atmosfere. Izolacioni aparati mogu se podijeliti u tri grupe:

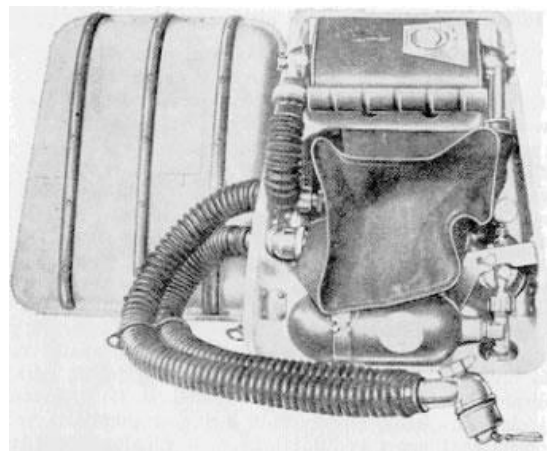
1. „Izolacioni aparati sa komprimovanim kiseonikom (regeneracioni aparati).
2. Izolacioni aparati sa kiseonikom dobijenim hemijskom reakcijom (regeneracioni aparati).
3. Izolacioni aparati sa komprimovanim vazduhom“, [2].

### 6.1 Izolacioni aparati sa komprimovanim kiseonikom-regeneracioni aparati, (aparati zatvorenog sistema) Dräger i Meco

Prvi put u zvaničnu upotrebu uvedeni su regeneracioni izolacioni aparati na komprimovani kiseonik njemačkog proizvođača Dräger davne 1910. godine i bez naročitih izmjena koristio se do 1924. godine. U tom periodu ova vrsta izolacionih aparata nosila se na grudima (sl. 3), a od 1924. godine promijenjen im je način nošenja – na leđima (sl. 4); posjedovali su usnike koji su prekrivali usta i nos, dok su se oči štitile posebno dizajniranim naočarima.



**Slika 3.** Prvi regeneracioni izolacioni aparat na komprimovani kiseonik, [84].

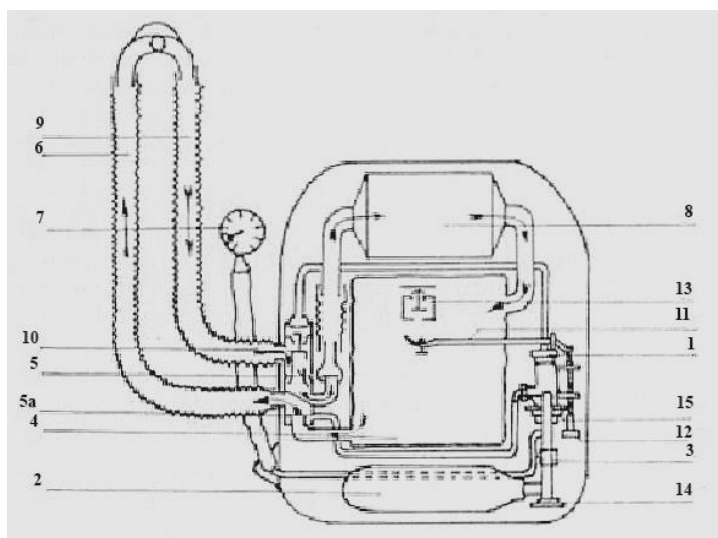


**Slika 4.** Regeneracioni izolacioni aparat Dräger nakon izmjena, [75].

Tako reći, uporedo sa pojavom regeneracionih izolacionih aparata na komprimovani kiseonik njemačkog proizvođača Dräger, u engleskom gradu Ilkestonu u zvaničnu upotrebu 1912. godine, uvedene su dvije vrste izolacionih aparata proizvođača Meco od kojih je jedan koristio komprimovani vazduh „Aerofor“, a drugi komprimovani kiseonik, [62, 86].

Meco aparat na komprimovani kiseonik u odnosu na Dräger, posjedovao je dvije boce i mogao se koristiti u intervalu oko 130 minuta, dakle duplo više. Ova vrsta nije ostala dugo u upotrebi, jer pored navedenih prednosti, imala je veliki nedostatak – nepouzdanost sistema.

U bocama prvih regeneracionih izolacionih aparata koristio se komprimovani kiseonik za obogaćivanje izdahnute smjese vazduha u unutrašnjost aparata. Izdahnuti vazduh cirkulisao je kroz unutrašnjost izolacionog aparata (sl. 5), gdje se u alkali<sup>15</sup> umetku vršila apsorpcija CO<sub>2</sub>, dok je uređaj za konstantno doziranje snabdijevao aparat kiseonikom iz boce. Hemijskom reakcijom u regeneracionom umetku (alkali umetku), izdvajan je CO<sub>2</sub>, a azot i plemeniti gasovi koji se nalaze u sastavu vazduha nisu učestvovali u hemijskoj reakciji, jer su inertni<sup>16</sup>, nego su samo cirkulisali kroz aparat. Vlaga iz izdahnutog vazduha, pokretala je hemijsku reakciju sa natrijumhidroksidom<sup>17</sup> u alkali umetku.



**Slika 5.** Šematski prikaz regeneracionog izolacionog aparata Dräger, [75].

1. regulator pritiska; 2. boca za kiseonik; 3. razvodnik kiseonika; 4. gumena vrećica; 5. kućište izdišnog ventila; 5a. inhalacioni ventil; 6. rebrasta cijev za udisanje; 7. manometar; 8. regeneracioni umetak; 9. rebrasta cijev za izdisanje; 10. kućište izdišnog ventila; 11. poluga automata za kiseonik; 12. dugme za ručno aktiviranje; 13. ventil za regulaciju pritiska; 14. ventil boce; 15. redukcioni ventil za doziranje O<sub>2</sub>.

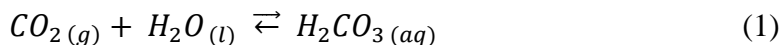
<sup>15</sup> **Alkalije** – hidroksidi (baze) alkalnih metala, veoma otrovni.

<sup>16</sup> **Inertni gasovi** – hemijski elementi "nulte" grupe PSE imaju popunjen posljednji energetski nivo te zbog toga ne stupaju u hemijske reakcije, dok je azot element "Va" grupe PSE i pod normalnim tehnološkim uslovima ponaša se kao inertan gas.

<sup>17</sup> **Natrijumhidroksid/jetki natrijum/kaustična soda** – veoma otrovna baza.

U praksi su se koristile dvije vrste umetaka: alkalij za intervencije i krečne za vježbanje.

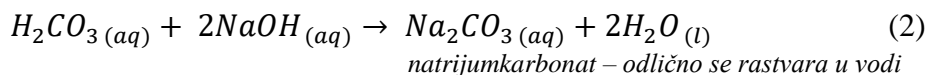
Empirijskom formulom može se prikazati ulazak ugljendioksida u hemijsku reakciju sa natrijumhidroksidom posredstvom izdahnutе vlage, pri čemu nastaje ugljična kiselina<sup>18</sup> ( $H_2CO_3$ ). „Nastajanje i razlaganje ugljične kiseline, predstavlja se hemijskom ravnotežom:



gdje,

- $(aq)$  – označava rastvorenu materiju,
- $(l)$  – tečna materija,
- $(s)$  – čvrsta materija u obliku taloga,
- $(g)$  – gasovita materija“.

Obzirom da je  $CO_2$  nepolaran gas, jer isparava iz vode kao iz mineralne, odnosno kisele vode, ravnotežna reakcija, pomijera se u smjeru nastajanja ugljične kiseline, pri čemu nastaju karbonati (natrijumkarbonat i kalcijumkarbonat):



Ove hemijske reakcije su egzotermne<sup>19</sup>, što utiče na rastvorljivost gasova u vodi s povećanjem temperature, te ovakvi sistemi zahtijevaju hlađenje. Zagrijavanje alkali umetka znak je da isti radi. Ovi umeci oštećuju se parama benzina i alkohola, tako da ovu vrstu izolacionih aparata nisu smjela koristiti lica koja su prethodno koristila alkohol.

Prilikom inspirijuma<sup>20</sup> i ekspirijuma<sup>21</sup>, korisnik, nije imao kontakt sa vanjskom atmosferom, jer se vazduh prilikom cirkulisanja u unutrašnjosti aparata pročišćava i nadoknađuje.

<sup>18</sup> **Ugljična kiselina** – nastaje rastvaranjem ugljendioksida u vodi, može se naći i u mineralnim vodama.

<sup>19</sup> **Egzotermne reakcije** – hemijske reakcije pri kojima se oslobađa toplota.

<sup>20</sup> **Inspirijum/inhalacija** – udisanje.

<sup>21</sup> **Ekspirijum/ekshalacija** – izdisanje.

Održavanje ovih izolacionih aparata je predstavljao veliki problem zbog opreme i postupaka prilikom pranja, čišćenja, dezinfekcije i neutralizacije alkalij umetka, a naročita pažnja morala se obraćati da alkalij umetak ne dođe u kontakt s vlagom, [20].

## 6.2 Regeneracioni izolacioni aparat sa komprimiranim kiseonikom Dräger PSS BG4 plus

Izolacioni aparat posljednje generacije njemačkog proizvođača Dräger (sl. 6), inovativnog dizajna namijenjen je za obavljanje zahtjevnijih poslova poput gašenja požara u rudnicima, tunelima, podzemnim voznim tokovima, kao i pri hemijskim akcidentima, a korisniku omogućava bezbjedan boravak u kontaminiranim zonama u vremenskom intervalu od četiri časa. Karakterišu ga: jednostavna upotreba, integrisani sistem hlađenja vazduha u unutrašnjosti aparata, redukovana potrošnja komprimovnog medicinskog kiseonika, ergonomski dizajn, Dräger sorb 400 – apsorvent izdahnutog ugljendioksida, maska za cijelo lice sa integrisanim brisačem.



Slika 6. Regeneracioni izolacioni aparat sa komprimiranim kiseonikom DRÄGER PSS BG4 plus, [33].

U skladu sa zahtjevima korisnika, prikupljanjem informacija iz prakse uz implemetaciju u modifikovanju, razvijen je ovaj uređaj, čime je povećana bezbjednost, trajnost, servisiranje i održavanje uređaja.

U unutrašnjosti maske zastupljen je blago povećan pritisak čime se pruža dodatna zaštita korisnika, sprečavajući prodor opasnih materija iz okruženja u zatvoreni kružni sistem disanja.

Kao i kod prethodno pomenutog modela, ugljendioksid iz izdahnutog vazduha se apsorbuje u umetku sa integrisnim filterom za prašinu u unutrašnjosti sistema, koji može biti jednokratan ili punjiv, a prečišćeni vazduh se obogaćuje sa komprimovanim medicinskim kiseonikom iz boce uz obavezno hlađenje prije udisanja. Hlađenje se vrši u alternativnom rashlađivaču, koji ne zahtijeva led (postoji i rashlađivač sa ledom), nudeći neograničenu upotrebu i lako se uklapa u sistem. Alternativni rashlađivač vazduha reaktivira se pet sati nakon upotrebe. Takođe postoji i opciono rashlađivanje vazduha u cijevi do plućnog automata postavljanjem „T – razdjelnika sa vodenim poklopcem“ i ima funkciju sakupljanja kondenzovanih kapljica vode u zoni protoka vazduha. Kondenzovane kapljice vode ili neka druga tečnost izbačena u zatvoreni kružni sistem, sakuplja se u lakozamjenjivoj superapsorbujućoj vunenoj masi za jednokratnu upotrebu.

Dräger PSS BG4 plus je opremljen "Bodigard II" uređajem sa elektronskim signalom za monitorig<sup>22</sup> (pritisak u boci, preostalo vrijeme korištenja aparata, automatsko snimanje podataka, optički i akustični upozoravajući signal, senzor pokreta, manuelni alarm za slučaj opasnosti) svakog korisnika i upozoravajućom jedinicom, tako da rukovodilac akcijom/komandir u svakom trenutku može po potrebi upozoriti na hitnoću ukoliko se za to ukaže potreba.

Bezbjednost uređaja definisana je standardima: EN 145<sup>23</sup> i EN 50020<sup>24</sup>.

Opcioni adapter omogućava vezu sa udobnim povratnim (came back) sistemom tekućine, koja prolazi kroz cjevčicu pritiskom zuba na integrisani ventil, čime korisnik nadoknađuje tečnost izgublenu fizičkim naporom, a zaštitna maska obezbjeđuje prirodan pogled sa odličnim vidnim poljem. Vizir na unutrašnjoj strani zaštitne maske tokom korištenja, briše se pomoću integrisanog brisača (sl. 7), [33].

---

<sup>22</sup> **Monitoring** – nadzor.

<sup>23</sup> **EN 145** – uređaji za zaštitu organa za disanje zatvorenog sistema sa komprimovanim kiseonikom ili kiseonikom i azotom (zahtjevi, ispitivanje, označavanje).

<sup>24</sup> **EN 50020** – uređaji za ličnu bezbjednost koji se koriste u potencijalno eksplozivnoj atmosferi.



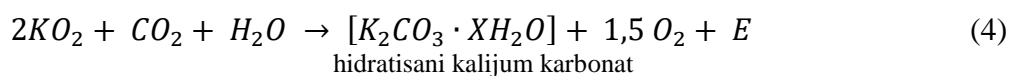
Slika 7. Maska Dräger FPS 7000 RP sa integrisanim brisačem, [22].

### 6.3 Regeneracioni izolacioni aparat sa kiseonikom dobijenim hemijskom reakcijom, MSA Air Elite 4 h

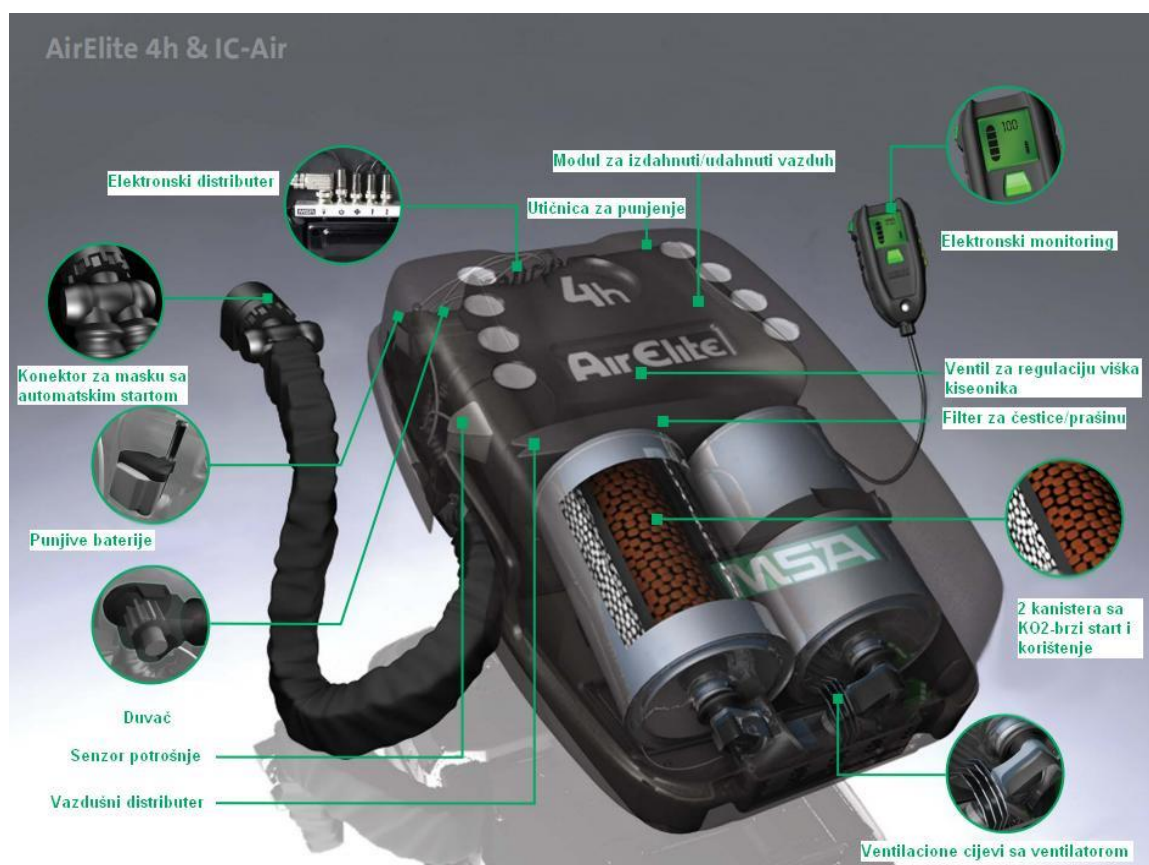
Ovo je jedinstvena vrsta izolacionog aparata (sl. 8) kod kojeg se kiseonik dobije putem hemijske reakcije, proizvođača MSA sa vremenskim intervalom korištenja od četiri časa.

Proizvođač MSA već 40 godina primjenjuje princip "oksigen generacije" iz kalijumhiperoksida  $KO_2$  u svojim regeneracionim aparatima, tako da je uređaj ove vrste trenutno najsavršeniji, a ne zahtijeva ni upotrebu boce sa komprimovanim medicinskim kiseonikom, [32, 57].

Kalijumhiperoksid ( $KO_2$ ) je hemikalija koja spontano reaguje sa vlagom i ugljendioksidom iz izdahnutog vazduha, a ova hemijska reakcija je egzotermna.



Izdahnuti vazduh pomoću duvača cirkuliše kroz zatvoreni sistem izolacionog aparata, prolazeći kroz dva međusobno povezana umetka ispunjena kalijumhiperoksidom u kojima se vrši apsorpcija ugljendioksida uz oslobađanje veće količine kiseonika, koja je dovoljna za obogaćivanje izdahnutog vazduha i pri iznenadnom povećanju napora korisnika (sl. 9). Karakterišu ga: jednostavna upotreba, niska temperatura vazduha koji se udiše, indikacija potrošnje sa tri upozoravajuća nivoa 50, 20 i 5 %, dugotrajna upotreba  $KO_2$  umetaka – do dvije godine u aktivnom stanju, a pet godina neotpakovani, ergonomski dizajn, potpuna kontrola disanja, elektronski monitoring, maska za cijelo lice sa integrisanim brisačem.



Slika 8. Regeneracioni izolacioni aparat sa KO<sub>2</sub> principom MSA Air Elite 4h, [21].



Slika 9. Tok vazduha kroz izolacioni aparat MSA Air Elite 4h, [37].



Advantage AirElite



35-R AirElite

Slika 10. Tipovi maski za izolacioni aparat MSA Air Elite 4h, [21].

Bezbjednost uređaja definisana je standardima: DIN 58652-2<sup>25</sup>; vfdb 0802<sup>26</sup>; kao i "Flame Engulfment"<sup>27</sup> testom.

Toplota oslobođena egzotermnom reakcijom u KO<sub>2</sub> umecima, smanjuje se ohlađenim vazduhom koji cirkuliše kroz unutrašnjost aparata.

Za ovaj izolacioni aparat postoje dva tipa maski za cijelo lice na kojima su ugrađeni brisači, a to su: Advantage Air Elite sa panorama vizikom (povećano vidno polje) i 3S-R Elite (sl. 10), [32, 57].

#### 6.4 Izolacioni aparati na komprimovani vazduh (aparati otvorenog sistema)

Izolacioni aparati otvorenog sistema na komprimovani medicinski vazduh, namijenjeni su za zaštitu organa za disanje, lica i oči kao i prethodno obrađena vrsta izolacionih aparata (aparati zatvorenog sistema) na komprimovni medicinski kiseonik. Namijenjeni su za izolaciju korisnika od vanjske kontaminirane atmosfere, [13]. Razlika između ove dvije vrste izolacionih aparata je u principu njihovog rada.

U izolacionim aparatima (aparati zatvorenog sistema) na komprimovni medicinski kiseonik (sl. 6) ili kako ih još nazivaju regeneracionim izolacionim aparatima, tokom procesa disanja vrši se neutralizacija ugljendioksida i obogaćivanje izdahnutog vazduha iz boce sa komprimovanim medicinskim kiseonikom, dok se u tokom korištenja izolacionih aparata (aparata otvorenog sistema) na komprimovni medicinski vazduh (sl. 11) vrši udisanje istog, a zatim biva izdahnut u spoljašnju atmosferu, [16].

U bocu izolacionog aparata, smještenoj na leđnom nosaču, komprimuje se medicinski vazduh, pomoću kompresora visokog pritiska 200 ili 300 bar (u zavisnosti od nazivnog pritiska izolacionog aparata), nakon otvaranja ventila boce, isti ulazi u regulacioni ventil i crijevo visokog pritiska s manometrom, redukujući se na srednji pritisak prolazi dalje crijevom srednjeg pritiska do plućnog automata smještenog na maski, gdje se redukuje na normalni ili

<sup>25</sup> **DIN 58652-2** – respiratorna zaštitna sredstva zatvorenog kruga disanja; dio 2 za dobijanje kiseonika hemijskim putem; Deutsche Institut für Normung (njemački Institut za standarde); oktobar 1997.

<sup>26</sup> **vfdb (Vereinigung zur Förderung des Deutsches Brandschutzes)** – njemačko Udruženje za promovisanje zaštite od požara; zaštitna respiratorna oprema od infektivnih agenasa za primjenu u vatrogasnim jedinicama; Technisch-Wissenschaftlichen Beirat (njemački Tehničko-savjetodavni odbor); septembar 2008.

<sup>27</sup> **Flame Engulfment Test** – test otpornosti na plamen i toplotu vatrogasne opreme prema EN 469/1995 i 2005.



blago povišeni, kako bi se udisao, a zatim preko nepovratnog ventila na maski izdisao u okolinu (sl. 11 i 13).

Vrijeme korištenja izolacionog aparata otvorenog sistema zavisi o količini komprimovanog medicinskog vazduha u boci, zapremini boce, pritisku u boci, ali i o kapacitetu pluća korisnika, kao i fizičkom naporu kojem je korisnik tokom upotrebe izložen.



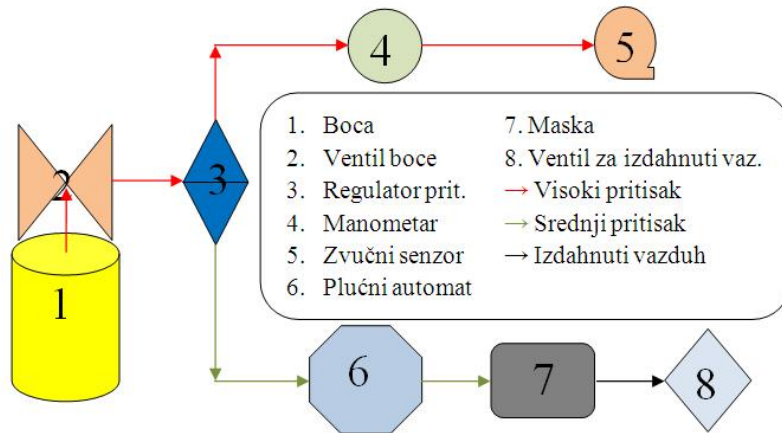
**Slika 11.** Izolacioni aparat Interspiro140/QS Spiromatic S, [2].

1. maska; 2. plućni automat; 3. crijevo povišenog pritiska (srednjeg pritiska); 4. remnici za nošenje; 5. pojas za fiksiranje; 6. regulator pritiska; 7. nosač aparata; 8. manometar sa zvučnim senzorom; 9. boca za vazduh sa ventilom; 10. senzor pokreta;



**Slika 12.** Izolacioni aparat MSA Air Maxx nosač aparata bez boce i maske sa jednocijevnim sistemom (u crijevu visokog pritiska nalazi se crijevo srednjeg pritiska), [64, 91].

U izolacionim aparatima za SCBA<sup>28</sup> korisnike, koristi se komprimovani medicinski vazduh u jednom ili dva međusobno povezana cilindra/boce.



Slika 13. Tok vazduha u izolacionim aparatima.

„Izolacioni aparati otvorenog sistema moraju zadovoljavati standarde: EN 137<sup>29</sup>; NFPA<sup>30</sup>; NIOSH<sup>31</sup>; EN 137:2006, tip 2 (uključujući test otpornosti na plamen), posjeduju CBRN<sup>32</sup> membrane (opciono) u sklopu plućnog automata. Testiranja se sprovode prema Direktivi 94/9 EC ATEX<sup>33</sup>.

Neki aparati (zavisno od proizvođača i njihove garancije) mogu se nužno koristiti i pod vodom, ali samo do 10 m dubine. Masa aparata spremnog za upotrebu iznosi 10,7 kg (sa kompozitnom bocom), a temperaturni opseg upotrebe iznosi od -40 do 90<sup>0</sup> C“, [45, 87, 90].

Dijelovi izolacionog aparata otvorenog sistema su:

- Maska za cijelo lice (sl. 14) u kojoj u zavisnosti od plućnog automata vlada normalan ili blago povišeni (pozitivan pritisak) kojim se sprečava kondenzacija vizira i ulazak vazduha iz okoline zbog lošeg nalijeganja. Zadovoljava sta-

<sup>28</sup> Pogledati broj: 5.

<sup>29</sup> BS EN 137:2006 – zaštitni respiratorni uređaji otvorenog sistema na komprimovani vazduh sa maskom za cijelo lice (zahtjevi, ispitivanje, označavanje).

<sup>30</sup> NFPA (National Fire Protection Association) – američka Nacionalna agencija za zaštitu od požara.

<sup>31</sup> NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) – američki Nacionalni institut za bezbjednost i zdravlje.

<sup>32</sup> CBRN (recognition for use in nuclear, biological and chemical conditions) – priznanje za upotrebu u radiološko-biološkim i hemijskim uslovima.

<sup>33</sup> ATEX (ATmospheres EXplosives) Direktiva 94/9/EC – objedinjavanje zakona država članica EU u vezi sa zaštitnom opremom i sistemima namijenjenim za upotrebu u potencijalno eksplozivnim atmosferama.

ndarde: EN 136 CL3<sup>34</sup>, EN 137 tip 2, DIN 58610<sup>35</sup>, ATEX i CE<sup>36</sup> oznaku. Izrađuje se od gume ili silikona, a vizir od polikarbonata. Izdahnuti vazduh kao i vazduh koji sprečava kondenzaciju iz maske izlazi preko izdisajnog nepovratnog ventila na kojem se nalazi govorna membrana za komunikaciju između korisnika.



Slika 14. Maska za izolacioni aparat Interspiro QS, [45].

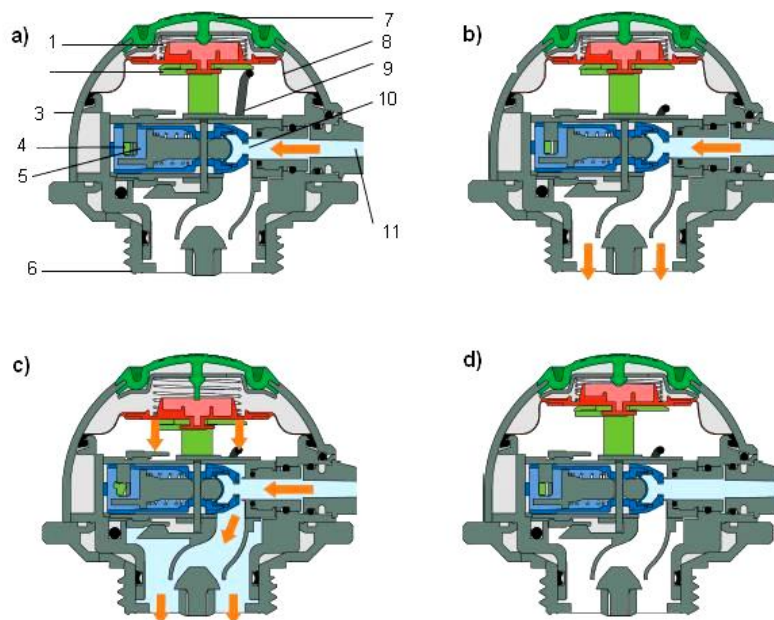
U unutrašnjosti maske nalazi se i dodatna gumena zaštita nosa od toplote. Moraju se nakon svake upotrebe prati i dezinfikovati, a propisano vrijeme upotrebe od strane proizvođača iznosi oko 10 godina, [2, 17, 25, 68];

<sup>34</sup> EN 136 CL3 – zaštita od prodiranja gasova, para i prašine.

<sup>35</sup> DIN 58610 – uređaji za zaštitu organa za disanje, odnosno maska za cijelo lice.

<sup>36</sup> CE – skraćena od "Conformité européenne" (engl. European Conformity) i predstavlja oznaku proizvođača koja ukazuje da je proizvod projektovan i proizveden u skladu sa zdravstvenim, bezbjednosnim i drugim direktivama Evropske unije.

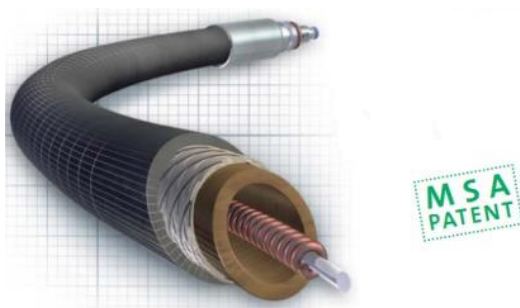
- Plućni automat (sl. 15) redukuje srednji pritisak sa 5,5-8 bar u zavisnosti od proizvođača na normalan ili blago povišeni (pozitivan pritisak) i reguliše proces disanja, [2, 17, 45, 64];
- Crijevo srednjeg (povišenog pritiska; sl. 16 i 18) povezuje regulator pritiska sa plućnim automatom. U zavisnosti od proizvođača, komprimovani medicinski vazduh se nakon regulatora pritiska redukuje na 5,5-8 bar. Služi i kao zaštita korisnika u slučaju zakazivanja regulatora pritiska, tako da dolazi do njegovog pucanja pri pritisku od 30 bar; na crijevima srednjeg pritiska, nalaze se brze spojke za spajanje s maskom, [59].



**Slika 15.** Presjek plućnog automata Auto MaXX proizvođača MSA s grafičkim prikazom funkcionisanja: [58, 64]

1. opruga nadpritiska; 2. viljuška membrane; 3. zaštitni poklopac; 4. poluga ventila; 5. ventil; 6. priključak za masku (bajonet ili navojni); 7. taster za provjetranje; 8. membrana; 9. poluga za zatvaranje (aktivna); 10. komora ventila; 11. ulaz srednjeg pritiska;
  - Zatvoren ventil
  - Stvaranjem podpritiska otvara se ventil
  - Zatvoren ventil
- Remnici za nošenje izolacionog aparata, anatomski su oblikovani, a izrađuju se od nomeksa ili kevlar<sup>37</sup>;

<sup>37</sup> **Aramidna vlakna** – tipovi poliamidnih vlakana sa pojačanom mehaničkom otpornošću, veoma visoke temperature paljenja i velike hemijske otpornosti. Upotrebljavaju se u tekstilima od kojih se očekuju visoka zaštitna svojstva (vatrogasne zaštitne uniforme i rukavice). Trgovački nazivi su im: *Kevlar*, *Nomex*, *Twaron*, *Technora*.



**Slika 16.** Alpha single line proizvođača MSA. Crijevo srednjeg pritiska nalazi se u crijevu visokog pritiska, [38, 91].

- Pojas za fiksiranje namijenjen je za fiksiranje izolacionog aparata oko struka, anatomski je oblikovan i izrađuje se od istog materijala, kao i remnici za nošenje;
- Regulator pritiska sa sigurnosnim ventilom zadovoljava standard EN 137 (sl. 17 i 18) sa visokog pritiska redukuje komprimovani medicinski vazduh na srednji pritisak. Na njemu može opciono biti ugrađen adapter za brzo punjenje (quick-fill connection) za punjenje boce sa „banke vazduha“ u intervalu od 45 sekundi, bez skidanja boce s nosača izolacionog aparata;



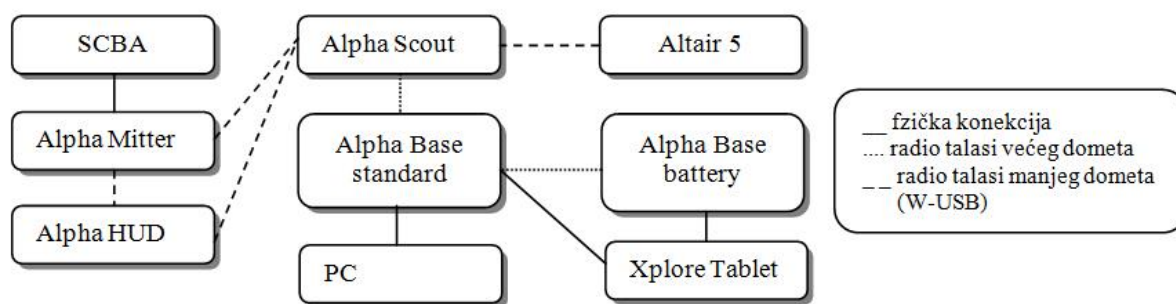
**Slika 17.** Presjek:  
a) regulator pritiska;  
b) akustični uređaj, [25].



**Slika 18.** Sistem visokog i srednjeg pritiska, [25].

- Nosač aparata zadovoljava standard EN 137 (sl. 11 i 12) izrađuje se od sintetičkih materijala – duroplasta<sup>38</sup>, dok su ranije izrađivani od metala, što je uticalo na povećanje njihove mase, kao i mase kompletnog aparata;
- Manometar sa zvučnim sensorom (akustičnim uređajem; sl. 18) zadovoljava standard EN 137 služi za kontrolu visokog pritiska u svakom trenutku, a zvučni sensor služi da opomene korisnika da se mora povući iz kontaminirane zone radi zamjene ili dopune boce, odnosno da je u boci pritisak  $55 \pm 5$  bara. Zvučni sensor zavisno od proizvođača može biti ugrađen na manometru ili redukcionom ventilu (regulatoru pritiska) i korisniku daje zvučni signal jačine preko 90 dB da je u boci ostalo vazduha za povlačenje iz opasne zone (za cca 5 minuta). Manometri mogu biti analogni i digitalni.
- Boca za vazduh sa ventilom (sl. 19) za otvaranje/zatvaranje sa integrisanim mehanizmom protiv slučajnog otvaranja/zatvaranja prilikom intervenisanja; zadovoljava standard EN 144<sup>39</sup>, a kako je ranije pomenuto može biti čelična, polukompozitna i kompozitna, [2, 45, 64];

Proizvođači Interspiro i MSA, razvili su sopstvene sisteme zaštite i monitoringa korisnika izolacionih aparata pomoću uređaja pri intervenisanju u opasnim sredinama. To su modularni bežični sistemi koji rade na različitim frekvencijama u zavisnosti od proizvođača. Princip međusobnog rada ovih uređaja, proizvođača, može se prikazati i šematski (šema 1), [36, 47, 48, 49, 50, 51].



Šema 1. Međusobna povezanost Alpha Personal Network (lična veza), [60, 90].

<sup>38</sup> **Duromeri (duroplasti)** – sintetički materijali sa strukturom od gusto umrežanih polimerskih molekula ne mogu mijenjati oblik djelovanjem toplote, ne rastvaraju se u rastvaračima, teško se plastično deformišu i lako se lome.

<sup>39</sup> **Pogledati broj: 3.**

## 7. VRSTE BOCA ZA IZOLACIONE APARATE

### 7.1 Vrste boca za SCBA aparate

Kako je navedeno u uvodnim razmatranjima ove disertacije, u skladu sa standardom EN 144<sup>40</sup>, izrađuju se boce za komprimovani medicinski vazduh, a one mogu biti: čelične (4 l/200 bara; 6 l/300 bara ; 6 l/300 bara – superlaka), polukompozitne (6,8 l/300 bara; 9 l/300 bara) i kompozitne EN 12245:2002<sup>41</sup> (3,4 l/300 bara; 6,7 l/300 bara). Polukompozitne boce izrađuju se naizmjeničnim namotavanjem karbonskih i staklenih vlakana, koja su međusobno povezana epoksidnom smolom, oko aluminijumskog cilindra koji čini osnovu ove vrste boca. Kompozitne boce iste su strukture kao i polukompozitne samo sa termoplastičnom osnovom. Na pomenutim vrstama boca, nalazi se ventil za obezbjeđenje bezbjednog protoka vazduha sa integrisanim mehanizmom protiv slučajnog zatvaranja prilikom intervenisanja.

#### 7.1.1 Čelične boce

Uvođenjem polukompozitnih i kompozitnih boca u upotrebu, upotreba čeličnih boca (sl. 19) sve manje je zastupljena prvenstveno zbog veće mase (naročito kod starijih vrsta izolacionih aparata na kojima su se često nosile po dvije boce) i podložnosti oksidaciji – koroziji. I pored navedenih nedostataka, ova vrsta boca ima veću površinsku otpornost na mehanička i termička oštećenja u odnosu na polukompozitne i kompozitne boce. Svake pete godine vrši se zamjena ventila boce i obavezno ispitivanje čeličnih boca hladnom vodenom probom. Nakon ispitivanja na bocama se obavezno ukucava datum zadnjeg testiranja.



Slika 19. Čelična boca s ventilom i gumenom oblogom, [41, 88].

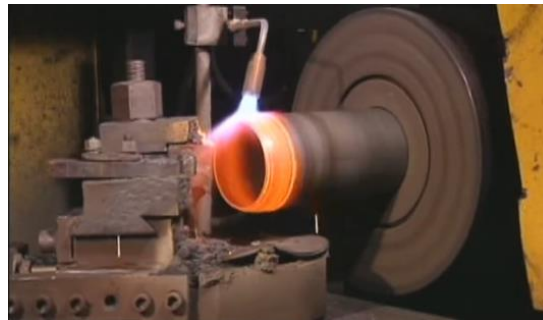
<sup>40</sup> EN 144 – respiratorni zaštitni uređaji.

<sup>41</sup> EN 12245:2002 – minimalni zahtjevi za materijale, dizajn, konstrukciju, ispitivanje prototipa i rutinske inspekcije proizvodnje kompozitnih gasnih boca/cilindara, zapremine do 450 l vode za komprimovane, tečne i rastvorene gasove. Riječ cilindar uključuje cijevi zapremine do 450 l vode. Ovaj standard primjenjuje se za cilindre izrađene od metalnog ili nemetalnog materijala ojačane namotanim kompozitom koji se sastoji od namotanih staklenih i ugljenikovih vlakana, [39, 83].

Izrađuju se postupkom hladnog izvlačenja u kombinaciji sa postupkom rotacionog vrućeg valjanja (sl. 20 i 21) za oblikovanje gornjeg dijela boce na kojem se ugrađuje ventil za otvaranje/zatvaranje.



Slika 20. Izrada čelične boce hladnim izvlačenjem, [42].



Slika 21. Izrada čelične boce rotacionim vrućim valjanjem, [42].

Najveći svjetski proizvođači čeličnih i lakih čeličnih boca su: Luxfer, Heiser i Mannesmann, koji su svoju proizvodnju usaglasili sa zahtjevima standarda DIN, EN i ISO. U praksi su dostupne su različitim veličinama, od 0,8 do 6 l, za nazivne pritiske 200 ili 300 bar, [71, 97].

### 7.1.2 Polukompozitne i kompozitne boce

U upotrebu su uvedene početkom sedamdesetih godina prošloga vijeka, prvo u Sjevernoj Americi, Japanu, a zatim u zemljama srednje Amerike, a u Evropi sredinom devedesetih godina prošloga vijeka.

Prve polukompozitne boce tako zvane hoop-wrapped<sup>42</sup> proizvedene su sa aluminijumskim cilindrom kao osnovom, dok im je omotač bio od staklenih vlakana, ojačan plastikom. Primjenom nove tehnologije, debljina stijenki ove vrste boca smanjena je na polovinu stijenki čeličnih boca i 30 % su bile lakše u odnosu na aluminijumske boce iste veličine.

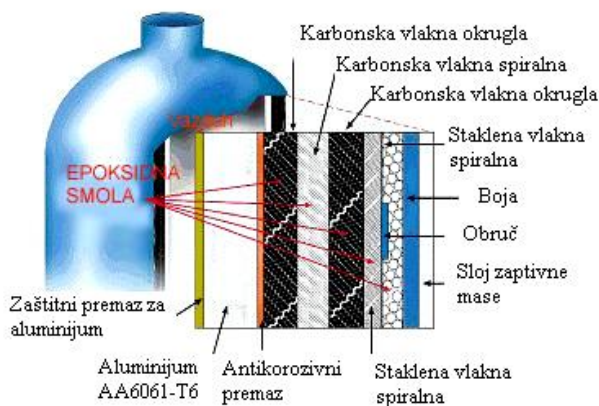
Godine 1976. SCI (Structural Composites Industries) je bila prva kompanija koja je proizvela prvu polukompozitnu bocu, tako zvanu fully-wrapped<sup>43</sup> (sl. 22) sa osnovom od aluminijuma, čija površina je bila ojačana staklenim vlaknima međusobno povezanim

<sup>42</sup> **Hoop-wrapped** – pojačane, vlaknima, odnosno polukompozitne.

<sup>43</sup> **Fully-wrapped** – potpuno umotane, prekrivene, tzv. full composit boce, odnosno polukompozitne i kompozitne boce.



epoksidnom smolom<sup>44</sup>. Ova inovacija, tj. tehničko-tehnološko rješenje rezultovalo je smanjenjem mase boca u odnosu na čelične i hoop-wrapped polukompozitne boce, te su veoma brzo postale standard i najpopularnije boce koje se koriste na izloacionim aparatima.



**Slika 22.** Fully-wrapped polukompozitna boca u presjeku, [69]. **Slika 23.** Kompozitna boca u presjeku.

Na povećanje performansi polukompozitnih boca, najveći uticaj ostvaren je uvođenjem vlakana od karbona i kevlaru za izradu vanjskog omotača boce, koja posjeduju niz izuzetnih osobina, poput čvrstoće, izdržljivosti (veća nego u čelika) i mala masa. Velika čvrstoća karbonskih vlakana je njihova najveća osobina, te je iz tog razloga smanjena debljina stijenke aluminijumskog cilindra, čineći ih tako do 50 % lakšim od čeličnih boca iste zapremine, tako da su postale najpopularnije boce današnjice, [93].

Izrada i upotreba kompozitnih boca (sl. 23) je novijeg datuma. Struktura im je slična polukompozitnim, a osnova (cilindar) izrađena je od termoplastike. Vanjski omotač čine karbonska i staklena vlakna međusobno povezana epoksidnom smolom.

Polukompozitne i kompozitne boce se izrađuju za nazivne pritiske od 200 i 300 bar. (t. 3) usklađene su sa zahtjevima Evropske komisije za opremu pod pritiskom; Direktiva 97/23

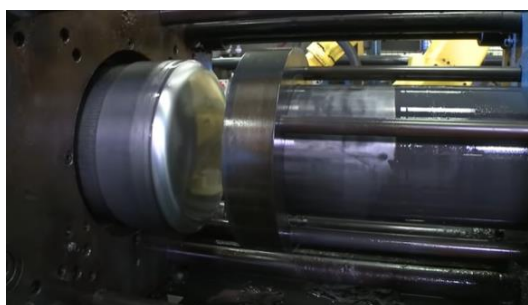
<sup>44</sup> **Epoksidna smola** – nastaje kondenzacijom epi-hlor-hidrina sa di-glicidil-etrom bis-fenola. Uz dodavanje određenih aditiva očvrstne. Ekspozicije (izlaganja) epi-hlor-hidrinu tokom proizvodnje prouzrokuju iritacije kože, hepatotoksična, neurotoksična, alergena i kancerogena dejstva.

EC<sup>45</sup>, testirane, sertifikovane i označene BAM (Federal Institute for Material Testing, Germany)<sup>46</sup> i nose CE-oznaku<sup>47</sup> (sl. 27).

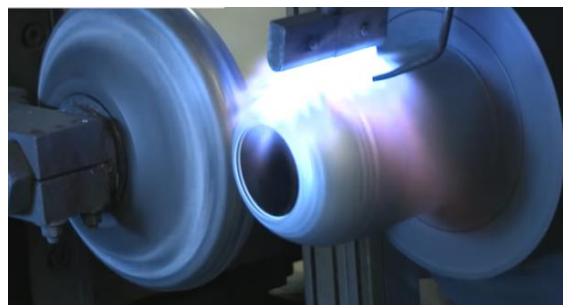
**Tabela 3.** Tehničke karakteristike polukompozitnih i kompozitnih boca MSA Auer, [36].

<b>Nazivni pritisak</b>	200 bar	300 bar
<b>Ispitni pritisak</b>	300 bar	450 bar
<b>Zapremina (u litrama)</b>	Označeno je na cilindru	
<b>Masa</b>		
<b>Materijali boce za vazduh s aluminijumskom osnovom</b>	Omotač: karbonska vlakna, staklena vlakna epoksidna smola	
<b>Materijali boce za vazduh full composite s aluminijumskim elementima</b>	Omotač: karbonska vlakna, staklena vlakna epoksidna smola, gornji dio i dno boce/cilindra od pjenastog materijala za apsorpciju udara	
<b>Namjena</b>	Posuda pod pritiskom za izolacione aparate	
<b>Sertifikat za tekućine grupa II Direktiva 97/23 EC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vazduh za disanje</li> <li>• neoksidirajući respiratorni plinovi</li> </ul>	

Osnova polukompozitnih boca, izrađuje se postupkom hladnog izvlačenja u kombinaciji sa postupkom rotacionog vrućeg valjanja (sl. 24, 25 i 26) za oblikovanje gornjeg dijela boce na kojem se ugrađuje ventil za otvaranje/zatvaranje, a zatim se na osnovu vrše naizmjenična uzdužna i poprečna namotavanja karbonskih i staklenih vlakana koja se međusobno uvezuju epoksidnim smolama.



**Slika 24.** Izrada aluminijumske osnove hladnim izvlačenjem, [43].



**Slika 25.** Izrada aluminijumske osnove rotacionim vrućim valjanjem, [43].

<sup>45</sup> **Direktiva (97/23/EC)** – odnosi se na opremu pod pritiskom, a usvojena je od strane Evropskog parlamenta i Evropskog vijeća u maju 1997. Usklađena je s direktivama koje se odnose na jednostavne posude pod pritiskom (2009/105/EC), prenosne opreme pod pritiskom (99/36/EC) i posude za aerosole (75/324/EEC).

<sup>46</sup> **Federal Institute for Material Testing, Germany** – njemački Federalni zavod za ispitivanje materijala i opreme za disanje.

<sup>47</sup> **CE (Conformité Européenne)** – evropska usklađenost je obavezna oznaka na mnogim proizvodima unutar jedinstvenog tržišta EU, koja potvrđuje da proizvod ispunjava sve zahtjeve u skladu sa evropskim direktivama, koje se odnose na sigurnost potrošača, zaštitu zdravlja i okoline.



Slika 26. Namotavanje karbonskih i staklenih vlakana na aluminijumsku osnovu, [43].

Ekstrudiranjem tople plastike izrađuje se osnova kompozitnih boca, oko koje se vrše naizmjenična uzdužna i poprečna namotavanja karbonskih i staklenih vlakana koja se međusobno uvezuju epoksidnim smolama kao i kod polukompozitnih boca (sl. 23).



Slika 27. Polukompozitna boca proizvođača MSA Auer, [36].

Polukompozitne i kompozitne boce nisu otporne na mehanička i termička oštećenja, pa se moraju stavljati u specijalne vrećice izrađene od nomeksa<sup>48</sup> koje pružaju zaštitu od površinskih mehaničkih oštećenja, toplotnog isijavanja i djelovanja hemikalija.

„Boce novije generacije posjeduju bar kodove, na kojima se mogu očitati serijski brojevi, datum proizvodnje, što je bitno prilikom ispitivanja izolacionih aparata.

<sup>48</sup> **Aramidna vlakna** – tipovi poliamidnih vlakana sa pojačanom mehaničkom otpornošću, veoma visoke temperature paljenja i velike hemijske otpornosti. Upotrebljavaju se u tekstilima od kojih se očekuju visoka zaštitna svojstva (vatrogasne zaštitne uniforme i rukavice). Trgovački nazivi su im: *Kevlin*, *Nomex*, *Twaron*, *Technora*.

Transponder frekventnog opsega 128 kHz, odnosno elektronski uređaj za prenos i razmjenu podataka, koristi se i kao baza podataka (za bocu npr; datum zadnjeg ispitivanja, datum punjenja, ukupan broj punjenja), a ugrađuje se na najnovije boce proizvođača MSA.

Zbog sigurnosti korištenja boca čeličnih, polukompozitnih i kompozitnih, iste se moraju testirati jednom godišnje (zaptivenost ventila boce) prilikom ispitivanja kompletnog izolacionog aparata, ali i nakon upotrebe u jedinicama koje posjeduju sopstveni uređaj za kompletno testiranje izolacionih aparata“, [71, 72].

Svake pete godine vrši se zamjena ventila boce i obavezno ispitivanje polukompozitnih i kompozitnih boca hladnom vodenom probom. Kako je navedeno u udvodnom razmatranju, nakon ispitivanja na bocama se obavezno posebnom bojom (koja ne rastvara epoksidne smole) upisuje datum zadnjeg testiranja (t. 4). Ovo se odnosi i na boce sa ugrađenim transponderima uz obavezno upisivanje podataka i u elektronskoj formi, [62].

**Tabela 4.** Podaci na polukompozitnim i kompozitnim bocama proizvođača MSA, [71].

Oznake	Objašnjenje
EN144-1 M18x1,5	Identifikacija boce prema EN; navoj i korak navoja
x,x kg	Masa praznog cilindra (bez ventila) u kilogramima
V: x,x l	Zapremina boce u litrama
FP xxx bei xx°C	Nazivni pritisak na XX <sup>0</sup> C
TS-xx°C/+xx°C	- Temperaturni radni opseg (-/+), <sup>0</sup> C za montažnu/sklopnu grupu (cilindar s ventilom) - Temperaturni radni opseg (-/+), <sup>0</sup> C za montažnu/sklopnu grupu (cilindar bez ventila)
PS xxx bar bei xx°C	Maksimalni dozvoljeni pritisak na XX <sup>0</sup> C
PT xxx bar	Testni pritisak (1,5 puta uvećan od nazivnog pritiska)
FIN xxxx/xx	Radni vijek cilindra godina i mjesec (ako je vijek cilindra ograničen)
e.g. AA 6061	Legura aluminijuma
Baugruppe Atemschutzgerät CE0589	Obilježavanje u skladu s Direktivom 97/23EC (PED) by BAM
CE xxxx	Proizvođač obilježava cilindar prema Direktivi 97/23EC (PED)
prEN 12245	Standardizovan dizajn
MSA AUER	Udruženje grupe proizvođača (cilindar i ventil cilindra)
xxxx/xx	Periodični pregled godina i mjesec
Serial Number	Serijski broj
Barcode	Podaci vezani za bar kod
Hazardous Material Symbol and UN 1002	U skladu sa GGVSE/ADR (drumski i željeznički transport opasnih materija u Njemačkoj i Evropi)
Name of cylinder manufacturer	Naziv proizvođača cilindra.

Na nivou EU ispitivanje boca regulisano je Direktivom o opremi pod pritiskom 97/23EC i vrši se:

- Periodično ispitivanje svake tri godine zavisno o vrsti cilindra (vizuelni pregled boce i ispitivanje boce pomoću endoskopa).
- Ispitivanje boce vodom pod pritiskom svakih pet godina (zavisno od vijeka upotrebe cilindra), [44].

Vijek trajanja boca prema ISO 11623<sup>49</sup> i ISO 6406<sup>50</sup> iznosi za:

- Kompozitne boce – 15 godina.
- Polukompozitne boce – 30 godina.
- Čelične boce – neograničen, ali se svakih pet godina vrši ispitivanje istih vodom pod pritiskom.

Poslije svake upotrebe, a neposredno prije punjenja, obavezno se vrši vizuelna kontrola čeličnih, polukompozitnih i kompozitnih boca. Ova kontrola obuhvata: pregled ventila za sve tri vrste boca, kao i pregled nastalih mehaničkih oštećenja (abrazije, udubljenja, ogrebotine).

„Oštećenja na polukompozitnim i kompozitnim bocama, svrstavaju se u tri kategorije:

- **I kategorija** – manje abrazije i rezovi kojima nisu nanosena kritična površinska oštećenja, odnosno oštećenja sloja staklenih vlakana.
- **II kategorija** – abrazije i rezovi > 25 mm. Oštećenja površinskog sloja boca moraju se sanirati i podvrgnuti ispitivanju vodom pod pritiskom.
- **III kategorija** – mehanička oštećenja koja su zahvatila sloj karbonskih vlakana. Boce/cilindri sa ovakvim oštećenjima, moraju se povući iz upotrebe“, [4].

Nastala mehanička oštećenja na polukompozitnim i kompozitnim bocama, poput ogrebotina (uzdužnih i poprečnih), kao i oštećenja nastala kao posljedica udaraca, zahtijevaju obavezno povlačenje boca iz upotrebe radi oštećenja vanjskog omotača zbog čega više nisu pouzdane za korištenje, [56].

---

<sup>49</sup> **ISO 11623:2012** – određivanje minimalnih zahtjeva za periodični pregled i ispitivanje kompozitnih boca sa aluminijumskom, čeličnom ili nemetalnom konstrukcijom oplata.

<sup>50</sup> **ISO 6406 :1997** – određivanje minimalnih zahtjeva za periodični pregled i ispitivanje čeličnih bešavnih boca za gas zapremine 0,5 do 150 l, ali se ne odnosi na boce za acetilen, aluminijumske boce i čelične zavarene boce.

### 7.1.3 Potrošnja vazduha u bocama za SCBA aparate

Jedan od važnijih faktora pri upotrebi izolacionih aparata je potrošnja komprimovanog medicinskog vazduha iz boca, koja je u zavisnosti od zapremine boce, pritiska vazduha u istoj, ali i od kapaciteta pluća i fizičkog stresa kojem je korisnik izložen. Ukoliko postoji potreba za dužim boravkom u kontaminiranoj zoni, na izolacioni aparat, pomoću „T“ umetka povezuju se dvije boce, čime se pridružava vrijeme korištenja izolacionog aparata, ali se povećanjem mase izolacionog aparata opterećuje korisnik i ubrzava njegov fizički zamor (t. 5 i 6).

Izolacioni aparat može koristiti osposobljena zdrava i punoljetna osoba (ne starija od 50 godina), [75].

**Tabela 5.** Potrošnja vazduha u boci, [10].

Pritisak (bar)	Težak rad (min)	Veoma težak rad (min)
300	30	20
250	25	16
200	20	13
150	15	10
100	10	7
50	5	3

**Tabela 6.** Potrošnja vazduha iz dvije boce, [10].

Pritisak (bar)	Težak rad (min)	Veoma težak rad (min)
300	60	30
250	50	25
200	40	20
150	30	15
100	20	10
50	10	5

„Količinu komprimovanog vazduha u boci, možemo izračunati prema formuli:

$$p \cdot V = X \text{ litara vazduha} \quad (5)$$

gdje je:

- $p$  - pritisak vazduha u boci (200 ili 300 bara, odnosno 200 000 000 ili 300 000 000 Pa).
- $V$  - zapremina boce (u litrama)“, [4].

### 7.2 Vrste boca za SCUBA aparate

Boce za komprimovani medicinski vazduh JUS i ISO 6406<sup>51</sup> za ronilačke aparate mogu biti: čelične, aluminijumske polukompozitne i kompozitne, a izrađuju se u različitim zapreminama (10, 12, 15, 18 i 20 l) sa nazivnim pritiscima 200 i 300 bar i nose CE-oznaku (sl. 28). Sastoje se od tijela boce i ventilne grupe (sl. 28 i 29).

<sup>51</sup> JUS i ISO 6406 – periodični pregledi i ispitivanje čeličnih bešavnih boca za gas.

Vijek trajanja aluminijumskih boca iznosi 15 godina i prilikom upotrebe, treba obratiti pažnju da u njihovu unutrašnjost ne dospije morska voda, jer može doći do oksidacije u unutrašnjosti boce, što dalje prouzrokuje oštećenje boce usljed degradacije materijala.

Polukompozitne boce za SCUBA aparate sastoje se od čelične boce sa stanjenom stijenkom kao osnovom, na čiju spoljašnju površinu su namotana karbonska i staklena vlakna, međusobno povezana epoksidnim smolama. Karbonska vlakna, kao ojačanja boce, namotana su od dna do vrata boce. Vijek upotrebe ovih boca iznosi takođe 15 godina.

U novije vrijeme za SCUBA aparate, upotrebljavaju se polukompozitne boce, čiju osnovu predstavlja aluminijumski cilindar. Kao i za aluminijumske boce, treba paziti da u njihovu unutrašnjost ne dospije morska voda, kako bi se izbjeglo oštećenje boce usljed degradacije materijala. Vijek upotrebe kompozitnih boca iznosio je 15 godina kao za aluminijumske i polukompozitne boce, ali je u skorije vrijeme vijek upotrebe produžen na 20 godina.

Aluminijumske, polukompozitne i kompozitne boce za SCUBA aparate dosta su lakše od čeličnih, ali i pored naprijed navedenih nedostataka, posjeduju još jedan veoma bitan nedostatak za korisnike, a to je povećavanje plovnosti korisnika prilikom upotrebe, a naročito u morskoj vodi, što povećava potrebu dodavanja olovnih tegova, te ih ronionci rjeđe koriste.



Slika 28. Čelične boce zapremine 18 i 15 l.



Slika 29. INT ventil sa oznakama na boci.

Ventilna grupa služi za povezivanje tijela boce sa hidrostatskim regulatorom, odnosno služi za otvaranje/zatvaranje dotoka komprimovanog medicinskog vazduha iz boce. Može se sastojati od jednog ili više priključaka u „INT ili Yoke“ (za pritiske do 232 bar) ili DIN (standard za 300 bar) verziji. Pomoću ventilnog mosta, boce, mogu biti linijski povezane u dvobocnik (dvije boce), trobocnik (tri boce) u zavisnosti od vremenskog intervala potrebnog za boravak ispod vodene površine ili od dubine zarona. Neki ventili posjeduju i tzv. sigurnosni disk, koji se lomi na pet trećina iznad radnog pritiska boce, a ima ulogu sprečavanja eksplozije boce usljed prepunjavanja, ili ako se ista nađe u vatri. Prilikom korištenja ventila tipa INT, treba se obratiti posebna pažnja na zaptivku („O“ ring), dok ventili tipa DIN ne posjeduju zaptivku, već se ona nalazi na priključku prvog stepena hidrostatskog regulatora.

Tijelo boce za SCUBA aparate treba čuvati od mehaničkih oštećenja, a skladište se u uspravnom položaju. Zbog sigurnosti pri korištenju boca, iste se moraju testirati jednom godišnje (zaptivenost ventila boce) prilikom ispitivanja kompletnog autonomnog ronilačkog aparata, ali i prije i nakon upotrebe (vizuelni pregled). Svake pete godine, vrši se servis ventila boce (ne vrši se zamjena ventila) i testiranje iste hladnom vodenom probom. Nakon ispitivanja, na čeličnim bocama, ukucavaju se datum zadnjeg testiranja i ispitni pritisak, dok na polukompozitnim i kompozitnim bocama iz bezbjednosnih razloga (nastaje mehaničko oštećenje plašta), ovi podaci se upisuju posebnom bojom (koja ne rastvara epoksidne smole) na tijelu boce. Na SCUBA bocama nalaze se oznake: zapremina boce u litrama, masa, serijski broj, proizvođač, godina proizvodnje, medij kojim se boca puni (vazduh, kiseonik ili mješavina drugih gasova), materijal od kojeg je boca napravljena (3AA ili 3A za čelik, 3AL za aluminijum), radni i ispitni pritisak, kao i godina posljednjeg ispitivanja, [34].

### **7.2.1 Potrošnja vazduha u bocama za SCBA aparate**

Ronjenje se može definisati kao „svaki boravak ispod vodene površine sa ili bez uslova za disanje“. Ukoliko nam nisu obezbijeđeni uslovi za disanje, tad govorimo o ronjenju na dah ili apnei, a ako su obezbijeđeni uslovi za disanje, tad govorimo o ronjenju sa ronilačkim aparatima ili uređajima. Podjela ronjenja izvršena je prema:

- Korištenoj opremi - ronjenje u: ronilačkom zvonu, čvrstom skafanderu, teškoj ili poluteškoj opremi, sa autonomnom ronilačkom opremom (ARO), na dah (apnea).



- Mediju za disanje – ronjenje sa: komprimovanim medicinskim vazduhom, obo-  
gaćenim vazduhom, gasnim mješavinama (nitrox, trimix, heliox), 100 %-tnim  
kiseonikom.
- Namjeni – rekreativno ili sportsko i profesionalno ronjenje.
- Dubini ronjenja – plitka, prosječno duboka, duboka i dubinska ronjenja.
- Uslovima ronjenja – ronjenje u: normalnim i otežanim uslovima (u: pećinama,  
ispod leda, potopljenim objektima, rijekama i jezerima, pri smanjenoj  
vidljivosti.)

Potrošnja komprimovanog medicinskog vazduha iz boca prilikom ronjenja, nije jednostavna i zavisi od nekoliko faktora: zapremine boce, minutne potrošnje, dubine ronjenja, kondicije, vrste posla koji se obavlja i sl.

Određivanje količine komprimovanog medicinskog vazduha u boci SCUBA aparata, vrši se kao i za boce SCBA aparata, prema formuli (5).

Drugi važan podatak je određivanje količine komprimovanog medicinskog vazduha iz boca koji trošimo u jedinici vremena, odnosno minutna potrošnja. Ovaj podatak je individualan i nije jednak za svaku osobu u zavisnosti od uslova pri kojima se proces disanja odvija. Eksperimentalnim putem utvrđene su vrijednosti koje se smatraju standardnim. U stanju mirovanja, čovjek, troši približno 8 l/min, a prilikom ronjenja potrošnja vazduha je znatno uvećana. Na površini mora pri apsolutnom pritisku od 1 bar, potrošnja vazduha iznosi 20 l/min, a povećanjem apsolutnog pritiska i dubine, potrošnja vazduha se povećeva. Shodno Bojll-Mariotovom zakonu uzima se da minutna potrošnja na 10 m dubine iznosi 40 l/min, na 40 m 100 l/min itd. Minutnu potrošnju određujemo prema formuli:

$$MP = P_{ATA} \cdot 20 \quad (6)$$

gdje je:

- $MP$  – minutna potrošnja.
- $P_{ATA}$  – apsolutni pritisak.
- 20 – potrošnja vazduha pri apsolutnom pritisku od 1 bar.

Znajući kolika nam je minutna potrošnja, možemo izračunati i koliko vremena ćemo moći provesti ispod površine vode pomoću slijedeće formule:

$$T = \frac{V}{MP} \quad (7)$$

gdje je:

- $T$  – vrijeme.
- $V$  – količina vazduha u boci.
- $MP$  – minutna potrošnja, [34, 94].

## 8. ODRŽAVANJE, KONTROLA I PODEŠAVANJE SCBA I SCUBA

### APARATA

Pregled i atestiranje kompletnog izolacionog aparata na području Republike Srpske, odnosno Bosne i Hercegovine vrši se na osnovu Naredbe o obaveznom atestiranju aparata za zaštitu organa za disanje "Službeni list SFRJ" br: 49/87, a obavljaju ih nadležne institucije, koje nakon pregleda istih izdaju upotrebne dozvole.

Svaki proizvođač izolacionih aparata, propisuje svoje metode (procedure), koje su međusobno usaglašene na nivou Evropske unije i međusobno se razlikuju u zavisnosti od tehničko-tehnoloških karakteristika izolacionog aparata.

#### 8.1 Rokovi za održavanje i kontrolu

Ovi rokovi, mogu se po potrebi sprovesti i prije propisanih rokova, ukoliko je na izolacionim aparatima bilo vanrednih popravki i zamjena dijelova, sa preporukama od strane proizvođača i udruženja: Interspira, MSA, Vfdb 0804<sup>52</sup> i BGR 190<sup>53</sup> (t. 7, 8 i 9).

Naročitu pažnju treba obratiti tokom vizuelne kontrole izolacionih aparata na primopredaji smjena u vatrogasnim jedinicama koja se vrši prilikom svakodnevnog pregleda kompletne opreme i vozila.

„Nakon upotrebe, odnosno povratka s intervencije, potrebno je izvršiti:

- Zamjenu korištenog, drugim izolacionim aparatom (ukoliko jedinica ima dovoljan broj izolacionih aparata).
- Zamjenu potrošenih boca sa punim (iz rezerve koju bi svaka jedinica morala posjedovati).
- Zamijenjeni izolacioni aparat treba kompletan detaljno pregledati i očistiti (ovlaštena osoba u jedinici).

---

<sup>52</sup> **vfdb 0804 (Vereinigung zur Förderung des Deutsches Brandschutzes)** – njemačko Udruženje za promovisanje zaštite od požara; Direktiva o održavanju opreme za zaštitu organa za disanje u vatrogasnim jedinicama, a odnosi se na pranje, čišćenje i dezinfekciju.

<sup>53</sup> **BGR 190 (Berufsgenossenschaftliche Regeln)** – njemačko Udruženje za razmjenu pravila za sigurnost i bezbjednost na radu, izbor i upotrebu opreme za zaštitu organa za disanje (IA), ali se ne odnosi na upotrebu respiratora u vatrogasnim jedinicama.

- Po potrebi (ukoliko se izolacioni aparat koristio u nekakvoj agresivnoj sredini) rastaviti i oprati plućni automat u sredstvima prema preporuci proizvođača. (ovlaštena osoba u jedinici).
- Pranje, dezinfikovanje i pakovanje maske u najlonsku vrećicu, kako bi se znalo da je ista sigurna za slijedeću upotrebu (ovlaštena osoba u jedinici)“, [4].

**Tabela 7.** Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja po preporuci proizvođača Interspiro, [52].

Aparat/komponenta		Prije upot.	Poslije upot.	Svake godine	Svake 2 godine	Svaki 5 godina
<b>1. Izolacioni aparat (komplet)</b>		<b>S</b>	<b>D*+S</b>	<b>F</b>		<b>F</b>
<b>2. Nosač aparata</b>			<b>C+V</b>		<b>V</b>	
<b>3. Regulator pritiska, vazдушna instalacija i akustični uređaj</b>	3.1 Sastavne komponente					<b>R</b>
	3.2 Konekcija visokog pritiska i "O" zaptivači		<b>V</b>		<b>R</b>	
	3.3 Ulazni filter				<b>R</b>	
<b>4. Vazдушna instalacija</b>	4.1 Crijevo visokog pritiska		<b>V</b>	<b>V</b>		<b>V</b>
	4.2 Crijevo srednjeg pritiska		<b>V</b>	<b>V</b>		<b>V</b>
<b>5. Maska i plućni automat</b>			<b>D</b>	<b>V</b>		
5.1 Membrana				<b>V</b>		
5.2 Izdisajni ventil				<b>V</b>		
5.3 Govorna membrana				<b>V</b>		
5.4 Sastavne komponente						<b>R</b>
<b>6. Ventil boce/cilindra</b>			<b>V</b>			
6.1 Sastavne komponente						<b>R</b>
<b>7. Spoj boce/cilindra</b>			<b>V</b>	<b>Periodično testiranje u skladu s nacionalnom regulativom</b>		

**V** – Visual inspection (renew if necessary\*) → vizuelni pregled (po potrebi zamijeniti\*).

**C** – Cleaning → čišćenje.

**D** – Cleaning and disinfection → čišćenje i dezinfekcija.

**S** – Short user test → kratki korisnički test.

**F** – Full inspection and performance test → potpuni pregled i test performansi.

**R** – Renew → zamjena.

**Tabela 8.** Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja po preporuci proizvođača MSA Auer, [65, 66,70].

Aparat/komponenta	Vrsta zahvata	Prije upot.	Poslije upot.	Svake godine	Svake 3 godine	Svakih 9 godina <sup>1</sup>
<b>Izolacioni aparat (komplet)</b>	Čišćenje		X		X	
	Provjera funkcija		X	X		
	Provjera od strane korisnika <sup>2</sup>	X				
<b>Osnova aparata bez cilindra i plućnog automata</b>	Servis					X
<b>Alfa klik spojka</b>	Čišćenje		X			
	Podmazivanje			X <sup>3</sup>		
	Provjera korisnika	X				
<b>Cilindar s ventilom</b>	Kontrola pritiska punjenja	X				
	Pregled ovlaštene osobe	Pogledati upotrebu cilindra za komprimovani medicinski vazduh. Molimo da se poštuju nacionalni propisi!				
<b>Plućni automat</b>	Čišćenje i dezinfekcija		X			X
	Provjera funkcije		X <sup>5</sup>		X	
	Zamjena dijafragme					X
	Servis					X

1. Za SCBA aparate koji se često koriste, preporučuje se kompletna rekonstrukcija nakon cca 540 časova. Na primjer, ovo odgovara količini od 1080 aplikacija u trajanju po 30 minuta.
2. Provjere se vrše sa odgovarajućim plućnim automatima i ako je potrebno sa odgovarajućim maskama za cijelo lice.
3. Za SCBA aparate koji se često koriste, preporučuje se podmazivanje nakon cca 500 ciklusa spajanja.
4. Gumeni dijelovi različitih komponenti su podložni starenju u skladu s lokalnim uslovima i trebaju se provjeriti i zamijeniti u redovnim intervalima.
5. Vizuelni pregled dijafragme nakon upotrebe u agresivnim sredinama ili pod ekstremnim uslovima, konstantan test funkcije i nepropusnosti.

**Tabela 9.** Vrste i rokovi održavanja, kontrole i čišćenja prema normama: vfdb 0804 i BGR 190, [65].

Aparat/komponenta	Vrsta zahvata	Prije upot.	Poslije upot.	Svaki 6 mjeseci	Svake godine	Svaki 6 godina <sup>1</sup>
<b>Izolacioni aparat (komplet)</b>	Čišćenje		X		X	
	Provjera funkcija		X	X		
	Provjera od strane korisnika <sup>2</sup>	X				
<b>Osnova aparata bez cilindra i plućnog automata</b>	Servis					X
<b>Cilindar s ventilom</b>	Kontrola pritiska punjenja	X				
	Pregled ovlaštene osobe	Pogledati upotrebu cilindra za komprimovani medicinski vazduh. Molimo da se poštuju nacionalni propisi!				
<b>Plućni automat</b>	Čišćenje i dezinfekcija		X		X	
	Provjera funkcije		X <sup>4</sup>	X		
	Zamjena dijafragme				X <sup>5</sup>	X <sup>6</sup>
<b>Plućni automat</b>	Servis					X

1. Intervali za testiranje, prema vfdb 0804 i BGR 190 za SCBA aparate koji se često koriste, preporučuje se da se sprovedu i prije intervala navedenog u tabeli.
2. Provjere se vrše sa odgovarajućim plućnim automatima i ako je potrebno sa odgovarajućim maskama za cijelo lice.
3. Gumeni dijelovi različitih komponenti su podložni starenju u skladu s lokalnim uslovima i trebaju se provjeriti i zamijeniti u redovnim intervalima.
4. Vizuelni pregled dijafragme nakon upotrebe u agresivnim sredinama ili pod ekstremnim uslovima, konstantan test funkcije i nepropusnosti.
5. Za plućne automate za koje se vizelni test ne sprovodi nakon upotrebe.
6. Za plućne automate za koje se vizelni test sprovodi nakon upotrebe.

Numeričke vrijednosti na uređajima za testiranje i kalibraciju pojedinih komponenti predstavljaju parametre kojima se ocjenjuje spremnost za upotrebu izolacionog aparata i od njih zavisi sigurnost i pouzdanost prilikom upotrebe izolacionog aparata. Ovi testovi su potpuno automatizovani, čime se postiže veća brzina i pouzdanost tokom testiranja kompletnog izolacionog aparata, [55, 67].

Prije testiranja, sve komponente izolacionog aparata moraju biti čiste. Naročitu pažnju obratiti na čistoću maske i plućnog automata, koji se peru specijalnim sredstvima za čišćenje i

dezinfekciju u mlakoj vodi, koje se može vršiti ručno ili u ultrazvučnim kadama. Prilikom pranja i čišćenja maski i plućnih automata, ne smiju se koristiti agresivna sredstva, poput alkohola, benzina, acetona, razređivača i sl; [46, 69, 74].

Nakon pranja maski i plućnih automata namjenskim sredstvima, isti se moraju dobro ispirati u mlakoj vodi, jer se vremenom sredstva za čišćenje i dezinfekciju koncentrišu u materijalu od kojeg su izrađene maske (prirodna guma ili silikon), što kod korisnika može dovesti do pojave nelagodnosti pri korištenju i izazvati iritacije kože lica, a u materijalu degradaciju, čime se skraćuje vijek korištenja istih. Naročitu pažnju treba obratiti prilikom sušenja maski u sušačima, da temperatura sušenja ne prelazi 60° C.

## **8.2 Pregled i kontrola autonomne ronilačke opreme na komprimovani medicinski vazduh**

U cilju bezbjednosti i djelotvornosti ronilaca, neophodan je neprekidan nadzor nad tehničkim stanjem ronilačkih aparata i pomoćne opreme za ronjenje.

Nažalost, kod nas ali i u Republici Srbiji ne postoji zvaničan pravilnik o ispitivanju autonomne ronilačke opreme na komprimovani medicinski vazduh.

Prema Priručniku za profesionalna i vojna ronjenja, autora prof. dr Stracimira Gošovića, obrađeno je i jedno poglavlje, koje se odnosi na kontrolu ronilačkih aparata i pomoćne opreme za ronjenje i koje, između ostalog obuhvata pregled i ispitivanje autonomne ronilačke opreme na komprimovani medicinski vazduh.

Kontrola i tehnički pregledi ronilačke opreme, dijele se na redovne i vanredne.

Redovni pregledi podrazumijevaju pregled opreme tokom pripreme za ronjenje, a dijele se na mjesečne i godišnje, dok se vanredni pregledi vrše po potrebi, odnosno u zavisnosti od uočenih nedostataka ili otkaza u sistemu.

### **8.2.1 Pregled u pripreмноj fazi za ronjenje**

Tokom pripreme ronilaca za ronjenje autonomnom ronilačkom opremom na komprimovani medicinski vazduh, kontrolama je obuhvaćano:

- Pregled kompletnosti ronilačkog aparata (boca, manometar, regulator i kompenzator plovnosti), ronilačke opreme (peraja, sat, kompas, dubinomjer) i pomoćne opreme (dekompresione tablice, bova, zastavica, ronilački nož, lampa) prema listi provjere.
- Probu disanja s kontrolom regulatora, ventilnog kućišta i crijeva za disanje, pri kojem disanje na normalnom pritisku treba biti bez otpora.
- Kontrolu pritiska u bocama i eventualno dopunjavanje komprimovanog medicinskog vazduha do optimalnog pritiska. Pritisak u boci prije zaranjanja kod radnih ronjenja ne smije biti ispod 80 % od maksimalnog radnog pritiska. Pri ronjenjima u bazenima (prilikom obuke), pritisak u boci ne smije biti niži od 100 bar, te boravak u vodi treba uskladiti sa količinom vazduha u boci.
- Probu zaptivenosti aparata, pri otvorenom i zatvorenom ventilu boce, a izvodi se potapanjem boca u posudu s vodom. Ronilački aparat je vodonepropustan, ako se na površini posude s vodom ne pojavljuju vazdušni mjehuri. Tokom ispitivanja, usnik dvocrijevnih regulatora, treba biti niže od regulatora, kako iz njega ne bi izlazio vazduh.
- Kontrolu funkcionisanja dugmeta na II stepenu jednocrijevnih regulatora.
- Kontrolu nepovratnih ventila udaha i izdaha kod dvocrijevnih regulatora.
- Provjeru zaptivenosti maske.
- Pregled kompletnosti i ispravnosti remnika i sigurnosnih kopči za nošenje ronilačkog aparata.
- Kontrolu regulatora plovnosti.
- Upisivanje podataka o ronjenju i eventualnih dekompresijskih režima na mobilnoj ploči za pisanje.
- Kontrolu ispravnosti i količine pomoćne opreme.
- Usklađivanje časovnika ronioca sa časovnikom vođe ronjenja, [25, 26].

### **8.2.2 Godišnji pregled**

Godišnji pregled obuhvata tehnički pregled (kalibracija mali servis) u ovlaštenoj radionici prema uputstvima proizvođača opreme. Ukoliko proizvođač opreme u svojim uputstvima nije naveo procedure, tehnički pregled obuhvata:



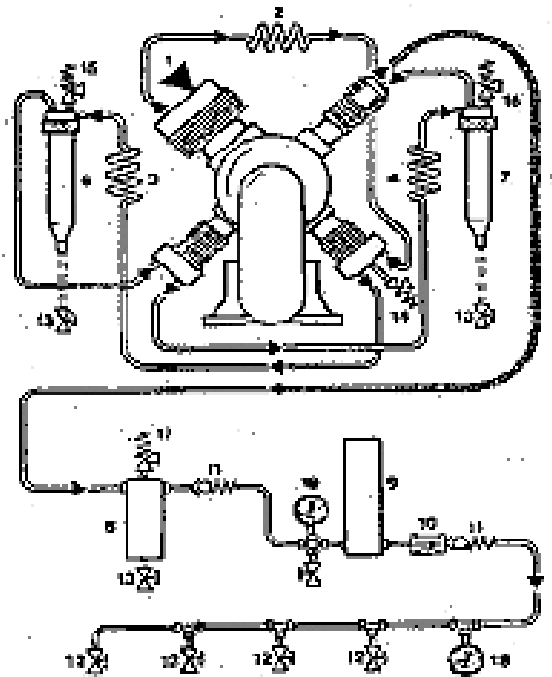
- Rasklapanje regulatora, sistematski pregled i čišćenje dijelova, te njegovo ponovno sklapanje.
- Kontrolu hidrostatskog regulatora na ispitnom stolu.
- Zamjenu nepovratnih ventila udaha i izdaha na dvocrijevnim regulatorima, odnosno, ventila izdaha na jednocrijevnim regulatorima.
- Kontrolu i eventualnu zamjenu primarne i sekundarne opruge u II stepenu usnih regulatora.
- Zamjenu usnika, ako je oštećen ili istrošen.
- Provjeru ili eventualno regulisanje segurnosnog ventila na I stepenu jednocrijevnih regulatora na tipovima gdje je taj ventil ugrađen (zavisno o tipu regulatora, on osciluje od 10 do 17 bar).
- Pregled unutrašnjosti boca i čišćenje po potrebi.
- Pregled vanjske antikorozivne zaštite boca, skidanje starog sloja i nanošenje novog sloja boje po potrebi.
- Ispitivanje tačnosti dubinomjera u rekompresionoj ili vodenoj komori za ispitivanje dubinomjera.
- Pregled ispravnosti kompenzatora plovnosti, ventila za izduvavanje i uduvavanje komprimovanog medicinskog vazduha, adaptera za disanje u slučaju nužde uz zamjenu dijelova po potrebi, [25, 26].

### **8.2.3 Vanredni pregled**

Vanredni pregled, vrši se nakon uočenih tehničkih problema, neispravnosti ili zbog ronjenja u kojima je došlo do incidenta ili nezgode, [25, 26, 34].

## 9. KOMPRESORI VISOKOG PRITISKA

Za punjenje boca SCBA i SCUBA aparata komprimovanim medicinskim vazduhom, koriste se kompresori visokog pritiska (sl. 30) proizvođača: Bauer, Oto Nemeč, MSA, Nardi i dr; sa radnim pritiscima 225 i 330 bar.



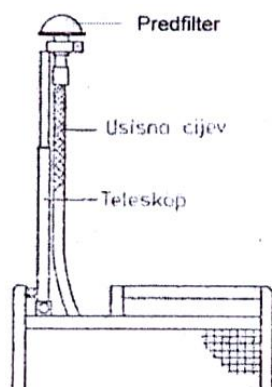
Slika 30. Četvorocilindrični-četvorostepeni kompresor, [80].

1. usis; 2, 3, 4. međustepeni hladnjak; 5. hladnjak IV stepena; 6, 7. međustepeni filteri; 8. finalni separator ulja i vode; 9. fini filter; 10. ventil za održavanje pritiska; 11. nepovratni ventil; 12. ventili za punjenje; 13. ventili za ispuštanje kondenzata; 14. sigurnosni ventil I stepena; 15. sigurnosni ventil II stepena; 16. sigurnosni ventil III stepena; 17. sigurnosni ventil radnog pritiska; 18, 19. manometar.

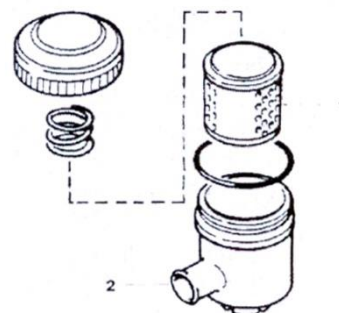
Kompresorsku jedinicu visokog pritiska čine:

- Ram kompresora – obezbeđuje njegovo prenošenje, smještaj i bezbjedan rad,
- Kompresorski blok – izrađuju se kao trocilindrični-trostepeni, trocilindrični-četvorostepeni, četvorocilindrični-četvorostepeni,
- Sistem za podmazivanje – pokretnih dijelova vrši se na tri načina: zapljuskivanje (bućkanjem), pumpom visokog pritiska (kompresori starije generacije i kompresori većih kapaciteta, pritiska ulja 40-60 bar), pumpom niskog pritiska (na kompresorima novije generacije 4-6 bar.),
- Sistem za filtriranje – jedna od najvažnijih jedinica kompresora. Ovaj sistem, sastoji se od:

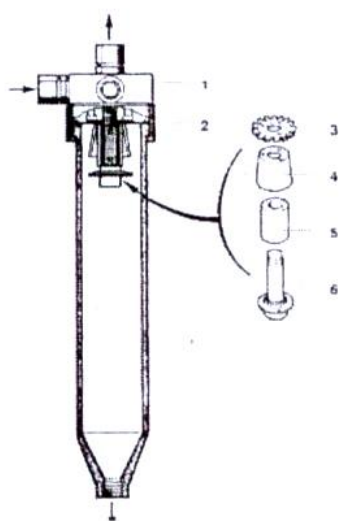
- Prefiltera (sl. 31) za odstranjivanje krupnijih čestica prljavštine i prašine u vazduhu iz okoline,
- Mikronskog usisnog filtera (sl. 32) za odstranjivanje čestica veličine do 10 mikrona (zamjenjivi filter uložak od finog kartona),
- Međustepenog filtera (sl. 33) za odstranjivanje mehaničkih nečistoća, uljnih i vodenih isparenja (sinter metalni filter), centrifugalnim nakupljanjem nečistoća i isparenja, koje se talože, a zatim dreniraju preko ispusnog ventila,
- Finalnog separatora ulja i vode (sl. 34) za odstranjivanje mehaničkih nečistoća, ulja i vode (sinterovani metalni filter uložak),
- Finalnog filter sistema (sl. 35 i 36) tipa DUPLEX i TRIPLEX u kojem se hemijskim putem odstranjuju vlaga i gasoviti polutanti.



Slika 31. Prefilter. [80]

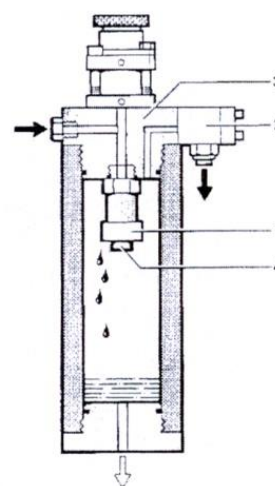


Slika 32. Mikronski usisni filter. [80]



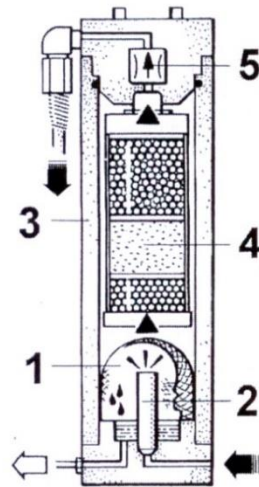
Slika 33. Međustepeni filter.

(1. glava filtera, 2. spojna navrtka, 3. vrtložna pločica,  
4. konusni usmjerivač, 5. sinter filter element,  
6. centralni vijak), [80].



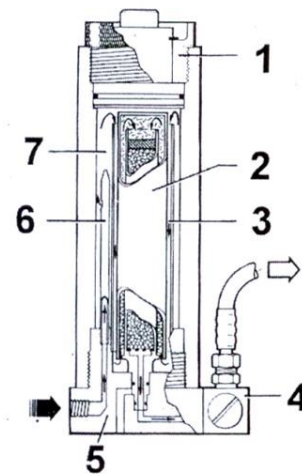
Slika 34. Finalni separator ulja i vode.

(1. sinter filter element, 2. ventil održavanja  
pritiska, 3. glava separatora, 4. centralni vijak), [80].



**Slika 35.** DUPLEX filter sistem.

(1. separator, 2. raspršivač, 3. tijelo filtera, (1. glava filtera sa sig. vent. kon. pritiska, 2. filter patrona 4. filter patrona, 5. ventil za održavanje pritiska), [80].

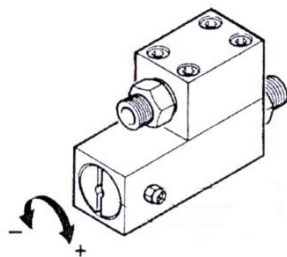


**Slika 36.** TRIPLEX filter sistem P 21.

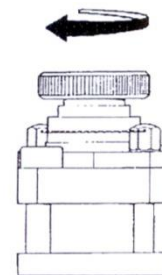
(1. glava filtera sa sig. vent. kon. pritiska, 2. filter patrona 3. unutrašnja cijev, 4. ventil za održav. prit; 5. tijelo filtera, 6. raspršivač, 7. separator), [80].

○ Sistem za punjenje čine:

- Ventil za održavanje pritiska (nepovratni ventil; sl. 37) ima ulogu održavanja pritiska u filterima od samog ulaza komprimovanog medicinskog vazduha do njegovog izlaza iz kompresora, a podešava se na pritisak cca 150 bar,
- Sigurnosni ventili (sl. 38) za zaštitu svakog stepena kompresora. Podešenost sigurnosnih ventila je slijedeća: I stepen, 5÷8 bar; II stepen, 24÷26 bar; III stepen, 60÷95 bar; IV stepen, 225 ili 330 bara (u zavisnosti od radnog pritiska kompresora).
- Ventil za punjenje (sl. 39) izvodi se u dvije konstrukcije verzije kao ventil s manometrom (najčešće kod mobilnih kompresora) i ventil na tzv. "kipanje" (kod stacionarnih kompresora), [15, 80].



**Slika 37.** Nepovratni ventil, [59].



**Slika 38.** Sigurnosni ventil, [59].



**Slika 39.** Ventili za punjenje „na kipu“, sa po dva ventila 200 bar (crni) i 300 bar (crveni).

Prostorija u kojoj je smješten kompresor (kompresorska stanica), mora biti provjetrena, čista i adekvatno osvijetljena, a manipulativni prostor oko kompresora mora biti prohodan, [81].

Kompresor visokog pritiska za komprimovni medicinski vazduh sa neispravnim sigurnosnim ventilom, **ne smije se koristiti**. Takođe se ne preporučuje ispuštanje kondenzata kod pritiska preko 100 bar zbog mogućeg oštećenja dijelova ventila.

Neposredno pred puštanje u rad kompresora visokog pritiska i kompresorskih postrojenja, ali i nakon izvršenih servisa na istim, mora se prekontrolisati rad svih bezbjednosnih i zaštitnih uređaja u sistemu.

Najveće dozvoljene vrijednosti na mjernim instrumentima kompresora, moraju biti označene crvenom bojom.

## 10. POSUDE POD PRITISKOM

U eksploataciji, posude pod pritiskom, sa aspekta bezbjednosti predstavljaju specifičnu energetska opremu. Mogu biti stabilne i pokretne.

„Stabilne posude pod pritiskom su posude pod pritiskom tečnih, komprimovanih i pod pritiskom rastvorenih gasova, vazduha ili pregrijanih tečnosti koje ne mijenjaju mjesto od punjenja do pražnjenja“, [81]. Pravilnikom o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom (Sl. list SFRJ broj: 16/83) definisano je projektovanje, izrada i upotreba stabilnih posuda pod pritiskom.

Pokretne posude pod pritiskom su posude pod pritiskom tečnih, komprimovanih i pod pritiskom rastvorenih gasova, ili vazduha koje mijenjaju mjesto od punjenja do pražnjenja i nazivaju se boce, ako im je prečnik manji od 420 mm, a dužina manja od 2000 mm. Takođe, pokretne posude pod pritiskom, mogu biti burad sa ugrađenim prstenovima za kotrljanje i posude proizvodnih dimenzija, koje su ugrađene na vozilima i namijenjene za transport.

Posude pod pritiskom, mogu se naći u svim granama industrije, a raspolažu određenom akumulisanom energijom, koja je predstavljena parametrima energetskog medijuma kojim su ispunjene. U slučaju otkaza na posudi pod pritiskom ili eksplozije, nastaju razarajući efekti (sl. 69 i 70), oštećenja na objektu i instalaciji uz pojavu rizika po živote i zdravlje ljudi koji se nalaze u neposrednoj blizini. Ukoliko je medij koji se nalazi u posudi pod pritiskom klasifikovan u kategoriji opasnih materija, tada je rizik po okolinu daleko veći, [28].



**Slika 40.** Eksplozija čelične boce IA prilikom punjenja na kompresoru, [35].



**Slika 41.** Posljedica eksplozije čelične boce IA, [35].

U skladu sa SRPS M. E2. 150:1985<sup>54</sup>, izvršena je podjela posuda pod pritiskom prema: zapremini, debljini zida, pritisku, temperaturi, akumuliranoj energiji (pV), agregatnom stanju radne materije, fizičko-hemijskom stanju radne materije, materijalu od kojeg su izrađene, tehnologije izrade i spajanja, namjeni, obliku i konstrukciji.

Standardom SRPS M. E2. 151:1982<sup>55</sup> utvrđene su klase posuda pod pritiskom na osnovu rizika po ljude, okolinu i materijalna sredstva. Višoj klasi odgovara manji rizik kritičnog otkaza, odnosno veća vjerovatnoća pouzdanog funkcionisanja. Zbog loma jednog dijela pod pritiskom (plašt, dance, cijev ili priključak) ili popuštanja vijaka za zatvaranje glavnih dijelova posude, nastaje kritični otkaz zbog čega dolazi do naglog oslobađanja veće količine radne materije iz posude u okolinu, [81].

„Klase mogu biti:

- Projektna (zahtijevani nivo pouzdanosti),
- Trenutna (trenutni nivo pouzdanosti),
- Izvedena (ostvareni nivo pouzdanosti poslije izrade ili montaže, ali prije upotrebe)“, [81] .

Prije početka upotrebe posude, izvedena i trenutna klasa, ne smiju biti niže od projektne klase.

Prilikom izrade posuda pod pritiskom, u zavisnosti od vrste, namjene i klase posude, vrše se proračuni na slijedeća opterećenja:

- Mirna, koja su prouzrokovana unutrašnjim ili spoljnim pritiskom,
- Dinamička ili udarna, uključujući nagle promjene pritiska,
- Prouzrokovana statičkim pritiskom radne materije,
- Izavana vlastitom masom i masom radne ili ispitne materije.
- Izazvana priključnim cjevovodima, radnom opremom, izolacijom, zaštitnim oblogama protiv korozije i erozije, drugim posudama ili udarima vjetra.
- Na naprezanja izazvana temperaturnim poljem,
- Usljed seizmičkih aktivnosti,
- Na lokalna naprezanja na priključnim mjestima,
- Unutrašnjih dijelova (npr: snopovi cijevi, nosive ploče i dr.),

---

<sup>54</sup> SRPS M. E2. 150:1985 – Posude pod pritiskom (vrste).

<sup>55</sup> SRPS M. E2. 151:1982 – Posude pod pritiskom (određivanje klase posude).

- Postolja i dijelova za fiksiranje i nošenje (npr: nosivi prstenovi, zakačke i sl.),
- Naglih promjena oblika i nosivih presjeka,
- Na nestabilnost oblika pri spoljašnjem pritisku,
- Prouzrokovana sopstvenim vibracijama, ili vibracijama dodatnih uređaja.

Svaka posuda pod pritiskom mora biti opremljena sa:

- Opremom za punjenje i pražnjenje, čija je namjena odvajanje posude od cjevovoda za dovod, odnosno odvod radne materije; ispuštanje sadržaja posude ili nastalog kondenzata, kada se ispuštanje sadržaja posude ne može vršiti predviđenim uređajem za ispuštanje sadržaja posude,
- Sigurnosnom opremom: manometrom za očitavnje radnog pritiska, sigurnosnim uređajem – regulatorom radnog pritiska i termometrom (po potrebi).

U zavisnosti od namjene, vrste i klase posude pod pritiskom, a u svrhu povećanja bezbjednosti, posude se mogu opremiti i dodatnom opremom: ventilacionim uređajima; redukcionom stanicom pritiska ili temperature (ukoliko radna materija ima viši pritisak ili temperaturu, nego što je predviđeno radnim uslovima); uređajem za ispitivanje sadržaja radne materije (ako ta materija predstavlja opasnost pri otvaranju revizionog otvora); pokazivačem nivoa (za posude zagrijavane vrelinim gasovima); nepovratnim ventilom (koji automatski, pritiskom iz posude zatvara dovodni ventil od pumpe ili kompresora); pokazivačem nivoa tečnosti i zapornim ventilom u slučaju loma cijevi.

Oprema posuda pod pritiskom mora ispunjavati uslove za sigurno i bezbjedno funkcionisanje posuda i biti dostupna prilikom upotrebe, kontrole i održavanja. Navedena oprema mora: odgovarati proračunskom pritisku i temperaturi, odnosno nazivnom pritisku, kao biti i zaštićena od nastanka eventualnih oštećenja i osigurana od neovlaštene zamjene, [29].

Svaka posuda pod pritiskom mora posjedovati manometar kojim se vrši kontrola radnog pritiska na kojem se nalazi žig ovlaštene ustanove za kontrolu tih mjerila. Za posude priključene na više radnih prostora sa različitim radnim pritiscima, manometar se postavlja za svaki radni prostor. U slučaju da je više posuda pod istim radnim pritiskom priključeno na jedan dovod pritiska, a da nema drugog izvora pritiska u nekoj od tih posuda, omogućeno je postavljanje jednog manometra za jedan zajednički dovod.



Ugradnja manometra, po pravilu, vrši se preko trokrake slavine ili trokrakog ventila, kako bi se omogućilo postavljanje kontrolnog manometra ili omogućila zamjena manometra u toku rada posude.

Na posudama sa radnim pritiskom većim od 25 bar, radnom temperaturom većom od 25° C ili ako je radna materija u posudi otrovna, eksplozivna ili rashladna, umjesto trokrake slavine, postavlja se poseban priključak sa uređajem za zatvaranje zbog priključivanja drugog manometra.

Na skali, odnosno brojčaniku ugrađenog manometra, najveći radni pritisak, obilježava se crvenom linijom ili s fiksnom kazaljkom takođe crvene boje, a mjerna skala mora se očitavati sa mjesta posluživanja posude. Materijali od kojih se izrađuju manometri, moraju obezbijediti njegovu otpornost na djelovanje radne materije i okoline.

Svaka posuda pod pritiskom, mora posjedovati najmanje jedan sigurnosni uređaj, kojim se nedozvoljava prekoračenje maksimalnog radnog pritiska ili temperature. Ako je više posuda pod pritiskom vezano u seriju bez uređaja za zatvaranje, između njih se postavlja jedan sigurnosni uređaj za cijelu grupu posuda.

Sigurnosni ventili sa utegom, oprugom ili oni koji rade na principu djelovanja radne materije, a izuzetno na principu djelovanja pomoćne energije uz uslov da obezbjeđuju dovoljan stepen sigurnosti u uslovima pod kojima se upotrebljava posuda, upotrebljavaju se u zaštiti od prekoračenja radnog pritiska.

Više posuda koje rade pod jednakim radnim pritiskom, opremaju se jednim redukcionim uređajem s manometrom i sigurnosnim uređajem, a ugrađuju se na zajedničkom glavnom vodu prije prvog ogranka. Ukoliko je isključena mogućnost povećavanja radnog pritiska u posudama, nije obavezna ugradnja manometra ili sigurnosnog uređaja.

Redukcioni uređaji za obezbjeđenje prekoračenja dozvoljenog pritiska ugrađuje se u slučaju da je radna temperatura u posudi pod pritiskom, niža od temperature izvora radne materije.

Posude pod pritiskom, postavljaju se tako da je na njima moguće izvršiti pregled, remont ili čišćenje s vanjske ili unutrašnje strane, dok se njihova ugradnja može vršiti samo na osnovu tehničke dokumentacije postrojenja u čijem se sastavu posuda koristi. Ukoliko ne posjeduju tehničku dokumentaciju, iste se ne smiju isporučivati, niti upotrebljavati.

Natpisnim tablicama, koje moraju biti čiste, čitke i otporne na uticaj sredine, obilježavaju se posude pod pritiskom, a sadrže podatke, [81]:

- „Naziv proizvođača i mjesto,
- Fafrički broj posude,
- Klasa posude,
- Godina proizvodnje,
- Najveći radni pritisak u barima svakog radnog prostora,
- Najveća temperatura u ° C svakog radnog prostora,
- Zapremina u dm<sup>3</sup> ili m<sup>3</sup> svakog radnog prostora“, [81].

Mjerni uređaji posuda pod pritiskom moraju uvijek biti u ispravnom stanju, a na vidljivom mjestu postavljaju se uputstva i postupci za preduzimanje hitnih mjera u slučaju vanrednog događaja, ukoliko je sadržaj posuda opasan po okolinu.

Svako izmiještanje posude pod pritiskom, remont, popravke, izmjena dijelova, kao redovni ili vanredni pregledi, moraju biti uneseni u tehničku dokumentaciju uz odgovarajuće podatke i dokaze.

Pregled konstrukcije još neobojene posude po završetku izrade, vrši se neposredno kod proizvođača, kojim se konstatuje da li upotrijebljeni materijal, tehnologija izrade, kao i izrada posude u potpunosti odgovara proračunima i tehničkoj dokumentaciji, a njim je obuhvaćena: provjera dimenzija, smještaj revizionog otvora, priključaka, oslonaca, kvaliteta zavarenih spojeva, termička obrada, oznake i cjelokupna montaža. Prvo ispitivanje pritiskom, vrši se takođe kod proizvođača, ili na mjestu ugradnje, [81]. Tokom eksploatacije vrši se ispitivanje pritiskom, koje može biti redovno ili periodično.

### **10.1 Pokretne posude pod pritiskom**

Kako je naprijed navedeno, izrada i upotreba punjivih pokretnih posuda pod pritiskom, definisana je zakonskom regulativom kojom su obuhvaćeni materijali od kojih se iste izrađuju, kao i proračuni na čvrstoću, otvori (ulazni i kontrolni), način kontrole, tehničke obrade i sl; [76].

Posude pod pritiskom, koje mijenjaju mjesto od njihovog punjenja do pražnjenja, nazivaju se pokretne posude pod pritiskom, a razlikujemo:

- Boce – čiji je prečnik manji od 420 mm, a dužina manja od 2000 mm.
- Burad – sa ugrađenim prstenovima za kotrljanja proizvoljnih dimenzija, zapremine od 100 do 1000 l.
- Posude (kontejneri) – proizvoljnih dimenzija, namijenjene za transport vozilima.

Na vratu prenosnih posuda pod pritiskom, postavlja se ojačanje sa spoljnim navojem za ojačavanje grla, na koje se postavljaju zaštitne kape (izuzetak su boce izolacionih, ronilačkih i protivpožarnih aparata). Prenosne posude pod pritiskom, moraju imati takvo dno da mogu stojati u uspravnom stanju (npr. prenosni aparati za gašenje požara), izuzev boca izolacionih ili ronilačkih aparata. Svaka prenosna posuda pod pritiskom mora imati najmanje jedan ventil za zatvaranje, dok je za baterije posuda dovoljan i jedan ventil, koji mora biti zaštićen od mehaničkih oštećenja, [81].

U zavisnosti od materije kojom će se puniti, obilježavaju se različitim bojama:

**Tabela 10.** Označavanje boca bojom u zavisnosti od vrste gasa kojim su ispunjene, [81].

Vrsta gasa	Boja
Acetilen	Zelena
Hlor	Bijela
Propan-butan	Narandžasta
Svi ostali zapaljivi gasovi	Žuta
Kiseonik	Plava
Svi ostali nezapaljivi gasovi	Tamno-siva
Aparati za gašenje požara	Crvena
Komprimovani medicinski vazduh (izolacioni aparati)	Vrat boce crno-bijela, na podlozi plave, žute, bijele, smeđe ili crne boje

Svaka prenosna posuda pod pritiskom (izuzev polukompozitnih i kompozitnih boca za izolacione aparate, na kojima su podaci upisani na trake ispod epoksidne smole) ili natpisna pločica mora imati utisnute slijedeće oznake:

- Naziv proizvođača ili njegov registrovani znak,
- Fabrički broj posude,
- Godinu proizvodnje,
- Naziv gasa kojim se puni (naziv ne smije biti označen samo hemijskom formulom),
- Masu prazne posude u kilogramima (bez zaštitne kape, a za rastvoreni acetilen, bez kape sa poroznom masom, acetonom i ventilom),
- Zapreminu posude u litrama,

- Probni pritisak u barima.
- Žig toplotne obrade.
- Žig nadležnog organa sa datumom posljednje kontrole.

Pored navedenih oznaka, moraju posjedovati i ostale podatke:

- Najveći dozvoljeni pritisak u barima za komprimovane gasove,
- Najveća dozvoljena masa punjenja u kilogramima za tečne gasove i amonijak rastvoren pod pritiskom,
- Oznake porozne mase i rastvarača; žig proizvođača porozne mase; masu boce sa ventilom, poroznom masom i rastvaračem bez kape; najveći dozvoljeni pritisak punjenja i žig nadležnog organa sa datumom pregleda poslije punjenja boce poroznom masom; za sudove sa rastvorenim acetilenom [35, 81].

Izmjene oznaka i natpisa, može se vršiti samo na praznim posudama uz odobrenje nadležnog organa.

Posude pod pritiskom, mogu se puniti samo gasom za koji su namijenjene, koje su pregledane, ispitane i kojima nije istekao rok upotrebe. Prije punjenja, posude se moraju temeljno očistiti, a naročito posude za zapaljive ili oksidirajuće gasove. Tečni gasovi koji u vlažnom stanju nagriza stijenke posude (hlor, sumpordioksid i sl.), mogu se puniti samo u potpuno suve posude, a poslije pražnjenja, iste se moraju zatvoriti.

Za svaki gas propisan je i najveći dozvoljeni pritisak punjenja, kao i zapremina posude za svaki kilogram punjenja.

Redovnim, vanrednim pregledima i ispitivanju, pdvrgavaju se pokretne posude pod pritiskom, koji se vrše pod nadzorom nadležnog organa, a obavljaju se u zakonom propisanim rokovima za posude:

1. Namijenjene punjenju agresivnim gasovima (hlor, hlorovodonik, sumpordioksid, sumporna kiselina, zemni plin i sl.) – svake druge godine,
2. Izrađene od hrom-molibdenskih čelika (Cr-Mo) i lakih metala – svake treće godine,
3. Namijenjene punjenju zapaljivim ugljikovodicima, čiji pritisak na temperaturi od 70° C, nije veći od 30 bar, kao i za posude punjene zapaljivim ili otrovnim gasom koji ne nagriza unutrašnjost posude, ako im zapremina nije veća od 250 l, i sve

posude punjene gasovima koji nisu navedeni pd rednim brojevima 1 i 2 – svake pete godine.

Ispitni pritisak uvećan je 1,5 puta u odnosu na dozvoljeni pritisak punjenja (za boce izolacionih i ronilačkih aparata, „banki vazduha“), ili najmanje za 5 bar veći od tog pritiska (za pojedine gasove). Za svaku vrstu gasa, propisan je probni pritisak (za komprimovane gasove na temperaturi od 15° C, a za tečne gasove, odnosno njihove pare na temperaturi od 40° C, [81].

## **10.2 Rezervoari komprimovanog medicinskog vazduha „banke vazduha“**

Rezervoari komprimovanog medicinskog vazduha „banke vazduha“ (sl. 42, 43 i 45), namijenjeni su za punjenje boca izolacionih aparata ili ronilačkih aparata, a smještene su u namjenski izrađene prostorije u objektima, odnosno u kompresorskim stanicama. U suštini, predstavljaju funkcionalnu cjelinu, koja može biti smještena u jednom prostoru, međusobno podijeljenom boksovima, ili izdvojenim međusobno povezanim prostorijama. „Banke vazduha“, mogu se koristiti i za čuvanje gasnih mješavina i koriste se za izradu vještačkih gasnih mješavina. Postoji veoma širok dijapazon gasova u odnosu na vrstu i količinu usklađenih gasova za ronjenje, od onih u kojima se deponuje samo komprimovani medicinski vazduh, komprimovani medicinski vazduh obogaćen kiseonikom, ili čak umjetne mješavine komprimovaniog medicinskog vazduha, obogaćenog kiseonikom, azotom ili helijumom [25, 26].

Rezervoari komprimovanog medicinskog vazduha „banke vazduha“, u nekim literaturama, nazivaju se još i „akumulatorima vazduha“ i u osnovi predstavljaju sistem sudova pod pritiskom, namijenjen skladištenju i raspodjeli komprimovanog medicinskog vazduha.

„Banka vazduha“ se sastoji: od spremnika (čelične boce zapremine 50 l/300 bar) spojenih u baterije pomoću spojnih cijevi na ventilima, razvodne ploče, ventilima za uzorkovanje i rasterećivanje, te cjevovoda za punjenje i odvođenje do konzole za pretakanje. Sastoji se od najmanje dvije baterije (sl. 42 i 43), dok se svaka baterija sastoji od najmanje dva (češće više spremnika), međusobno funkcionalno povezanih. U praksi su se najbolje pokazale „banke vazduha“ sa tri baterije, tako da dok se jedna koristi, druga se puni, a treća je u rezervi. Njen kapacitet se projektuje ovisno o namjeni i potrebama. U današnje vrijeme, postoji tendencija projektovanja „banki vazduha“ većeg kapaciteta (sl. 42), koje se napajaju sa jednim

(sl. 44) ili više kompresora visokog pritiska, zbog praktičnosti i ekonomičnosti, jer je veći stepen iskorištenja kompresora.



**Slika 42.** „Banka vazduha“ fiksirana za zid, [7].



**Slika 43.** „Banka vazduha“ sa dvije baterije po dvije boce, fiksirana za pod, [7].



**Slika 44.** Kompresor visokog pritiska većeg kapaciteta.



**Slika 45.** „Banka vazduha“ u vatrogasnom vozilu za gašenje požara u tunelima.

Ukoliko je kapacitet „banki vazduha“ manji, smještaju se u posebne prostorije, rjeđe u kompresorske stanice. Stabilne baterije, uglavnom se fiksiraju za zidove, podove, ili kombinacijom dva pomenuta načina. Takođe, ove baterije mogu biti i prenosne, smještene u vozila ili na brodovima.

U zavisnosti od smještaja, „banke vazduha“, mogu biti kopnene i brodske.

Kopnene „banke vazduha“, najčešće se postavljaju u: vatrogasnim jedinicama, vozilima za gašenje požara u tunelima, centrima za obuku ronilaca i podmorničara, ronilačkim školama, rekompresijskim centrima, centrima za hiperbaričnu oksigenaciju, podvodno-medicinskim i podvodno-tehničkim istraživačkim ustanovama, stanicama za proizvodnju i distribuciju ronilačkog komprimovanog medicinskog vazduha, tehničkim pogonima za remont, ispitivanje i kalibraciju ronilačke opreme.

U zavisnosti od namjene, „banke vazduha“ treba:

- Da se sastoje od najmanje dvije batrije koje se mogu puniti i prazniti nezavisno jedna od druge.
- Posjeduju nazivni pritisak, kao i kompresor koji ih snabdijeva, a iz bezbjednosnih razloga, poželjno je da im radni pritisak bude nešto veći nego od kompresora.
- Budu povezane sa kompresorom sa jednim ili dva nezavisna cjevovoda, odnosno da posjeduje mogućnost snabdijevanja jednim ili drugim cjevovodom.
- Po mogućnosti da imaju dva odvojena cjevovoda s mogućnošću unakrsnog pražnjenja jedne ili druge baterije, odnosno istovremeno napajanje konzole za punjenje kroz jedan ili oba cjevovoda.
- Za svaku bateriju posjedovati ventile za punjenje i ispuštanje kondenzata, kao i za brzo pražnjenje baterije u slučaju nužde.
- Ispred baterije imati sistem za ispuštanje kondenzata i filtriranje komprimovanog medicinskog vazduha.
- Posjedovati manometer za očitavanje trenutnog pritiska u svakoj bateriji.

U zavisnosti od namjene i kapaciteta „banke vazduha“ u sistemu za proizvodnju i pretakanje gasova, „banke vazduha“, mogu imati i spojeve sa bankama kiseonika, azota ili

helijuma sa priključcima za pretakanje, ekspanzionom vrećicom (za pretakanje gasova), kao i razvodnu ploču za pripremu gasnih mješavina (za ronilačke aparate). Ove dodatke mogu imati samo „banke vazduha“ koje se napajaju kompresorima koji komprimuju samo čist bezuljni vazduh, a koje su prethodno sa spojnim cjevovodima očišćene i odmašćene prema kriterijumima za kiseonik, [26]. Ovo čišćenje i odmašćivanje, prema kriterijumima za kiseonik, sprovodi se zbog sklonosti masti i ulja da burno reaguju u atmosferi kiseonika, odnosno da u kontaktu sa kiseonikom dolazi do njihovog spontanog paljenja, bez prisustva vanjskog izvora paljenja.



## 11. ANALITIČKI PRORAČUN GEOMETRIJE POSUDE POD PRITISKOM

Mehaničko opterećenje posuda pod pritiskom nastaje kao posljedica unutrašnjeg ili vanjskog pritiska kojem je posuda izložena, tako da je prilikom izrade posude pod pritiskom neophodno izabrati konstrukcioni materijal u zavisnosti od radnih uslova (temperatura, agresivnost sredine, dinamička i udarna opterećenja i sl.) kojima je posuda pod pritiskom izložena.

Uticaj lokalnih opterećenja na naponsko stanje i deformacije na omotaču posude pod pritiskom, predstavlja problem koji još uvijek nije dovoljno riješen, što potvrđuju radovi drugih autora.

Ovim radom će se odrediti uticaj jednog priključka na naponsko stanje i deformacije cilindričnog omotača posuda pod pritiskom (čelična i polukompozitna boca izolacionog aparata), koje su opterećene unutrašnjim pritiskom.

Analizirane su dvije posude pod pritiskom – čelična i polukompozitna boca izolacionog aparata, koje imaju priključak za postavljanje ventila za otvaranje/zatvaranje. Omotač boce i priključak su cilindričnog oblika. Na naponsko stanje i deformacije cilindričnog omotača utiču slijedeći faktori:

- „ $D$  – prečnik cilindričnog omotača,
- $d$  – prečnik priključka,
- $e_{ac}$  – debljina zida cilindričnog omotača,
- $e_{ap}$  – debljina zida priključka,
- $\nu$  – Poasonov koeficijent,
- $E$  – modul elastičnosti,
- $l$  – dužina priključka,
- $P$  – vrsta opterećenja“, [14].

### 11.1 Materijal za izradu čelične boce

Čelik je materijal koji se najčešće koristi za izradu boca pod pritiskom, mada u novije vrijeme sve veću primjenu imaju kompozitni materijali, tako da izbor materijala za njihovu izradu zavisi od njihove namjene, opterećenja i geometrije, [14].

Analitički proračun u ovoj disertaciji vršen je za čeličnu bocu izolacionog aparata, zapremine 6 l, koja je izrađena za izlaganje radnom pritisku 300 bar, tj. ispitnom pritisku 450 bar. Ova posuda izrađena je od materijala prema DIN-u, odnosno EN od čelika 30CrNiMo8. Poasonov koeficijent za čelike, uopšteno iznosi  $\nu = 0,3$ ; dok vrijednost modula elastičnosti za najčešće korištene čelike iznosi od  $1,9 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup> do  $2,1 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, a karakteristike materijala, date su u tabeli 11, [8].

**Tabela 11.** Karakteristike materijala posude pod pritiskom.

	$R_{p0,2}$	$R_m$	$E$	$A$	$\nu$
30CrNiMo8	880,7	981	2,1·10 N/mm <sup>2</sup>	7,5	0,3
	902,8	997		7,0	

Čelici za poboljšanje svrstavaju se u grupu nelegiranih i niskolegiranih konstrukcionih čelika, koji termičkom obradom – kaljenjem i visokim popuštanjem (na temperaturi >500° C) postižu odgovarajuću granicu razvlačenja, čvrstoću na izvijanje i žilavost. Kaljenjam se želi postići što veća prokaljenost, tj. što veća mertenzitna<sup>56</sup> struktura na presjeku. Čelici za poboljšanje sadrže 0,2-0,60 ugljenika, koji ima uticaj na njihovu zakaljivost, [38, 79]. Ova vrsta čelika upotrebljava se za izradu konstrukcionih dijelova koji su izloženi velikim i složenim naprezanjima. Poboljšavanje je termički postupak kojim se čelik kao poluobrađen ili kao konstrukcioni dio kali, a zatim ponovo lagano zagrijava na temperaturu veću od 530° C i zatim lagano ili brzo hladi. Lagano hlađenje, odvija se u žarećim pećima, a brzo u ulju ili vodi. Poboljšane čelike karakteriše visoka granica razvlačenja, dobra čvrstoća i žilavost, što se povoljno odražava na granicu zamaranja, odnosno ne zamaraju se brzo i imaju veliku otpornost na dinamička naprezanja, naročito na naizmjenična naprezanja i udare, [30].

Čelik 30CrNiMo8 zbog dobre prokaljivosti primjenjuje se kod većih dimenzija (preko 150 mm), a karakterišu ga najviša granica razvlačenja i udarni rad loma. Spada u najskuplje

<sup>56</sup> **Martenzit** – prezasićeni čvrsti rastvor ugljenika u obliku igličastih kristala koji se sijeku pod određenim uglovima, specifičan po nestabilnosti, tvrdoći i čvrstoći kaljenja. Nastaje kada se čelik austenitne strukture ohladi na dovoljno nisku temperaturu.

čelike zbog legiranja niklom, [79].

## 11.2 Osnovni model

Predmet ovog istraživanja je čelična cilindrična boca izolacionog aparata, dimenzija  $\varnothing$  140×530 mm, debljine stijenke 5 mm izrađena od naprijed pomenutog čelika. Boca izolacionog aparata izrađena je postupkom hladnog presovanja, postupkom izvlačenja materijala iz jednog komada uz korištenje postupka vrućeg valjanja (sl. 21 i 22) za izradu gornjeg torisfernog dijela boce na čijem vrhu se nalazi i priključak ventila za punjenje/praznjenje  $\varnothing$  16 mm, izrađen takođe postupkom rotacionog vrućeg valjanja. Na unutrašnjoj stijenci priključka ventila urezan je navoj M 18×1 radi spajanja s navojem ventila boce.

Debljina stijenke cilindričnog omotača posude pod pritiskom, izračunava se prema slijedećem izrazu:

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot f + P}, \text{ (mm)} \quad (8)$$

gdje je:

- $e$  – potrebna debljina zida,
- $P$  – vrsta opterećenja-pritisak,
- $D_e$  – vanjski prečnik,
- $f$  – nominalni proračunski napon, MPa,

Prilikom proračuna debljine stijenke cilindričnog omotača izloženog djelovanju unutrašnjeg pritiska, mora biti zadovoljen uslov, [1]:

$$\frac{e}{D_e} \leq 0,16 \quad (9)$$

Na čeličnoj posudi koja je predmet ovog istraživanja, definisana su tri mjerna mjesta:

- **Mjerno mjesto 1 (MM 1)** – mjesto na cilindričnom donjem dijelu boce, udaljenom od dna boce (torisferni dio) 56 mm (donji dio mjerne trake), širina mjerne trake iznosi 6 mm,
- **Mjerno mjesto 2 (MM 2)** – mjesto na cilindričnom srednjem dijelu boce,

udaljenom od dna boce (torisferni dio) 216 mm (donji dio mjerne trake), širina mjerne trake iznosi 6 mm,

- **Mjerno mjesto 3 (MM 3)** – mjesto na cilindričnom gornjem dijelu boce, udaljenom od dna boce (torisferni dio) 481 mm (donji dio mjerne trake), širina mjerne trake iznosi 6 mm.

Obzirom da je geometrija posude poznata, neophodno je provjeriti i maksimalni dozvoljeni pritisak kojem može biti izložen cilindrični omotač posude prema izrazu:

$$P_{max} = \frac{2 \cdot f \cdot e_a}{D_m} \quad (10)$$

gdje je:

- $D_m$  – prečnik posude pod pritiskom, mm,
- $f$  – nominalni proračunski napon, MPa,
- $e_a$  – debljina zida cilindričnog omotača, mm,

Maksimalnu dozvoljenu vrijednost proračunskog napona za materijal od kojeg je izrađena posuda, izračunava se prema slijedećem izrazu, [14]:

$$f = \max \left[ \left( \frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min = \left( \frac{R_{p1,0/T}}{1,2} \right); \left( \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right] \quad (11)$$

gdje je:

- $R_{p1,0/T}$  – tečenje materijala,
- $R_{m/T}$  – kidanje materijala;

## 12. METOD KONAČNIH ELEMENATA

Uzimajući u obzir kompleksnost geometrije tijela, osobine materijala kao i specifičnost graničnih uslova koji se javljaju u većini inženjerskih problema, najčešće kao rezultat imaju nemogućnost dobijanja egzaktnog rješenja, tako da mali broj praktičnih problema ima rješenje u zatvorenom obliku, te je neophodno odrediti približno rješenje, [14].

Metoda konačnih elemenata je jedna od najrasprostranjenijih savremenih numeričkih metoda za rješavanje problema mehanike kontinuuma<sup>57</sup>. Pronalaženje rješenja komplikovanog problema aproksimativnim<sup>58</sup> numeričkim metodama, predstavlja osnovnu ideju ove metode. Ova metoda spada u diskretne analize. Suština metode konačnih elemenata je diskretizacija fizičkih modela na manji broj elemenata jednostavnije geometrije povezanih u tačkama koje se zovu čvorovi, nakon čega se određuje polje pomijeranja i deformacija, kako za svaki element zasebno, tako i za cijeli model, te se na osnovu dobijenih rezultata proračunava i naponsko stanje, [19]. Ovo znači da se razmatrani realni fizički domen (neka linija, neka površina, neka zapremina) sa stanovišta fizičke interpretacije, kao realni kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode kretanja tačaka u njemu, zamjenjuje fiktivnim<sup>59</sup> geometrijskim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata (linijski, površinski, zapreminski konačni elementi), koji su međusobno povezani u konačnom broju tačaka, odnosno elemenata koji imaju konačne: dimenzije, fizičke karakteristike, brojeve stepeni slobode. Broj stepeni slobode u svijetu inženjerstva podrazumijeva mogućnost pomijeranja nekog tijela u vidu tri moguće translacije duž osa:  $x$ ,  $y$  i  $z$  i tri rotacije oko osa  $x$ ,  $y$ , i  $z$  – u prostoru (Dekartov troosni koordinatni sistem).

Obzirom na jednostavnost geometrije konačnih elemenata, realni kompleksni problem, razbija se na niz jednostavnih problema. Izbor oblika konačnog elementa, način diskretizacije, izbor ukupnog broja konačnih elemenata, zavise od prirode problema koji se rješava i potrebne tačnosti željenog i traženog rješenja. Analizom pojedinačnih elemenata i uz pretpostavku o načinu njihove međusobne povezanosti, analizira se cjelina problema. Analiza u kojoj se od posebnog ide ka opštem, odnosno od individualnog ka univerzalnom i u kojoj se analiziranjem dijelova zaključuje o cjelini, predstavlja induktivni pristup koji ima primjenu u svim oblastima nauke. Induktivni pristup je od posebnog značaja pri rješavanju inženjerskih problema kod

---

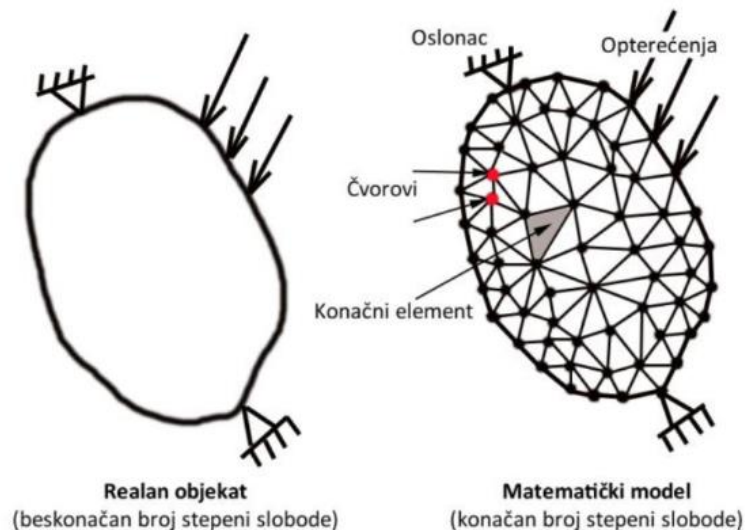
<sup>57</sup> **Kontinuum** – produžna, neprekidna ili diskretna veličina.

<sup>58</sup> **Aproksimativno** – približno.

<sup>59</sup> **Fiktivno** – zamišljeno, imaginarno.

kojih se opšta rješenja ne mogu dobiti u zatvorenom (direktnom, tačnom) obliku.

Inženjerska metoda, metoda konačnih elemenata je nastala u ranim 60-im godinama prošloga vijeka sa ciljem da riješi strukturalne probleme u vazduhoplovnoj industriji – proizvodnji borbenih aviona i od tada je zastupljena na rješavanje brojnih problema u oblastima tehničkih nauka: mašinstva, elektrotehnike, građevinarstva, ali i u oblasti prirodnih nauka: medicina, stomatologija i sl.



**Slika 46.** Aproksimacija kontinuuma primjenom metode konačnih elemenata, [14].

Diskretizacija domena (sl. 46) predstavlja svaku tačku realnog deformabilnog objekta na lijevoj strani sa beskonačnim brojem stepeni slobode, dok svaka tačka (čvor) diskretizovanog modela na desnoj strani ima konačan broj stepeni slobode. Kontinuum se svodi na rješiv matematički domen, dijeljenjem domena na konačan broj elemenata i čvorova, pa se svakom čvoru nakon proračuna „dodjeljuju“ određene vrijednosti pomijeranja, koja predstavljaju „reakciju“ sistema na zadana opterećenja i granične uslove. Interpolacijom vrijednosti u samim čvorovima, određuju se vrijednosti pomijeranja unutar samih konačnih elemenata, [14, 19].

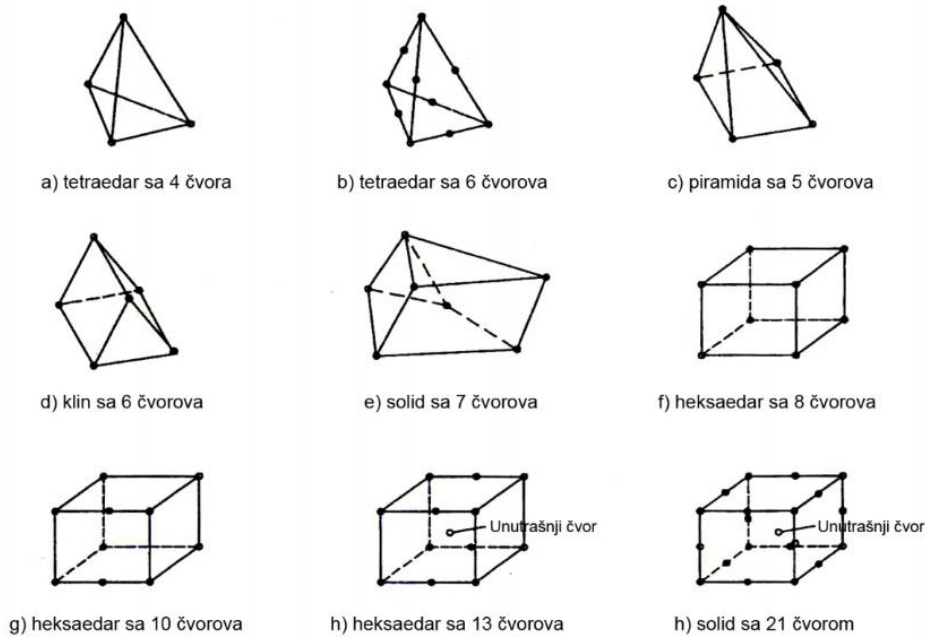
Primjenom metode konačnih elemenata podrazumijeva se izrada „virtuelnog“ računarskog modela, koji ima definisanu konačnu geometriju sa dodijeljenim odgovarajućim karakteristikama materijala i odgovarajućim opterećenjima sa precizno definisanim graničnim uslovima i osloncima. Numerički model suštinski definišu: geometrija, karakteristike materijala, opterećenja i granični uslovi. Numerički model je bolji, što su ova četiri parametra

bliža realnom fizičkom modelu, a na osnovu njega, dobijena su tačnija rješenja. Odstupanje od stvarne vrijednosti bilo kojeg od ova četiri parametra, nekada dovodi do velikih grešaka. Po metodi konačnih elemenata, suština aproksimacije kontinuuma, sastoji se u slijedećem:

- Dijeljenje površi razmatranog objekta na određeni broj poddomena konačnih dimenzija pomoću zamišljenih linija ili površi. Konačnim elementima nazivaju se pojedini poddomeni, dok se njihov skup za cijeli domen naziva sistem ili mreža konačnih elemenata (sl. 75).
- Konačni elementi vjerovatno su međusobno povezani u konačnom broju tačaka – čvornih tačaka koje se usvajaju na konturi elementa. Ove tačke se nazivaju čvorne tačke, odnosno čvorovi. Samo u čvoru mogu djelovati sile, a ne po površini konačnog elementa ili po nekoj njegovoj ivici.
- Stanje u svakom konačnom elementu, poput polja pomijeranja, deformacije, naprezanja, rasprostiranja temperature i sl; opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine. Navedeni postupak naziva se definisanje graničnih uslova konačnih elemenata.
- Svi principi i postupci koji važe za klasične diskretne sisteme, važe i za analizu i proračun sistema konačnih elemenata.

Nemoguće je uvesti aproksimaciju za modeliranje nekih trodimenzionalnih struktura, zanemarivanjem jedne dimenzije, te je zbog toga potrebno koristiti solide ili trodimenzionalne konačne elemente koji se primjenjuju za određivanje trodimenzionalnog stanja deformacija i napona (sl. 47).

Tetraedarni element sa četiri čvora je najjednostavniji solid element, koji se lako može generisati od ravanskog trouglastog elementa. Tetraedarski i heksaedarski solid elementi višeg reda, razvijaju se dodavanjem čvorova na ivice elementa ili unutar zapremine, [14].

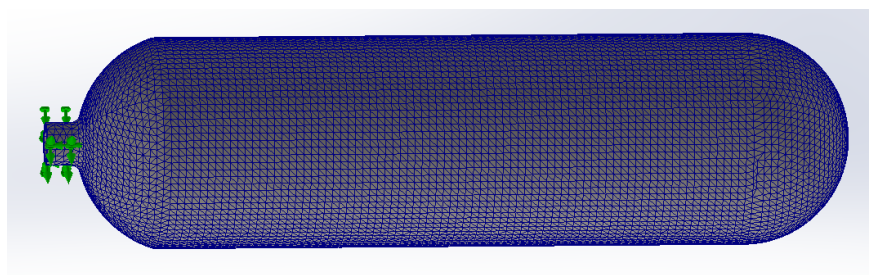


Slika 47. Solid elementi za modeliranje trodimenzionalnih struktura, [14].

## 12.1 Definisane geometrije modela

Određivanje pomijeranja i napona u cijeloj strukturi, koja je izložena djelovanju opterećenja predstavlja jedan od inženjerskih problema. Upotrebom metode konačnih elemenata, moguće je odrediti napone i deformacije za bilo koji čvor i element razmatrane strukture čije su karakteristike materijala i opterećenja već poznate, na osnovu njihovih poznatih vrijednosti deformacija i napona u jednom čvoru i elementu. Ukupnim brojem jednačina opisuje se ponašanje svih čvorova što predstavlja sistem algebarskih jednačina koje se rješavaju matricama.

Definisanjem geometrije modela na osnovu geometrije posude (sl. 44), izrađen je njen 3D model u programskom paketu Solid Works.



Slika 48. 3D model posude sa mrežom konačnih elemenata.



## 12.2 Osobine materijala

Osobine materijala imaju veliki uticaj na deformacije u strukturi koja se razmatra. Nakon definisanja numeričkog modela i generisanjem mreže konačnih elemenata, potrebno je definisati karakteristike materijala za taj model, to jest, svakom konačnom elementu treba dodijeliti i karakteristiku materijala, odnosno numeričkom modelu treba „dodijeliti“ iste osobine materijala od kojeg je napravljen i njegov realni fizički „par“.

Neophodne fizičke osobine materijala, koje treba poznavati u analizi izotropnih, linearno elastičnih problema su:

- Jangov modul elastičnosti –  $E$ ,
- Poasonov koeficijent –  $\nu$ ,
- Modul smicanja –  $G$ .

Sve tri navedene karakteristike materijala mogu se prikazati formulom:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (12)$$

zbog čega postoje samo dvije nezavisne konstante materijala koje u tom slučaju treba unijeti u proračunski model.

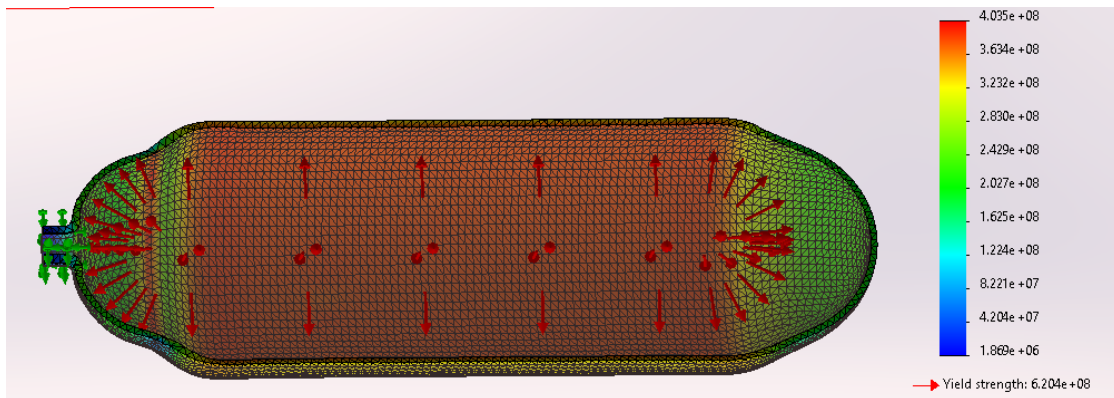
Geometrija numeričkog modela nakon definisanja osobina materijala, dijeli se na konačan broj elemenata određenog tipa pri čemu nastaje tzv. „Mreža konačnih elemenata“ (sl. 48). U okviru softvera kojim se vrši proračun, uobičajena procedura generisanja mreže, odvija se automatski, tako da pored ovog načina, postoji i mogućnost „manuelnog“ definisanja geometrije mreže. Korištenjem automatskog generisanja mreže, softver, automatski generiše gušću mrežu na mjestima nagle promjene geometrije (spoj dva različita materijala i sl.). Pojavu „oštrih“ vrhova i ivica na numeričkom modelu, nazivamo singularitetima, na koje trebamo obratiti naročitu pažnju. Ukoliko se još javljaju i na mjestima sa većim značajem za tačnost proračuna, potrebno ih je ukloniti, tj. „ublažiti“, kako ne bi postali generatori nerealno visokih vrijednosti izračunatih napona.

Mreža konačnih elemenata ima veliki uticaj na tačnost rezultata metode. Pouzdano se može reći da što je ona suptilnija (veći broj čvorova i elemenata za dati model), to je pouzdanije rješenje problema, obzirom da se matematički model bliži realnom objektu. Posebnu pažnju treba obratiti prilikom određivanja potrebne gustine mreže, odnosno da iza svakog elementa ili

čvora stoji određen broj matematičkih jednačina koje se trebaju riješiti, [14].

### 12.3 Opterećenja

U metodi konačnih elemenata, opterećenja mogu biti primijenjena u obliku sila, momenata, ubrzanja, temperatura, pritisaka ili periodičnih pobuda. Stvarno, realno opterećenje, treba da predstavi odabrani tip opterećenja. Kao najosnovnija opterećenja, sile se definišu u odnosu na aktivne pravce osa koordinatnih sistema i mogu se primijeniti na bilo koji element ili geometrijski oblik. U metodi konačnih elemenata, svaka promjena opterećenja, mora se sastojati od četiri poznate komponente, a to su: intenzitet (veličina), orijentacija, raspodjela i vremenska zavisnost.



Slika 49. Pravac opterećenja unutrašnjim pritiskom.

Posuda pod pritiskom, koja je eksperimentalni predmet ove disertacije, opterećena je unutrašnjim pritiskom, dok su numeričke simulacije opterećenja izvršene za vrijednost pritiska od 30 Mpa.

U pravcu normale na površinu elementa na koji djeluje, definiše se opterećenje pritiska, dok površinski kontakti elementi imaju definisanu unutrašnju i spoljašnju normalu površine (sl. 49). Pritisak kao opterećenje je postavljeno po unaprijed zadatim vrijednostima od unutrašnje ka spoljašnjoj površini. Za slučaj opterećenja pritiskom na površinu solid elementa, orijentacija se automatski postavlja, pošto su vektori normala kod površina solid elemenata i uvijek usmjereni u pravcu od centra površi, te je zbog toga pozitivni pritisak orijentisan suprotno od ovog vektora.

### 12.4 Oslonci-granični uslovi

Numerički modeli koji se zasnivaju na principima primjene metode konačnih elemenata, moraju imati jasno definisane oslonce – granične uslove, sa decidno definisanim stepenima slobode kretanja čvornih tačaka. Shodno navedenom, osnovna podjela oslonaca može se izvršiti na slijedeće vrste:

- „Uklještenje (spriječene i rotacije i pomijaranja),
- Nepokretan oslonac (dozvoljene rotacije, spriječena pomijaranja),
- Pokretan oslonac (dozvoljene rotacije, djelimično spriječena pomijaranja),
- Oslonac sa definisanim ograničenim pomijeranjem (elastični oslonac, npr. opruga)“, [14].

Metoda konačnih elemenata za granične uslove (oslonce), posmatrane kao fiksne uslove, primjenjivane su u većini studija.

Uzimajući u obzir navedeno, postavljeni su simetrični granični uslovi kojima je podrazumijevano da u pravcu normale na poprečni presjek, translacija mora biti jednaka nuli, kao i momenti oko druge dvije ose.

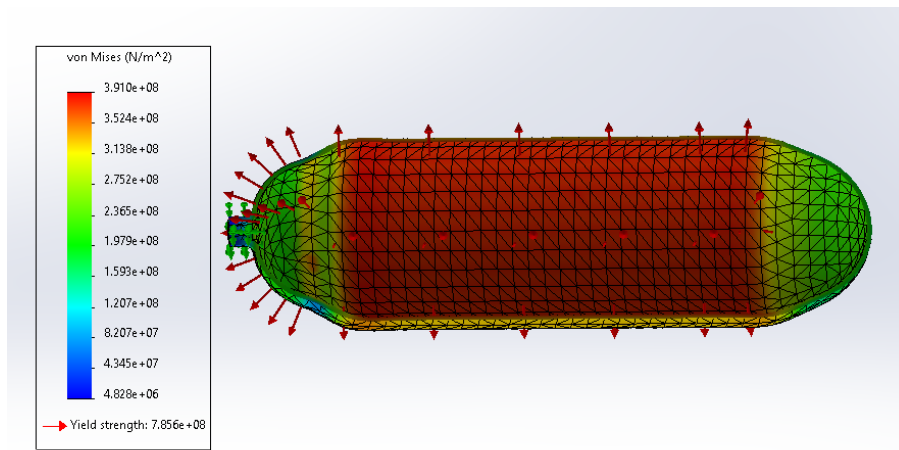
### 12.5 Rezultati numeričke analize

Projektovanjem konstrukcija, a naročito prilikom proračuna čvrstoće elemenata, kao i čitave strukture, neophodno je poznavanje osobina i mehaničkih karakteristika materijala koji se koristi. U novije vrijeme se pored teoretskih i eksperimentalnih istraživanja u proračunima čvrstoće strukture koriste softverski paketi (CATIA, Solid Works i sl.) na bazi metode konačnih elemenata, koji rješavaju linearne i kompletno nelinearne strukturalne probleme ponašanja materijala. Još od samog početka, metoda konačnih elemenata se pokazala kao veoma učinkovita i veoma brzo se proširila na rješavanje jedno i više dimenzionih problema iz različitih oblasti. Primjenom softvera Solid Works vršena je analiza naponskog stanja i deformacija u tri koraka:

- „Generisanje modela (definisane modela, pojednostavljivanje, idealizacija, definisanje karakteristika materijala i kreiranje MKE),

- Vršenje proračuna (definisanje graničnih uslova i simulacija),
- Pregled rezultata (verifikacija)“, [14].

Trodimenzionalni model posude, odnosno čelične boce izolacionog aparata, poslužio je za pravljenje mreže konačnih elemenata. Simulacijom u okviru ovog istraživanja, korišten je model koji ima softverom određen broj čvorova i elemenata dobijenih postupkom konvergencije<sup>60</sup> (sl. 50). Sve faze proračuna, vežu se za čvorove i prvo se određuju lokalno za svaki konačni element, a zatim globalno za cijeli model.



**Slika 50.** Model posude korišten u simulaciji za opterećenje unutrašnjim pritiskom 30 MPa.

Završetkom svih proračuna, upoređuju se dobijeni rezultati i ukoliko su oni slični (razlika ne veća od 5 %) za različite gustine mreže, tada je prva mreža dovoljno dobar izbor za određenu geometriju opterećenja i granične uslove. Ukoliko bi se rezultati razlikovali u značajnijoj mjeri, neophodno je mrežu učiniti finijom (povećati gustinu mreže) i sprovesti proračune dok se u dvije uzastopne iteracije<sup>61</sup> ne pojave rješenja koja se ne razlikuju više od 5 %, nakon čega, kažemo da je model konvergirao, te da nema potrebe ići na još veću gustinu mreže, jer su dobijene vrijednosti napona i deformacija zadovoljavajuće tačnosti. Treba napomenuti da suptilnija mreža ima i svoje nedostatke, što uzrokuje povećanje potrebnog vremena za proračun i zahtjevom za boljom proračunskom memorijom. Shodno navedenom, opisanim testom mora se odrediti minimalni broj konačnih elemenata koji će dati prihvatljivo rješenje.

<sup>60</sup> **Konvergencija** – postepeno usitnjavanje inicijalne mreže, sprovođenja proračuna sa svakom novom mrežom i memorisanje dobijenih vrijednosti na mjestima značajnim za proračun.

<sup>61</sup> **Iteracija** – ponavljanje nekog procesa (fizička analiza, matematički proračun i sl.) sa ciljem približavanja unaprijed definisanom cilju ili dobijanju rezultata određene tačnosti, tako da se u svakoj novoj iteraciji za početne vrijednosti promjenljivih uzimaju dobijene vrijednosti na kraju prethodne iteracije.

Numerička analiza je sprovedena za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, te je izrađen 3D model posude, odnosno boce izolacionog aparata, [14].

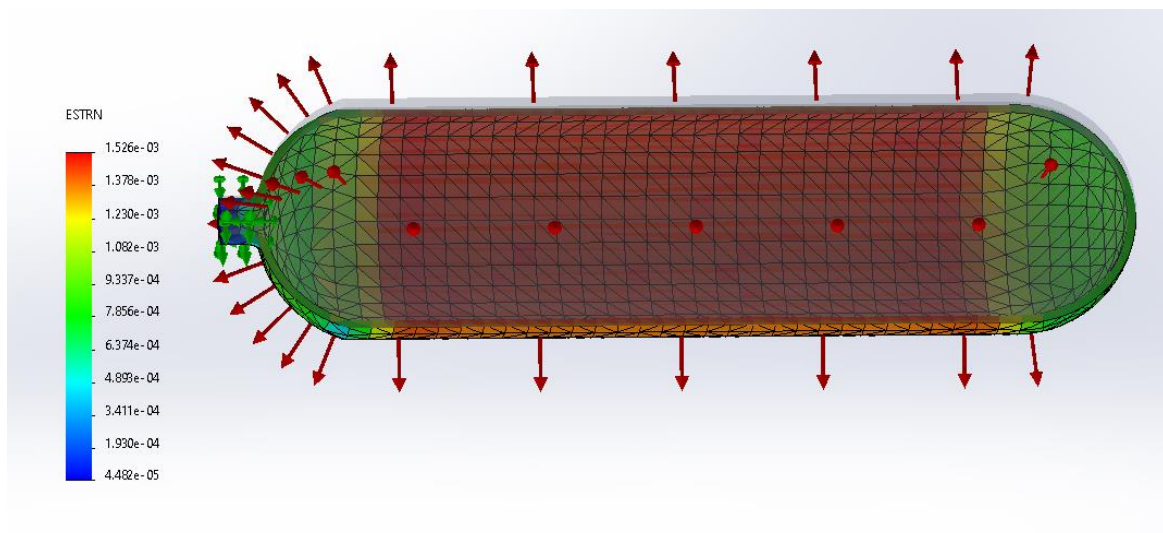
## 12.6 Linearna analiza

Pretpostavljajući da se materijal ponaša u granicama elastičnosti do vrijednosti opterećenja od 30 MPa, tokom numeričkih proračuna za vrijednosti pritiska 30 MPa, korištena je linearno-statička analiza. „Deformacije i naponi linearno se mijenjaju za promjenom opterećenja, te se dobijeni rezultati mogu ekstrapolirati i za druge vrste opterećenja“, [14].

### 12.6.1 Rezultati numeričkih proračuna za mjerna mjesta 1, 2 i 3

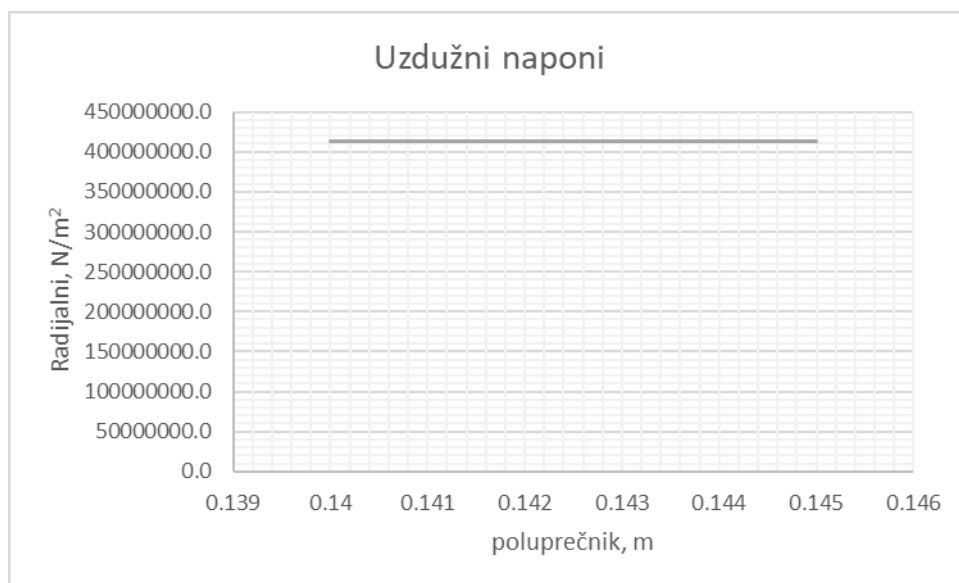
Za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom od 30 MPa prikazano je na sl. 50, polje Mizesovih deformacija za mjerna mjesta 1, 2 i 3. Prikazane vrijednosti na ordinati, potrebno je pomnožiti sa 100, da bi se dobile procentualne vrijednosti.

Pri opterećenju unutrašnjim pritiskom od 30 MPa najveće vrijednosti se javljaju u okolini mjernih mjesta 1, 2 i 3, a udaljavanjem od istih prema vrhu i dnu boce se smanjuju.

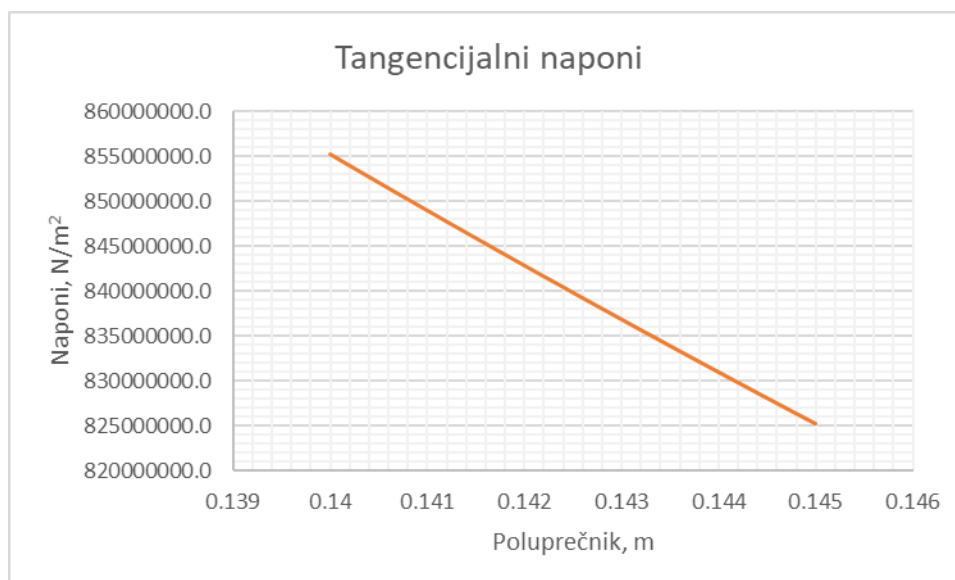


**Slika 51.** Vrijednosti Mizesovih deformacija za mjerna mjesta 1, 2 i 3, za opterećenje unutrašnjim pritiskom 30 MPa.

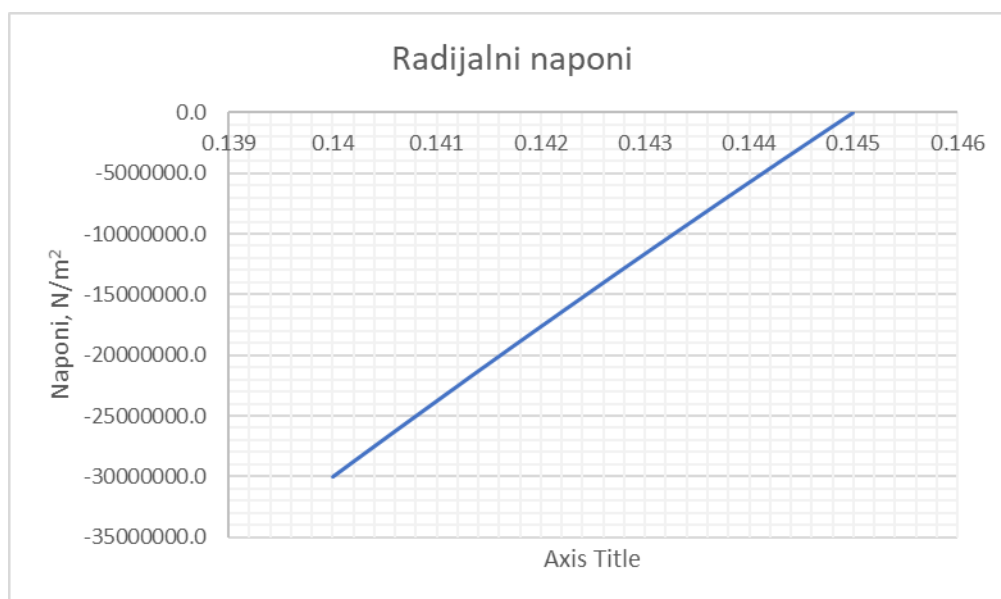
Rezultatima numeričke analize, izrađeni su dijagrami napona za čeličnu bocu izolacionog aparata (dijagrami 2, 3, 4 i 5).



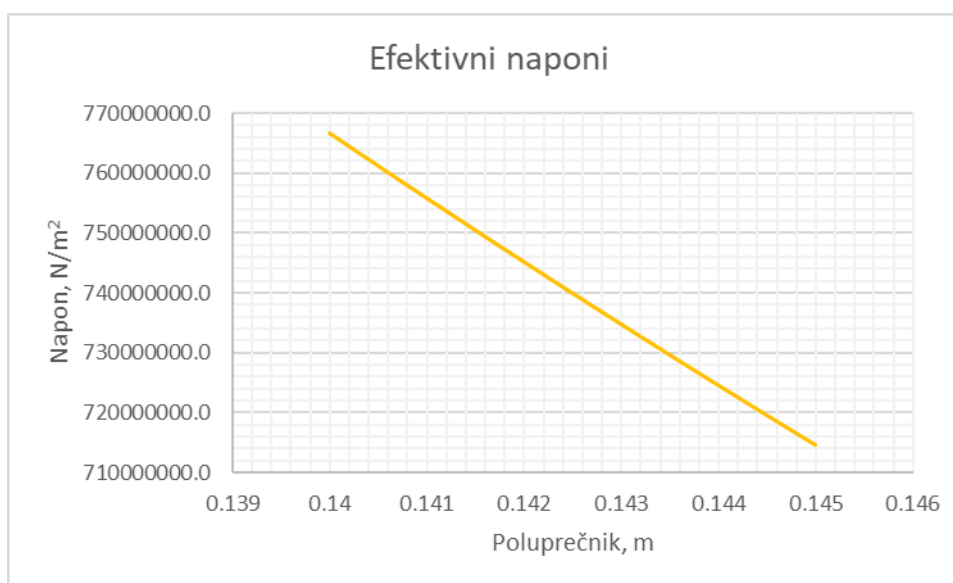
**Dijagram 2.** Uzdužni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.



**Dijagram 3.** Tangencijalni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.



**Dijagram 4.** Radijalni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.



**Dijagram 5.** Efektivni naponi na čeličnoj boci nakon numeričke analize.

### 13. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

#### 13.1 Ispitivanja materijala čelične boce na kidalici za ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala – nelinearna analiza

Eksperimentalni dio ispitivanja materijala čelične boce, vršen je u Laboratoriji za materijale i zavarivanje na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci.



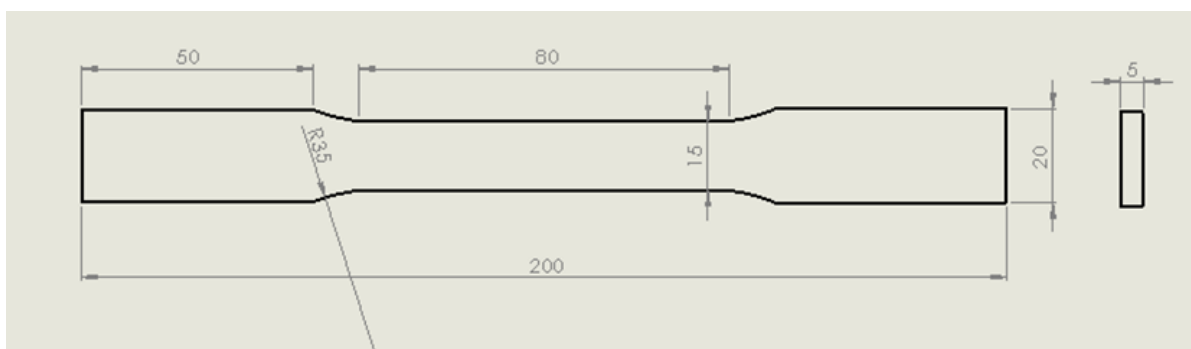
Slika 52. Kidalica Messphysik Beta 200.

Ispitivanje je izvršeno na mehaničkoj kidalici Messphysik Beta 200 (sl. 52 i 63), a sam postupak ispitivanja, definisan je standardom SRPS EN ISO 6892 – 1:2012. Metalni materijali – ispitivanje zatezanjem, dio 1, ispitivanje na sobnoj temperaturi.

Prethodno izrađena epruveta (sl. 53, 54 i 55) za ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala čelične boce SCUBA aparata obavljena je ispitivanjem na zatezanje. Za ovu vrstu ispitivanja, potrebno je imati određeni broj epruveta, koje se izrađuju od materijala od kojeg je izrađena boca. Sva mjerenja i posmatranja prilikom ispitivanja, vrše se na srednjem dijelu epruvete, odnosno na smanjenom presjeku i taj dio se naziva mjerni dio. Materijal koji se ispituje, odnosno, epruveta ne smije imati nikakvih mehaničkih oštećenja, jer dobijeni rezultati



ne bi bili tačni zbog pojave koncentracije napona na tim mjestima. Opterećivanjem uzorka na mašini za zatezanje, isti se prvo deformiše elastično, a zatim plastično, nakon čega se dobija kriva napon – izduženje, koja opisuje ponašanje materijala pri zadanom opterećenju, a prikazana je dijagramom napon – izduženje (dijagrami 6 i 7) za materijal 30CrNiMo8 čelik od kojeg je izrađena čelična boca SCBA aparata (Prilog 1).



Slika 53. Epruveta za određivanje mehaničkih karakteristika materijala, [9].



Slika 54. Epruvete neposredno prije ispitivanja.



Slika 55. Epruvete nakon ispitivanja na kidalici.

Mjerenjima nakon ispitivanja na kidalici, izračunate su vrijednosti uzdužnih dilatacija i kontrakcija presjeka za svaku epruvetu:

$$\circ \text{ Epruveta I} \quad \varepsilon_u = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{207-200}{200} \cdot 100 = 3,5 \% \quad (13)$$

$$\circ \text{ Epruveta II} \quad \varepsilon_u = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{208-200}{200} \cdot 100 = 4 \% \quad (14)$$

gdje je:

- $l_0$  – dužina epruvete prije ispitivanja na kidalici,
- $l$  – dužina epruvete nakon ispitivanja na kidalici,

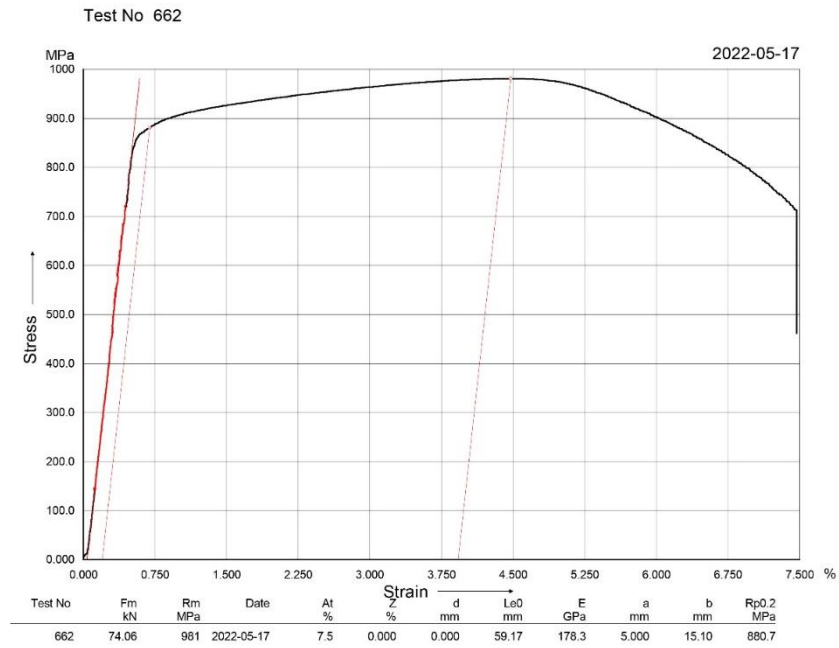
$$\circ \text{ Epruveta I} \quad \psi = \frac{a_1-a_0}{a_1} \cdot 100 = \frac{3,4-5}{3,4} \cdot 100 = -47,05 \% \quad (15)$$

$$\circ \text{ Epruveta II} \quad \psi = \frac{a_1-a_0}{a_1} \cdot 100 = \frac{3,3-5}{3,3} \cdot 100 = -51,51 \% \quad (16)$$

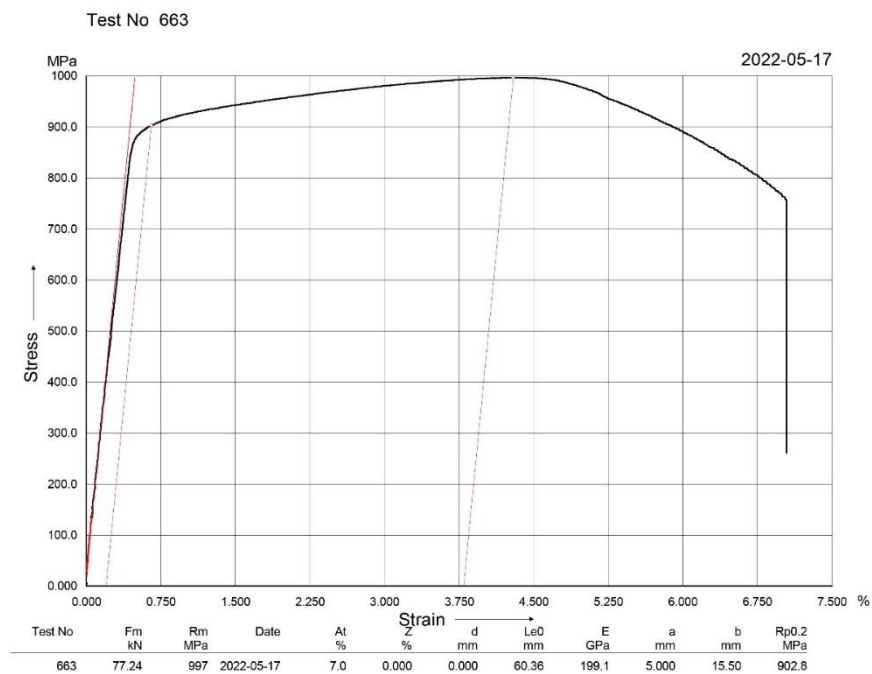
gdje je:

- $\psi$  – kontrakcija presjeka,
- $a_0$  – debljina epruvete prije ispitivanja na kidalici,
- $a_1$  – debljina epruvete poslije ispitivanja na kidalici,

Nakon ispitivanja epruveta, dobijeni su podaci ponašanja materijala omotača čelične boce (dijagrami 6 i 7). Na izmjerene vrijednosti tokom ispitivanja materijala mogu uticati i drugi parametri, poput temperature ili vlažnosti, što dalje može imati uticaja na karakteristike materijala.



Dijagram 6.  $\sigma - \varepsilon$  za materijal 30CrNiMo8, epruveta I.



Dijagram 7.  $\sigma - \varepsilon$  za materijal 30CrNiMo8, epruveta II.

### 13.2 Mjerni uređaji pri eksperimentalnim istraživanjima

U eksperimentalnim istraživanjima, korišteno je više uređaja za ispitivanje termičkih dilatacija čelične i polukompozitne boce za SCBA aparate, poput: buke, temperature, pritiska i određivanja mehaničkih karakteristika materijala, a to su:

1. Univerzalni uređaj, VOLTCRAFT DT 8820, za mjerenje osvijetljenosti, temperature, relativne vlažnosti i buke.
2. Termovizijska kamera FLIR K65, za mjerenje temperature okoline, boca i kompresora prilikom normalnih i naglih ekspanzija KMV,
3. Uređaj za pretvaranje signala i akviziciju podataka Quantum MX440A, za obrađivanje signala, odnosno informacija o uzdužnim, tengencijalnim ili rezultujućim deformacijama,
4. Mjerne trake XY31-6/120 za eksperimentalnu analizu sa dva mjerna vlakna za dvoosno stanje poznatog pravca uzdužnih, tengencijalnih ili rezultujućih deformacija,
5. Davač i transmiter pritiska HBM 1-P3IC/3000 bar za pritiske 10-3000 bar,
6. Hidraulična manuelna testna pumpa odnosno generator visokog pritiska CPP 700-H za ispitivanje pritiska u bocama hladnom vodom,
7. Mehanička kidalica Messphysik Beta 200 za ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala čelične SCBA boce.

#### 13.2.1 Voltcraft DT 8820

Ovaj multifunkcionalni uređaj (sl. 56), namijenjen za mjerenje jačine svjetla, vlažnosti, temperature i nivoa buke, zadovoljava evropske standarde EN 61000-6-3: 2007<sup>62</sup>, EN 61000-6-1: 2007<sup>63</sup>. Nosi CE oznaku, te vrši pojedinačna mjerenja u rasponima:

---

<sup>62</sup> EN 61000-6-3 – elektromagnetna kompatibilnost za elektroničke i električne uređaje u stambenim, poslovnim i industrijskim okruženjima za frekvencije iznad 400 GHz.

<sup>63</sup> EN 61000-6-1 – elektromagnetna kompatibilnost za elektroničke i električne uređaje u stambenim, poslovnim i „blagim” industrijskim okruženjima.

- Jačinu svjetlosti do 20 000 luxa (indikator sa faktorom x10).
- Temperature sa internom i eksternom sondom od -20 do +750 ° C.
- Relativne vlažnosti vazduha od 25 do 95 %.
- Nivoa buke od 35 do 130 dB, [98].



Slika 56. Voltcraft sa internim i eksternim senzorima, [98].

### 13.2.2 Termovizijska kamera FLIR K65 i njihova primjena u vatrogasnim jedinicama

Termovizijska kamera FLIR K (sl. 57) namijenjena je za upotrebu u vatrogasnim jedinicama, bilo da se radi o pretraživanju žarišta požara, traženju lica (u zadimljenim prostorijama ili na terenu pri slaboj vidljivosti) ili identifikovanju opasnih materija. Obzirom na robusan izgled, kamera je jednostavna za upotrebu i sa rukavicama, otporna je na padove (na beton sa visine od 2 m), prodor vode IP67<sup>64</sup> i visoke temperature. Termovizijska slika, poboljšana je digitalnom obradom, koja prikazuje više detalja, na displeju od 4" sa rezolucijom 320×240 piksela. Posjeduje internu memoriju na koju se može smjestiti 200 termovizijskih slika ili 200 termovizijskih video zapisa (do 5 min trajanja svakog zapisa). Popoću USB konektora i kabla, podaci sa kamere, mogu se prebaciti na PC.

<sup>64</sup> IP67 – „ingress protection“ zaštita elektronskih uređaja od kontakta i infiltracije vode i prljavštine; 6 – kompletna zaštita od kontakta i infiltracije prašine; 7 - zaštita uređaja od prodora vode do dubine od 1 m.

Termovizijska kamera zadovoljava standard NFPA 1801-2013<sup>65</sup>, a namijenjena je za rad u temperaturnom opsegu od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+150^{\circ}\text{C}$ . Li ion baterija obezbjeđuje četiri časa rada, [5].



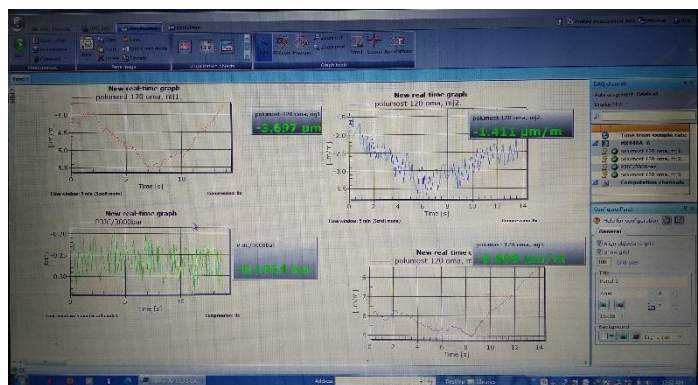
Slika 57. Termovizijska kamera FLIR K65, [85].

### 13.2.3 Quantum X sistem za akviziciju podataka

Tokom izvođenja eksperimentalnog ispitivanja dilatacija na bocama izolacionih aparata, korišten je uređaj za pretvaranje signala i akviziciju<sup>66</sup> podataka proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Quantum MX440A (sl. 58).



Slika 58. Uređaj Quantum MX440A.



Slika 59. Interfejs softvera Catman Easy za akviziciju i analizu.

<sup>65</sup> NFPA (National Fire Protection Association) 1801-2013– Nacionalno udruženje za zaštitu od požara (SAD), odnosi se na standard termovizijskih uređaja u vatrogasnim jedinicama, koji se odnose na dizajn, performanse, testiranje.

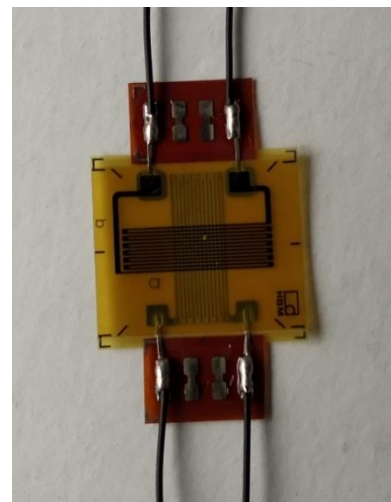
<sup>66</sup> Akvizicija – zarada, tekovina, stečeno dobro, nabavljanje, prikupljanje.

Uređaj karakterišu: mjerna akvizicija visoke rezolucije (24 bit), mogućnost podešavanja brzine uzorkovanja (do 192 kHz), niskopropusni filteri signala za eliminaciju signala visoke frekvencije, odnosno interferencije<sup>67</sup> osnovnog signala ili signala šuma koji se javlja kao redovna pojava tokom visokofrekventnih mjerenja, automatska identifikacija senzora i konfiguracija kanala, rad u širokom temperaturnom opsegu okoline (od -20° C do +65° C), pouzdani rezultati mjerenja i visoki kvalitet testiranja. Podešavanja parametara filtera prema prirodi osnovnog signala i udjela šuma, ostvaruje se pomoću softvera Catman Easy (sl. 59), kao i sinhrono zapisivanje podataka sa senzora u realnom vremenu. Komunikacija između akvizicije i mjernih davača, vrši se preko standardne konekcije, a između akvizicije i PC-ija, vrši se preko ethernet<sup>68</sup> veze, [40, 93, 96].

### 13.2.4 Mjerne trake

Mjerne trake u upotrebi su više od 60 godina, a tehnologija njihove izrade i primjene, neprestano se usavršava. Korištenje HBM-ovih mjernih traka za eksperimentalnu analizu sa dva mjerna vlakna za dvoosno naponsko stanje poznatog pravca, otpora od 120  $\Omega$  predstavlja sigurnost i pouzdanost prilikom upotrebe. Upotrebljavaju se za mjerenje lokalnih deformacija na realnim konstrukcijama.

Obzirom da su ova mjerenja lokalnog karaktera, nedostatak im je u tome što se deformacije dobijaju samo u jednoj mjernoj tački. Takođe, prilikom korištenja mjernih traka mogu se javiti problemi koji se ogledaju u nemogućnosti njihovog lijepljenja na mjernoj površini, što rezultuje nemogućnosti dobijanja maksimalnih vrijednosti deformacija, [96].



Slika 60. Dvostruka mjerna traka XYxx.

<sup>67</sup> **Interferencija** – u fizici označava uzajamni uticaj talasa, čiji rezultat može biti njihovo slabljenje, pojačavanje ili poništavanje.

<sup>68</sup> **Ethernet** – protokol i najkorištenija višemedijumska tehnologija LAN mreža.

### 13.2.5 Davač i transponder pritiska HBM 1-P31C/3000 bar

Davač i transponder pritiska, proizvođača HBM, koristi se za mjerenje pritiska u mnogim granama industrije. Monolitično<sup>69</sup> čelično kućište i robustan dizajn nude pouzdanost prilikom upotrebe i izuzetnu otpornost na opterećenje, čak i u veoma lošim sredinama, otporni su na koroziju i posjeduju zaštitu IP67. Pouzdanost im je dokazana kod udarnog pritiska vibracija ili osciljućeg pritiska. U kombinaciji sa mjernim HBM trakama daju pouzdane rezultate kod izuzetno dinamičkih aplikacija sa velikim brojem ciklusa opterećenja, [93, 96]. Za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja, izrađen je adapter.



Slika 61. Davač i transponder pritiska HBM 1-P31C/3000 bar s adapterom.

### 13.2.6 Hidraulična manuelna testna pumpa visokog pritiska CPP 700-H

Hidraulična manuelna testna pumpa odnosno generator pritiska, koristi se za ispitivanje ili kalibraciju mehaničkih ili elektronskih instrumenata putem uporednih mjerenja. Ova ispitivanja mogu se izvršiti u laboratoriji, radionici ili na licu mjesta. Uzimajući u obzir kompaktnost i dimenzije pumpe, omogućeno je jednostavno stvaranje pritiska do 700 bar. Hidraulični fluidi koji se mogu koristiti u pumpi su: mineralna ulja i čista voda (sa ili bez kalcijumkarbonata), [89].



Slika 62. Hidraulična manuelna testna pumpa visokog pritiska CPP 700-H.

<sup>69</sup> Monolitično – iz jednog komada.



### 13.2.7 Mehanička kidalica Messphysik Beta 200

Mehanička kidalica Messphysik Beta 200 je univerzalna kidalica namijenjena za ispitivanje različitih vrsta materijala na savijanje, pritisak i zatezanje. Mjerni opseg uređaja iznosi od 20 do 500 mm, sila zatezanja/sabijanja do 200 kN, a klasa tačnosti je 0,5. Uređaj se sastoji iz: prese, upravljačke jedinice, videoekstenziometra, servo motora sa naponskom jedinicom i zaštitne kabine, [37].



Slika 63. Mehanička kidalica Messphysik Beta 200.

### 13.3 Plan eksperimentalnih istraživanja

Tabela 12. Plan eksperimentalnih istraživanja deformacija na čeličnoj i polukompozitnoj boci.

Primijenjeni fluid za istraživanje	Naterijal boce i intenzitet pritiska	Pravac detekcije deformacije	Mjerna mjesta	Broj ponavljanja	Termografska detekcija temperaturnih polja
Voda	Čelik EN 30CrNiMo8 300 bar	uzdužni	MM 1	3×	ne
			MM 2	3×	ne
			MM 3	3×	ne
		tangencijalni	MM 1	3×	ne
			MM 2	3×	ne
			MM 3	3×	ne
		rezultujući	MM 1	3×	ne
			MM 2	3×	ne
			MM 3	3×	ne
Komprimovani medicinski vazduh iz „banke vazduha“	Polukompozit (aluminijumski cilindar sa karbonskim i staklenim vlaknima povezani epoksidnom smolom) 300 bar	uzdužni	MM 1	3×	da
			MM 2	3×	da
			MM 3	3×	da
		tangencijalni	MM 1	3×	da
			MM 2	3×	da
			MM 3	3×	da
		rezultujući	MM 1	3×	da
			MM 2	3×	da
			MM 3	3×	da

### **13.4 Distribucija toplote pri kompresorskom punjenju boca izolacionih aparata i ekspanziji komprimovanog medicinskog vazduha**

Prilikom punjenja boca komprimovanim medicinskim vazduhom dolazi do povećanja pritiska i količine komprimovanog vazduha, a kao posljedica ovog procesa dolazi do povećanja temperature boca, koja može prouzrokovati terimičke dilatacije, stvaranjem akcidentne situacije, ukoliko je neispravna boca u koju se komprimuje medicinski vazduh. Tokom punjenja boca komprimovanim medicinskim vazduhom, distribucija toplote je u funkciji vremena punjenja i materijala stijenke boce, dok je vrijeme punjenja u funkciji zapremine i nazivnog pritiska boce, čime se utiče na količinu komprimovanog vazduha. Distribucija toplote praćena je pomoću termovizijske kamere u toku kompresije i ekspanzije medicinskog vazduha, [6].

Termovizija predstavlja detekciju emitovane toplote nekog tijela u području infracrvenog zračenja. Poznato je da svako tijelo emituje elektromagnetne talase različitih talasnih dužina u zavisnosti od njegove temperature. Pomoću termovizijskih kamera, može se vidjeti dio infracrvenog spektra, koje ljudsko oko ne može registrovati. Ove kamere, koriste se i u uslovima slabe vidljivosti, obzirom da kvalitet atmosfere svjetlosti ne utiče na kvalitet slike, što indikuje da se mogu se koristiti u potpunom mraku, [5].

Kolorizacija termovizijske slike zavisi od namjene termovizijske kamere. Termovizijske kamere namijenjene za upotrebu u vatroganim jedinicama koriste se pri višim temperaturama, samim tim kolorizacija termovizijske slike javlja se u intervalima od 150 °C do 650 °C, u zavisnosti od izabranog područja rada. Niže temperature na ovim vrstama kamera, kolorizuju se uglavnom u crno-bijelim nijansama – sivim tonovima, tako da crna područja predstavljaju najniže temperature, a bijela područja temperature do 150 °C, [5, 6]. Na ovaj način kolorizuje se i displej termovizijske kamere FLIR K 65, koja je korištena prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela – ispitivanja pri kompresiji vazduha iz okoline u boce SCBA i SCUBA aparata kompresorima visokog pritiska, kao i ekspanziji medicinskog vazduha iz tih boca.

#### **13.4.1 Kompresija medicinskog vazduha u sistem sa bocama „banka vazduha”**

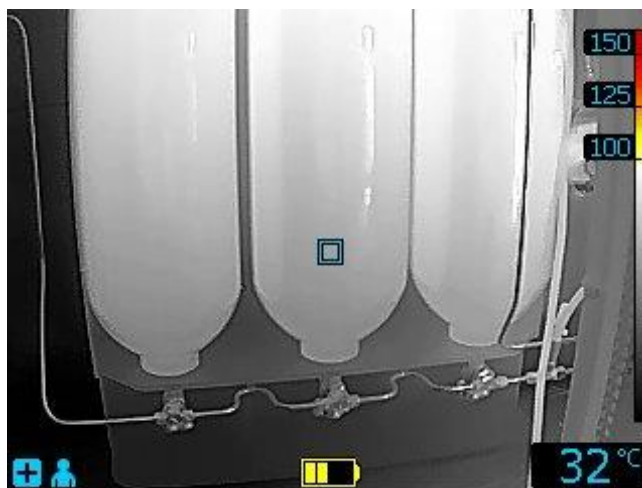
Neposredno nakon montaže komponenti sistema sa bocama „banke vazduha” u kompresorskoj stanici Vatrogasne brigade Banja Luka, vršeno je punjenje iste komprimovanim medicinskim vazduhom, pomoću kompresora visokog pritiska Bauer K14. Prvo punjenje, „banke vazduha“ izvršeno je dana 24.04.2017. godine. Zabilježene su i vrijednosti

mikroklimatskih parametara na početku i na kraju punjenja, a iznosile su:

- Na početku punjenja  $13^{30}$ ;  $T_{ok}$  16 °C;  $T_{pros}$  13 °C;
- Na kraju punjenja  $18^{00}$ ;  $T_{ok}$  19 °C;  $T_{pros}$  23 °C; P 995 mbar; vlažnost 46 % ( $16^{07}$ ).

**Tabela 13.** Punjenje „banke vazduha“.

Vrijeme [min]	Pritisak u boci [bar]	Temperatura °C		
		Ventil/dno boca	Sredina boca	Gornji dio boca
1	-	11	13	14
5	-	14	16	17
10	Na konzoli 20	17	18/19	18/19
15	25	20	20	21
20	30	18/19	21	22
25	35	22	23	23/24
30	40	22/23	24	25
60	75	22/26	25/28	29/30
90	110	27/30	33	33
120	140	29/32	35	36
150	185	25/30	36	34
180	220	28/34	37	38
210	255	26/33	37	37
240	300	29/35	38	39
270	325	39/34	37/38/36	37/39/37



**Slika 64.** Termovizijska slika – praćenje temperature prilikom punjenja „banke vazduha“.

### 13.4.2 Izbor boca za eksperimentalno istraživanje

Iz prethodnih poglavlja, poznate su vrste boca (koje se koriste za SCBA i SCUBA aparate) nazivni pritisci i njihove zapremine.

Ekperimentalna istraživanja su izvedena na dvije polukompozitne boce različitih proizvođača zapremine 6,8 l; čeličnoj boci za SCBA aparate zapremine 6 l i čeličnoj boci za SCUBA aparate zapremine 12 l.

### 13.4.3 Kompresija medicinskog vazduha u boce

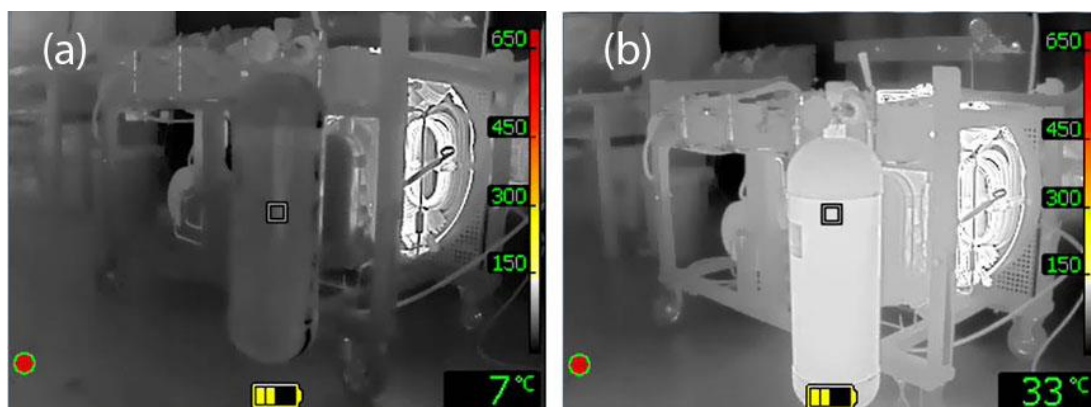
Tokom izvođenja eksperimenta, uzeta je u obzir temperatura vazduha u kompresorskoj stanici, pri kojoj je vršeno punjenje boca komprimovanim medicinskim vazduhom.

Displej termovizijske kamere kolorizovan je crno-bijelim tonovima zbog niske temperature okoline ( $T_{ok} = 5\text{ °C}$ ), i temperature u kompresorskoj stanici ( $T_{pros} = 8\text{ °C}$ ). Obe polukompozitne boce na samom početku punjenja, kolorizovane su takođe crnom bojom. Tokom punjenja u vremenskom intervalu od 3 min; kolorizacija polukompozitnih boca, vršena je ravnomjerno cijelom dužinom u sivim tonovima, a sivi tonovi su postajali svjetlijih nijansi, što ukazuje da se polukompozitne boce ravnomjerno zagrijavaju.

Na boci koja je imala gumene obloge (zaštita od mehaničkih oštećenja na vrhu i na dnu boce), nije bilo moguće izvesti precizno mjerenje zagrijanosti u tim područjima, već su mjerenja zagrijanosti vršena neposredno uz gumene obloge (sl. 65a i 65b). Na tačnost izmjerenih temperatura prilikom mjerenja, uticalo je strujanje vazduha za hlađenje kompresora, koji je usmjeren preko boca, tako da je izmjerena temperatura na bocama varirala za 1-2 °C.

Temperatura na cilindru I stepena kompresora visokog pritiska tokom ispitivanja, dostigla je vrijednost od 117 °C, a maksimalna temperatura cijevi u sistemu visokog pritiska kompresora, iznosila je 78 °C uz konstantno hlađenje.

Pri određenim vrijednostima pritiska vazduha u bocama, tokom punjenja, praćena je temperatura na: ventilu, gornjem i donjem dijelu boce. Na dijagramu broj: 8, prikazana je promjena temperature boca porastom pritiska u boci, [6].

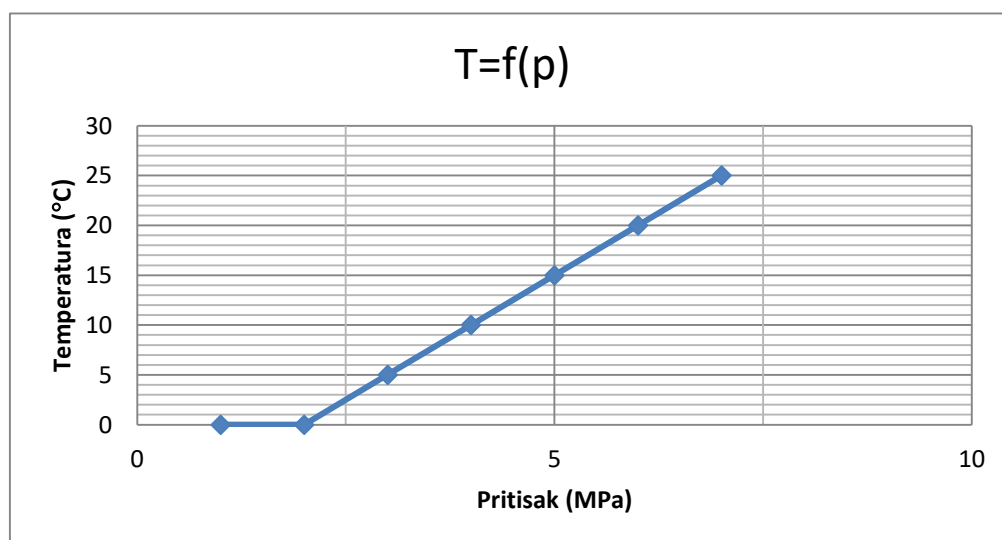


**Slika 65.** Termovizijska slika – polukompozitna boca sa gumenim oblogama (a) na početku i (b) na kraju punjenja; 6.8 l; 300 bar, [6].

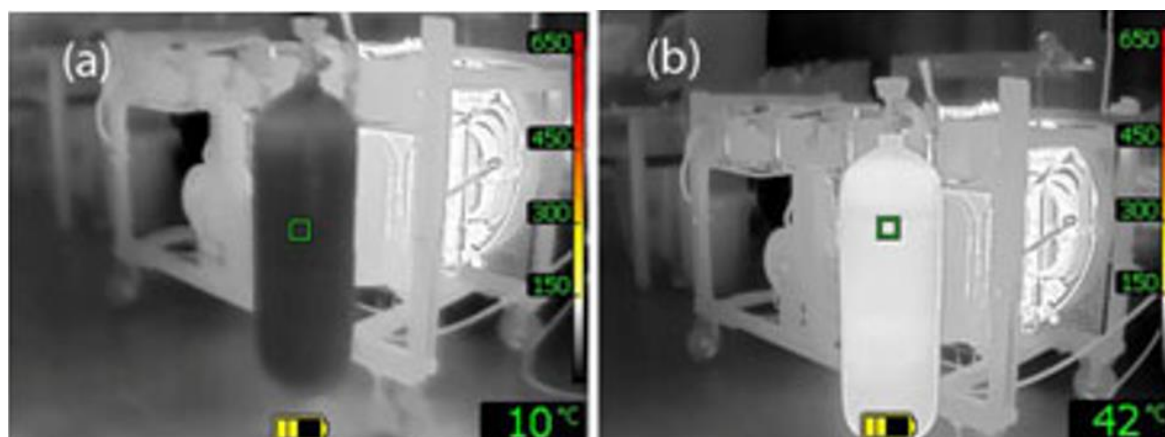
Dobijene vrijednosti su prikazane u tabeli 14; a na slici 65, zabilježena je snimka termovizijskom kamerom.

**Tabela 14.** Polukompozitna boca sa gumenim oblogama 6.8 l; 300 bar (int. br. XV), [6].

Vrijeme [min.]	Pritisak [MPa]	Temperatura [°C]		
		na ventilu, M1	ispod gumene obloge, M2	iznad gumene obloge, M3
3	5	16	12	12
5	10	18	22	20
7,5	15	22	28	25
9	20	26	32	30
10,5	25	28	33	33
13	30	32	37	36
13,7	32.5	34	39	38



**Dijagram 8.** Grafički prikaz promjena temperature u funkciji promjene pritiska u boci, [6].



**Slika 66.** Termovizijska slika – polukompozitna boca bez gumenih obloga (a) na početku i (b) na kraju punjenja; 6,8 l; 300 bar, [6].

**Tabela 15.** Polukompozitna boca bez gumenih obloga 6,8 l; 300 bar (int. br. 16), [6].

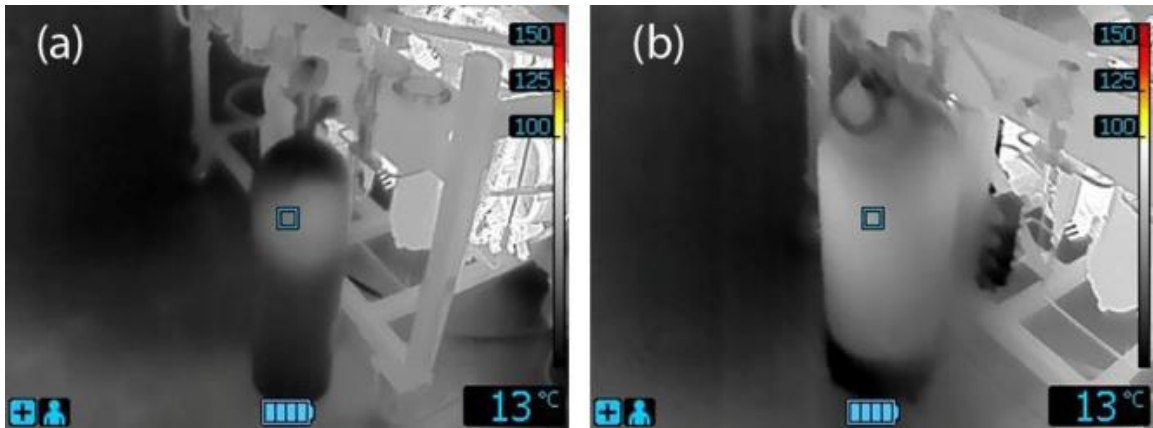
Vrijeme [min.]	Pritisak [MPa]	Temperatura [°C]		
		na ventilu, M1	ispod gumene obloge, M2	iznad gumene obloge, M3
2,5	5	15	18	16
3	10	20	23	22
5	15	23	28	28
7	20	28	33	32
8	25	30	36	35
10	30	30	40	39
10 i 25"	32.5	35	42	41

Toplota prilikom punjenja komprimovanog medicinskog vazduha kod polukompozitnih boca ravnomjerno raspoređivala (sl. 66; t. 15), dok se na čeličnim bocama toplota neravnomjerno raspoređivala do samog kraja punjenja boce, kada je došlo do izjednačavanja toplote. Cilindrični dio na mjestu gdje vazduh izlazi iz cjevčice na ventilu u unutrašnjosti čelične boce, najviše se zagrijavao (sl. 67; t. 16).

U praksi je poznata pojava da se prilikom upotrebe izolacionih aparata, u zavisnosti od protoka vazduha kroz ventil boce, javlja kondenz, a nakon izvjesnog vremena dolazi do mržnjenja ventila, ali i tijela boce.

Trideset minuta nakon punjenja polukompozitne boce bez gumenih obloga, vršeno je ispuštanje komprimovanog medicinskog vazduha iz iste (sl. 68) sa aproksimativnim protokom komprimovanog medicinskog vazduha kroz ventil, te termovizijskom kamerom ubrzo

identifikovana temperatura na ventilu boce ( $-1^{\circ}\text{C}$ ), a temperatura tijela boce počela je srazmjerno da opada.



**Slika 67.** Termovizijska slika – čelične boce na početku punjenja za SCBA 6 l; 300 bar (a) i SCUBA 12 l; 200 bar aparate(b), [6].

**Tabela 16.** Čelična boca za SCBA aparate 6 l; 300 bar (int. br. 16), [6].

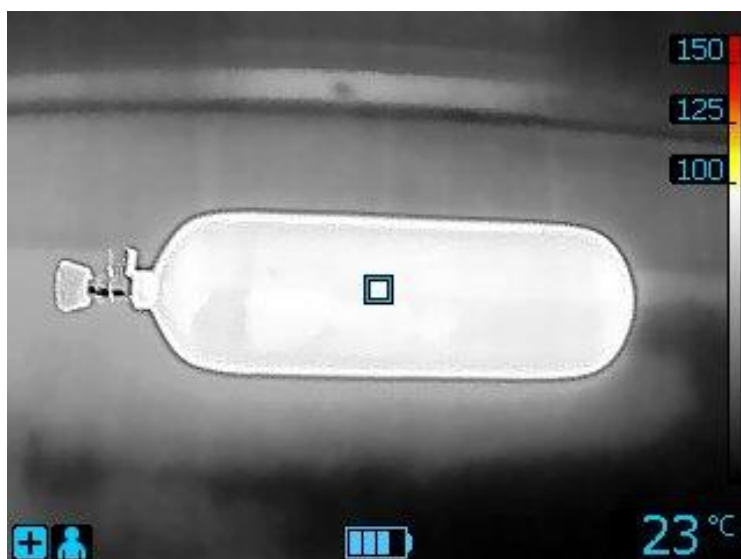
Vrijeme [min.]	Pritisak [MPa]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]		
		na ventilu, M1	ispod gumene obloge, M2	iznad gumene obloge, M3
2,5	5	13	20	15
3	10	18	26	22
4	15	23	30	27
6	20	30	35	33
7,5	25	29	39	37
8,5	30	31	42	40
9,5	32,5	32	43	41

**Tabela 17.** Čelična boca za SCUBA aparate 12 l; 200 bar, [6].

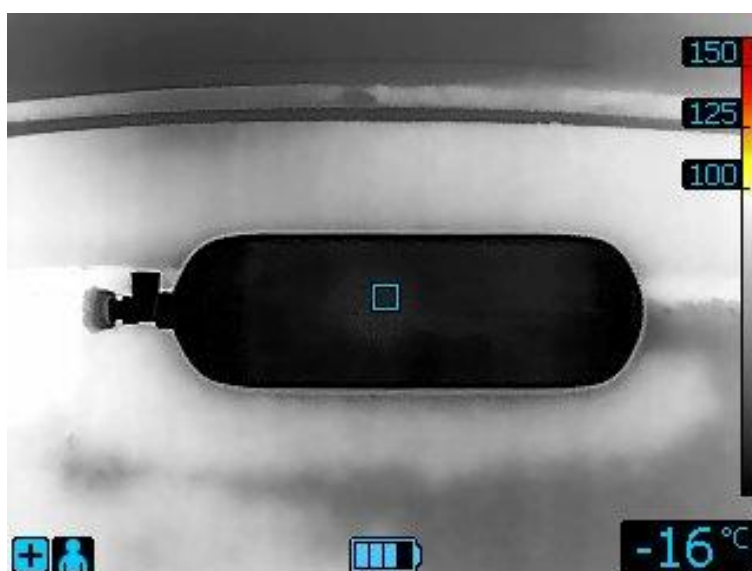
Vrijeme [min.]	Pritisak [MPa]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]		
		na ventilu, M1	ispod gumene obloge, M2	iznad gumene obloge, M3
5	5	10	12	18
7,5	10	12	26	25
12	15	14	32	30
15	20	23	37	36
17	22	24	38	37

Opadanjem vrijednosti pritiska kroz određeni vremenski interval, moglo se konstatovati da je dolazilo do variranja vrijednosti temperatura na ventilu, tijelu i dnu boce, a naročito pri blagom povećanju protoka nakon sedmog minuta, tabela 18. Nakon 13 minuta, temperatura

boce iznosila je  $-16^{\circ}\text{C}$  (sl. 69), a najniža temperatura boce, izmjerena je jedan minut kasnije, nakon ispuštanja kompletnog vazduha iz boce i iznosila je  $-18^{\circ}\text{C}$ . Na ventilu boce, već nakon devet minuta od početka ispuštanja komprimovanog medicinskog vazduha iz polukompozitne boce, termovizijskom kamerom Flir K65, izmjerena je temperatura manja od  $-20^{\circ}\text{C}$  (t. 18), a to je ujedno i najniža temperatura koju ova termovizijska kamera može izmjeriti.



**Slika 68.** Termovizijska slika – temperatura i kolorizacija polukompozitne boce prije ispuštanja KMV.



**Slika 69.** Termovizijska slika – temperatura i kolorizacija polukompozitne boce, 13 min. nakon ispuštanja KMV.



**Tabela 18.** Ispuštanje komprimovanog medicinskog vazduha iz polukompozitne boce bez gumenih obloga 6.8 l; 300 bar (int. br. 16), [6].

Vrijeme pražnjenja [min.]	T na ventilu boce (° C)	T boce (° C)	T boce u donjem dijelu (° C)
1	-1	21	22
2	0	20	20
3	-1	18	17,6
4	0	16	16
5	-1	12	12
6	0	11	11
7	-3	9	9
7,5	-14	-4	0
8	-18	1	-3
9	>-20	-4	-9
14	>-20	-18	>-20



**Slika 70.** Termovizijska slika – temperatura na kompresoru prilikom punjenja.

### 13.5 Distribucija napona kod boca izolacionih aparata pri normalnim i brzim ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha

Boce izolacionih aparata mogu se puniti pomoću kompresora visokog pritiska ili direktnim spajanjem na „banke vazduha“. Tokom punjenja boca izolacionih aparata sa kompresorima visokog pritiska, ili pomoću „banki vazduha“ dolazi do porasta pritiska u vremenu i količine komprimovanog medicinskog vazduha u boci, a kao posljedica javlja se porast napona u materijalu boce koji je u direktnoj sprezi sa navedenim parametrima. Pomoću tenzometrijskih mjernih traka identifikuje se intenzitet napona i uticaj porasta pritiska u vremenu na napone čelične boce. Brzina punjenja je u funkciji: zapremine boce, nazivnog pritiska i protoka vazduha u jedinici vremena. Vrijeme punjenja pomoću kompresora visokog pritiska zavisi od zapremine i nazivnog pritiska te od kapaciteta kompresora, dok je kod „banki

vazduha“ bitna akumulirana količina komprimovanog medicinskog vazduha. Vremenski interval punjenja boce zapremine 6 l/300 bar na kompresoru iznosi oko 10 min, a na „bankama vazduha“ (ekspanzija iz akumulatora nazivnog pritiska 30 MPa sa tri boce zapremine 50 l) od 45 do 60 skundi.

Princip punjenja vazduha iz okoline kompresorima visokog pritiska u boce izolacionog aparata, objašnjen je u ranijim poglavljima. Uzimajući u obzir, vrijeme punjenja boca, direktno kompresorima, je dugo pa se u zadnje vrijeme boce pune iz sistema sa bocama koji se nazivaju „banke vazduha“ ili akumulatori vazduha. Ovi spremnici, odnosno „banke vazduha“ koriste se kao stabilne (u kompresorskim stanicama) i mobilne jedinice (posebna je primjena na specijalnim vozilima za gašenje požara u tunelima, koje su namijenjene su za dopunjavanje boca izolacionih aparata<sup>70</sup>; dvije boce i napajanje SUS motora vazduhom; četiri boce za omogućavanje njihovog rada u specifičnim uslovima – nedostatak okolnog vazduha za sagorijevanje smjese u motoru). Vatrogasna vozila za intervenisanje u tunelima, nastala su nakon požara u tunelu Mont Blanc, koji se dogodio u martu 1999. godine, [12, 82, 92, 95].

Brzo punjenje boca izolacionih aparata vrši se iz razloga da se skрати vrijeme odsustva vatrogasaca iz zone gašenja požara ili hemijskog akcidenta. Tokom brzog punjenja boca, vatrogasac se izlaže opasnosti usljed mogućeg akcidenta – eksplozije boce, [7].

Ispitivanje je izvedeno na čeličnoj boci za SCBA aparate zapremine 6 l.

### 13.5.1 Kompresija medicinskog vazduha u boce

Tokom izvođenja eksperimenta, izmjerena je temperatura vazduha u kompresorskoj stanici, pri kojoj je vršeno punjenje boca komprimovanim medicinskim vazduhom sa kompresora i iz „banke vazduha“.

Zbog niske temperature okoline ( $T_{ok} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), i temperature u kompresorskoj stanici ( $T_{pros} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), displej termovizijske kamere je kolorizovan crno-bijelim tonovima, a čelična boca na samom početku punjenja, kolorizovana je crnom bojom. Tokom punjenja u vremenskom intervalu od 3 min; kolorizacija boce, vršena je neravnomjerno u sivim tonovima do samog kraja punjenja boce, kada je došlo do izjednačavanja toplote. Čelična boca (sl. 71, 72, 74, 75, 76 i 77), najviše se zagrijavala na mjestu gdje izlazi vazduh iz cjevčice na ventilu u unutrašnjosti

---

<sup>70</sup> U daljem tekstu IA.

boce.



**Slika 71.** Termovizijska slika – čelična boca na početku punjenja za SCBA aparate 6 l; 300 bar, [7].



**Slika 72.** Presjek čelične boce.

U toku punjenja boce na kompresoru visokog pritiska, pri određenim vrijednostima pritiska vazduha u bocama, praćena je temperatura na: ventilu, gornjem i donjem dijelu boce.

Shodno, navedenom, prilikom punjenja boca izolacionih aparata, na stijenkama istih, javljaju se tri vrste napona (sl. 73) koje možemo izračunati, [77, 78]:

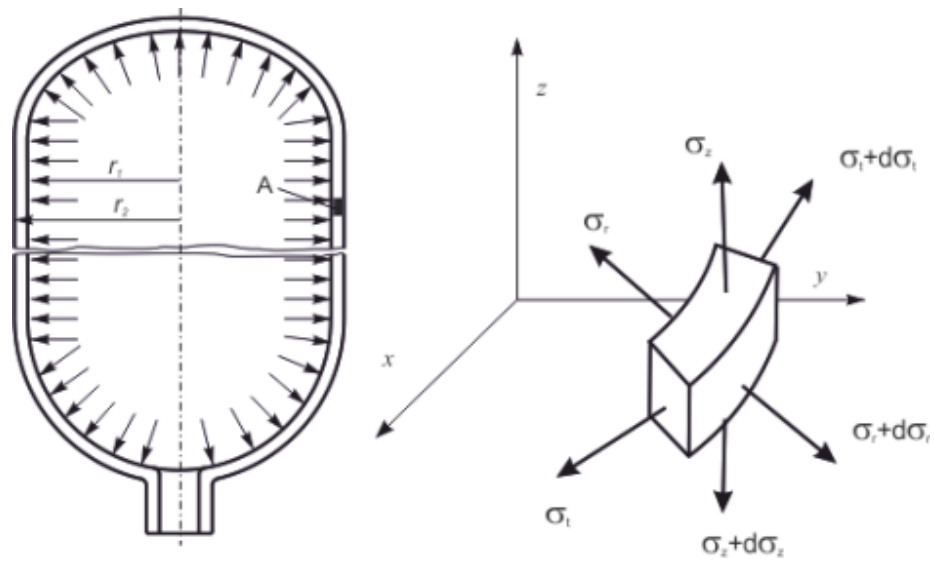
○ Napon u pravcu radijalne ose 
$$\sigma_r = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (17)$$

○ Napon u pravcu tangencijalne ose 
$$\sigma_t = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad (18)$$

○ Napon u pravcu aksijalne z-ose 
$$\sigma_z = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (19)$$

○ Intenzivnost napona može se izračunati po jednakosti:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2]} \leq \sigma_d \quad (20)$$



Slika 73. Naponi na elementarnom dijelu boce izolacionog aparata, [7].



Slika 74. Termovizijska slika – temperatura čelične boce proizvođača Luxfer u toku punjenja na konzoli „banke vazduha“.

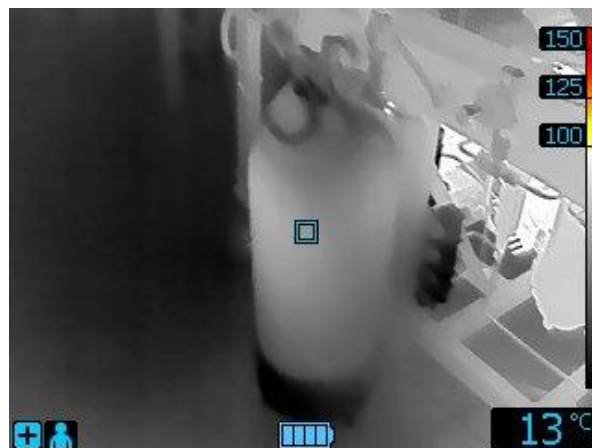
Najviša izmjerena temperatura, prozrokovana naglom ekspanzijom komprimovanog medicinskog vazduha izmjerena na čeličnoj boci u vremenskom intervalu od 50 sec, iznosila je 44° C, dok je na polukompozitnoj boci u vremenskom intervalu od 45 sec, iznosila 34° C.



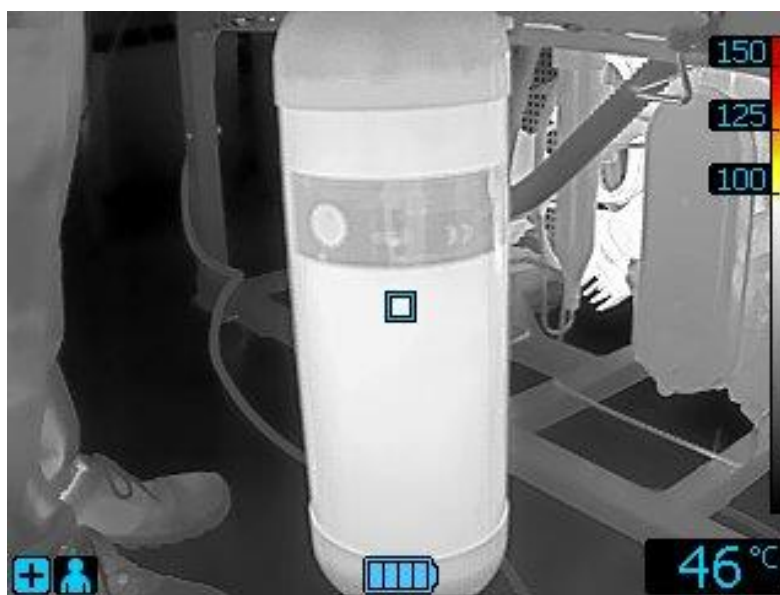
**Slika 75.** Termovizijska slika – temperatura polukompozitne boce proizvođača Luxfer u toku punjenja na konzoli „banke vazduha“.



**Slika 76.** Termovizijska slika – punjenje čelične SCBA boce na kompresoru.



**Slika 77.** Termovizijska slika – punjenje čelične SCUBA boce na kompresoru.



**Slika 78.** Termovizijska slika – temperatura polukompozitne boce proizvođača SCI neposredno pred kraj punjenja na kompresoru visokog pritiska.

Najviša izmjerena temperatura, prozrokovana normalnom ekspanzijom komprimovanog medicinskog vazduha izmjerena na čeličnim bocama za:

- SCBA (proizvođača Luxfer) u vremenskom intervalu od 540 sec, iznosila je 44° C,
- SCUBA (proizvođača Faber) u vremenskom intervalu od 960 sec, iznosila je 40° C,

Najviša izmjerena temperatura, prozrokovana normalom ekspanzijom komprimovanog medicinskog vazduha izmjerena na polukompozitnim bocama proizvođača:

- SCI u vremenskom intervalu od 600 sec, iznosila je 46° C (sl. 78),
- Luxfer u vremenskom intervalu od 540 sec, iznosila je 47° C

### 13.6 Ispitivanje hemijskog sastava materijala čelične boce

Za potebe eksperimentalnog istraživanja, a u svrhu ispitivanja hemijskog sastava materijala od kojeg je izrađena čelična boca švedskog proizvođača AGA (preteča Interspira) proizvedene u novembru 1981. godine izvršeno je isijecanje iste (sl. 72), te je od dobijenog isječka, jedan komad, dimenzija 53x26x4 mm (sl. 79) poslat na laboratorijsko ispitivanje. Nakon isijecanja boce, na njenoj unutrašnjoj stijenci nisu uočene degradacije materijala prouzrokovane kondenzatom i dugogodišnjom upotrebom.



**Slika 79.** Isječak čelične boce nakon laboratorijskog ispitivanja.

Ispitivanje je izvršeno u laboratoriji preduzeća „Jelšingrad“ u Banjoj Luci, dana 13.06.2019. godine, a dobijeni rezultati ukazuju na NiCrMoMn legirani čelik, sastava (Prilog 2):

**Tabela 19.** Hemijski sastav materijala čelične boce.

Naziv hemijskog elementa i procenat u leguri									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
0,30302	0,46993	0,26257	0,01193	0,00374	1,85831	1,80784	0,17444	0,43617	0,00670
Ti	Al	Nb	W	As	Sn	Co	Pb	B	Sb
0,00263	0,02102	0,00344	0,01894	0,01200	0,01287	0,03904	0,00029	0,00020	0,00358
Ta	Zr	Bi	Ca	Te	Zn	Ce	N	Fe	
-0,00031	0,00051	-0,00471	0,00015	-0,00002	0,00024	0,00109	-0,03632	94,5907	

## 13.7 Detekcije dilatacija na površini boca sa vodom pod pritiskom

### 13.7.1 Eksperimentalna instalacija i postupak ispitivanja

Eksperimentalni dio istraživanja, obavljen je na Katedri za inženjerstvo zaštite radne sredine, Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Banjoj Luci (vodom pod pritiskom) i komprimovanim medicinskim vazduhom u kompresorskoj stanici Vatrogasne brigade Banja luka (na „banki vazduha“).

Neposredno prije vršenja eksperimentalnog dijela, izvršene su neophodne pripreme (t. 20): vaganje napunjenih posuda pod pritiskom (čelične i polukompozitnih boca) SCBA aparata, koje su korištene prilikom vršenja ovog eksperimenta, mjerenje nivoa buke na ventilima prilikom ispuštanja komprimovanog medicinskog vazduha, zatim vaganje nakon ispuštanja komprimovanog medicinskog vazduha i odvrtnje ventila (na spoju sa priključkom boca). Boce su očišćene od nečistoća, a na mjestima na kojima su postavljane mjerne trake, uklonjen je sloj zaštitne boje do materijala od kojeg su izrađene – čelik, odnosno kompozitni materijal (sl. 80).

**Tabela 20.** Tehnički podaci za čeličnu i polukompozitne boce (izmjerene vrijednosti).

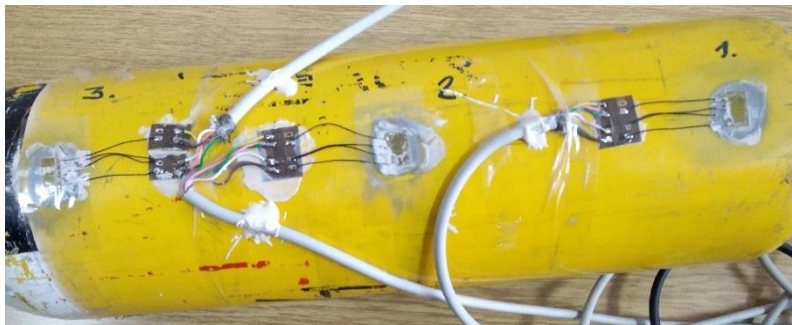
Proizvođač, vrsta boce, fabrički broj, godina proizvodnje	Interni broj boce	P (bar)	Masa napunjene boce pod pritiskom (fabrička masa) (kg)	Masa prazne boce sa ventilom (kg)	Masa prazne boce bez ventila (i bez gumenih obloga) (kg)	Nivo buke pri ispuštanju KMV (dB)
MSA, Luxfer, polukompozitna, FCVK 07860, 12/2018	67	290	6,4 (3,9)	4,5	4,0	93
Interspiro, SCI, polukompozitna, 8538, 07/2009*	XX	285	7,3 (4,9)	5,5	4,7 (4,3)*	
MSA, Luxfer, čelična, 185038, 04/2006	4	160	9,7 (8,37)	8,7	8,3	

\* Na interspirovu polukompozitnu bocu nisu lijepljene mjerne trake, a u gornjem i donjem dijelu imaju gumene obloge radi zaštite od mehaničkih oštećenja, koje su skinute prilikom vaganja.

**Slika 80.** Mjerna mjesta na čeličnoj boci prije lijepljenja mjernih traka.

Neposredno prije lijepljenja mjernih traka, sa sredstvom za odmašćivanje, očišćena su mjesta na kojima se lijepe mjerne trake, te je izvršeno lijepljenje mjernih traka. Nakon toga izvršena je provjera otpora, kao i numerisnje mjernih traka na obe boce na pozicijama (mjerno mjesto 1 - dno boce, mjerno mjesto 2 - sredina boce i mjerno mjesto 3 - vrh boce), slika 81 i 82.





**Slika 81.** Čelična boca sa zalijepljenim mjernim trakama.



**Slika 82.** Polukompozitna boca sa zalijepljenim mjernim trakama.

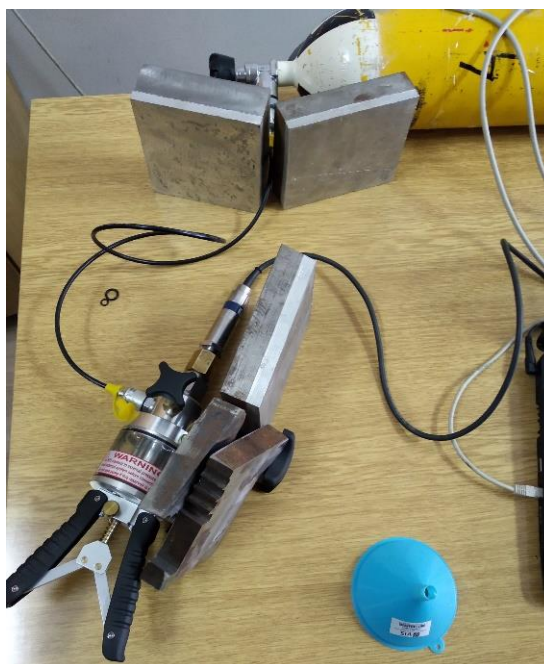
Oprema za eksperimentalno mjerenje (sl. 83) se sastoji od: mjernih traka XY31-6/120, davača i transmitera pritiska HBM 1-P3IC/3000 bar, hidraulične manuelne pumpe visokog pritiska CPP 700-H sa ventilom za rasterećenje od pritiska i odgovarajućeg softvera.

Obzirom da su ispitivanja vršena na visokim pritiscima (300 bar), uz hidrauličnu manuelnu pumpu visokog pritiska i uz ventile čelične ili polukompozitne boce iz bezbjednosnih razloga postavljene su masivne čelične ploče.

U zavisnosti od zapremine boce koja je ispitivana vodom pod pritiskom<sup>71</sup> sipan je ispitni fluid, voda (u čeličnu bocu – 6 l, a u kompozitnu bocu - 6,8 l), temperature 20° C, a zatim je navrnut ventil i izvršeno od vazdušenje instalacije.

Eksperimentalna ispitivanja na obe vrste SCBA boca izvršena su za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, manuelno, a obrađivana i snimana softverom Catman Easy. Tokom eksperimentalnog ispitivanja, na vanjskoj površini boca mjerene su uzdužne, tengencijalne i rezultujuće deformacije na pritiscima od 0 bar do 200, 250 i 300 bar. Po završenom ispitivanju svake boce, pristupilo se obradi snimljenih rezultata.

<sup>71</sup> U daljem tekstu skraćeno VPP.



**Slika 83.** Oprema za eksperimentalno mjerenje vodom pod pritiskom.

### 13.8 Ispitivanja boca SCBA aparata na „banki vazduha“

Eksperimentalni dio istraživanja čelične i polukompozitne boce SCBA aparata na „banki vazduha“ obavljeno je u kompresorskoj stanici Vatrogasne brigade Banja Luka. Prilikom ovog eksperimentalnog ispitivanja korištene su iste boce kao i za ispitivanje vodom pod pritiskom, samo što su se u ovom slučaju boce postavljale na konzolu „banke vazduha“ (sl. 84 i 85).

Eksperimentalna ispitivanja na obe vrste SCBA boca izvršena su za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, protokom komprimovanog medicinskog vazduha iz boca tzv. „banke vazduha“ i snimana softverom Catman Easy. Tokom eksperimentalnog ispitivanja, identifikovane su uzdužne, tengencijalne i rezultujuće deformacije na pritiscima od 0 bar do 180 i 255 bar.



Slika 84. Čelična boca na konzoli „banke vazduha“.

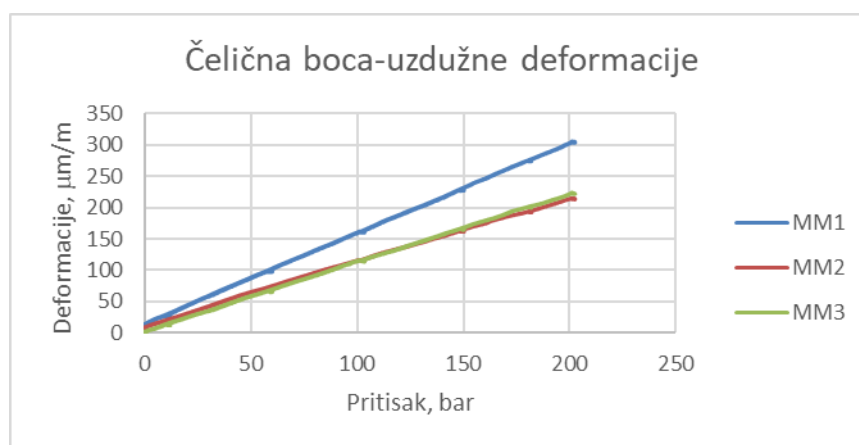


Slika 85. Polukompozitna boca na konzoli „banke vazduha“.

## 14. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA DILATACIJA NA VANJSKOJ POVRŠINI BOCA

### 14.1 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja vodom za čeličnu bocu

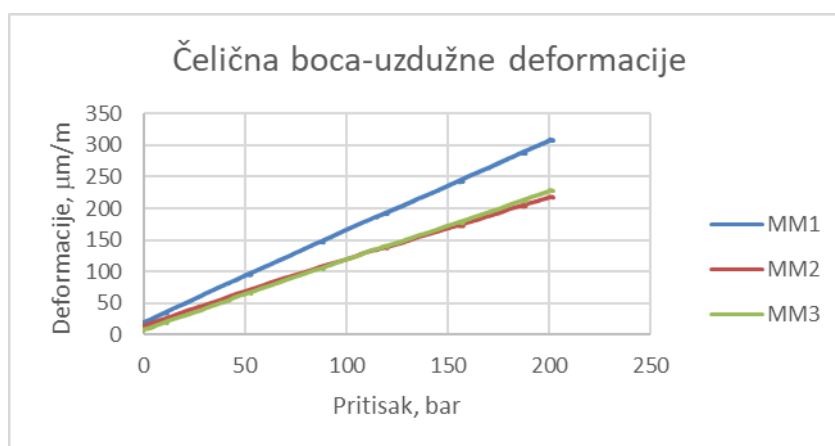
#### 14.1.1 Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar



\* Pojašnjenje skraćenica u desnom dijelu dijagrama:

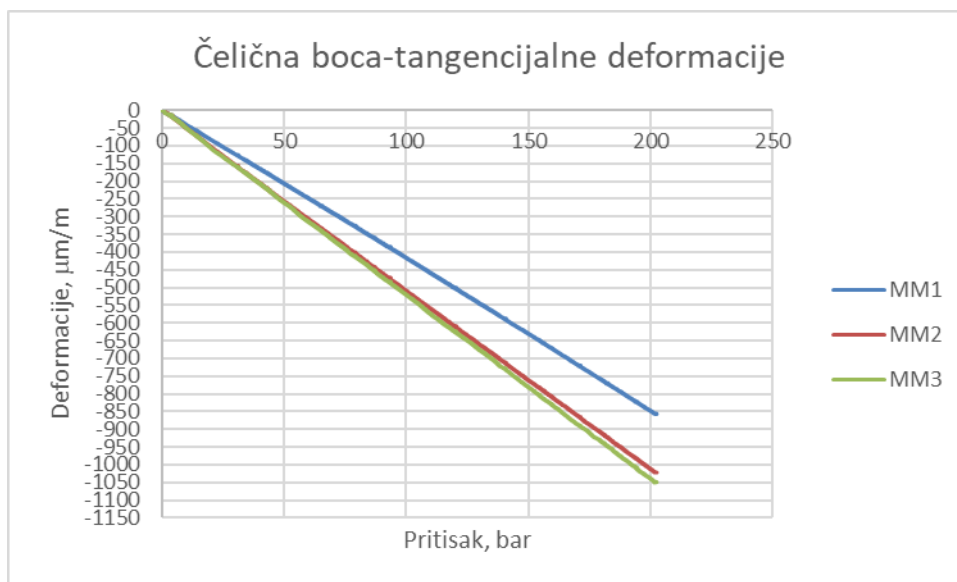
- MM 1 – mjesto 1 (donji cilindrični dio boce),
- MM 2 – mjesto 2 (cilindrični dio na sredini boce),
- MM 3 – mjesto 3 (gornji cilindrični dio boce).

**Dijagram 9.** Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

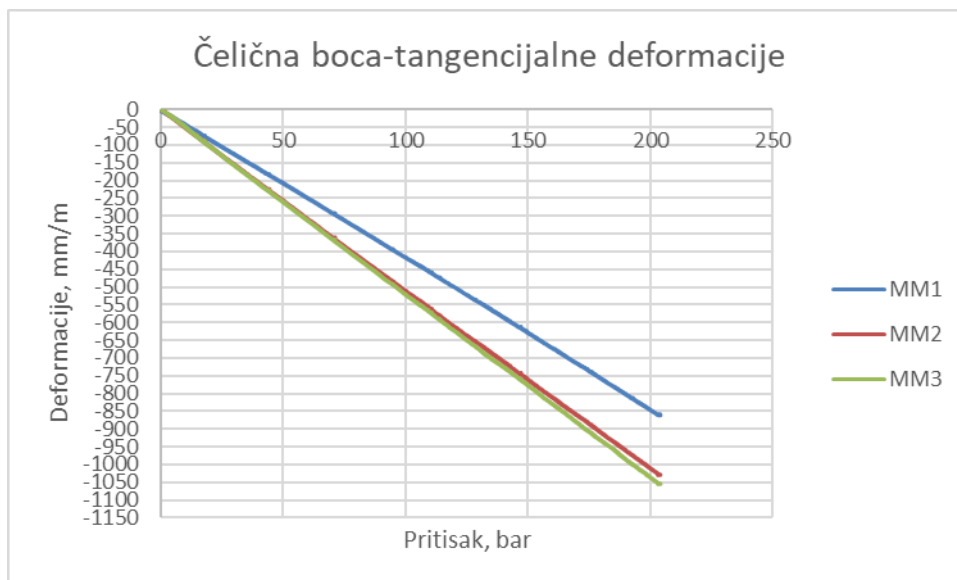


**Dijagram 10.** Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

### 14.1.2 Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar

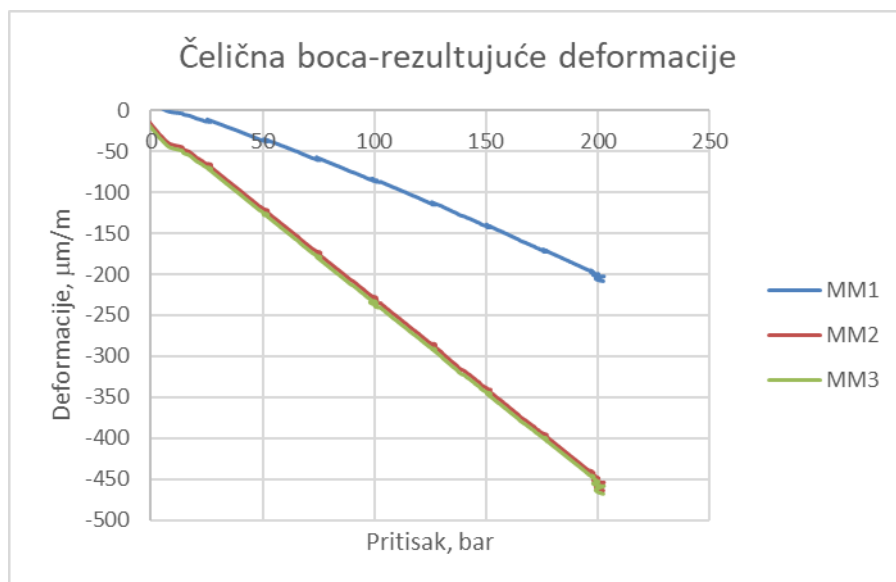


Dijagram 11. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

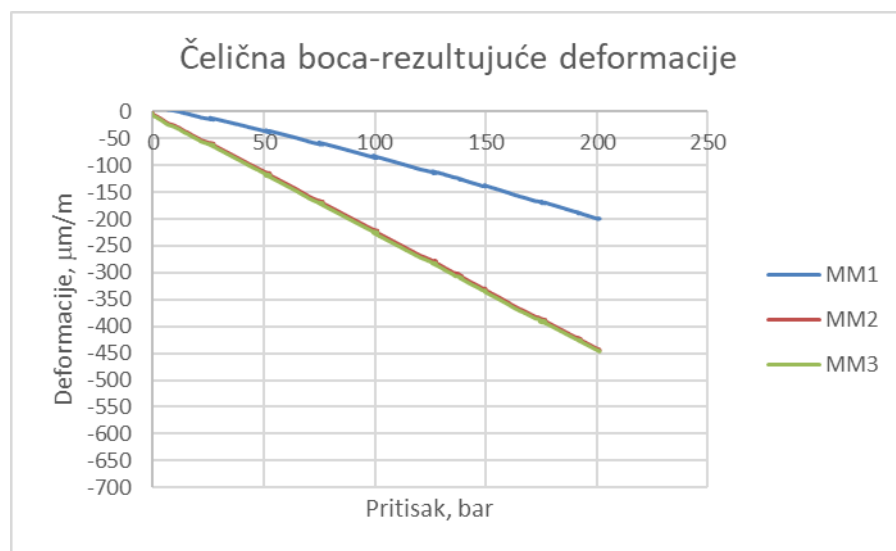


Dijagram 12. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

### 14.1.3 Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar

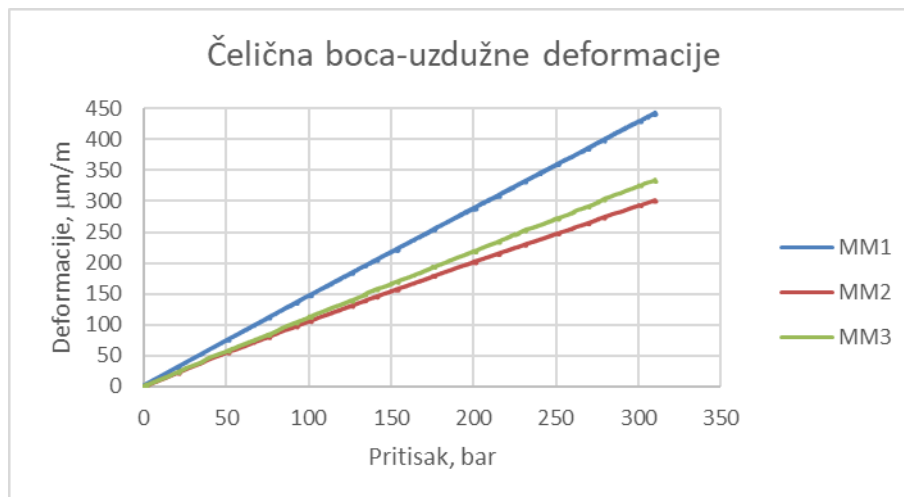


Dijagram 13. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

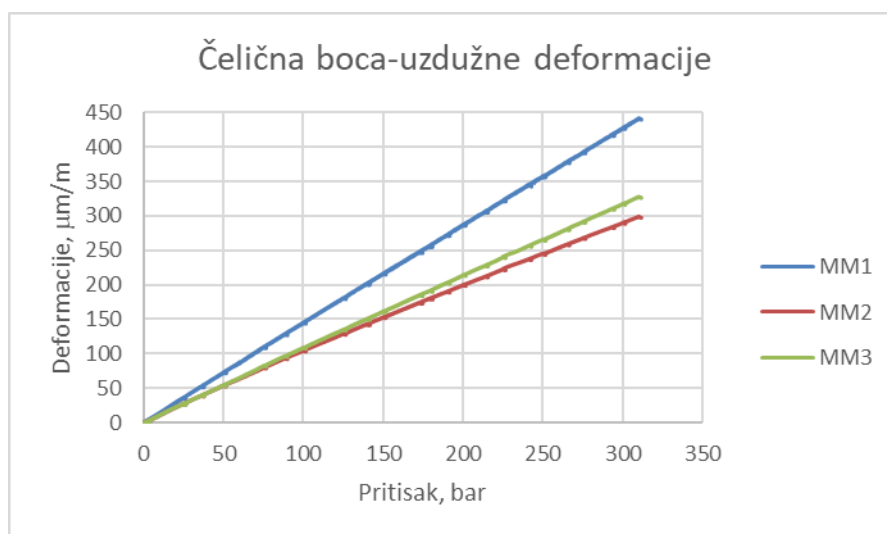


Dijagram 14. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

#### 14.1.4 Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar

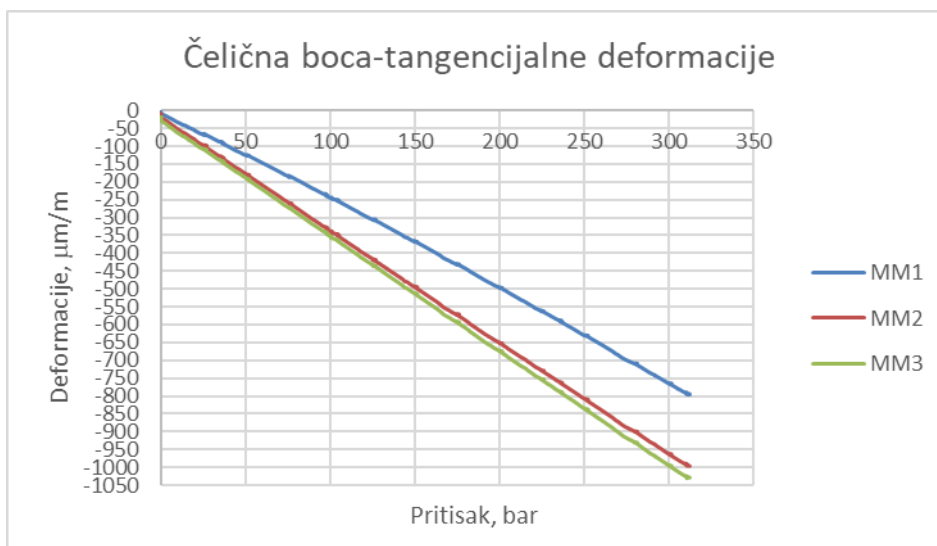


Dijagram 15. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

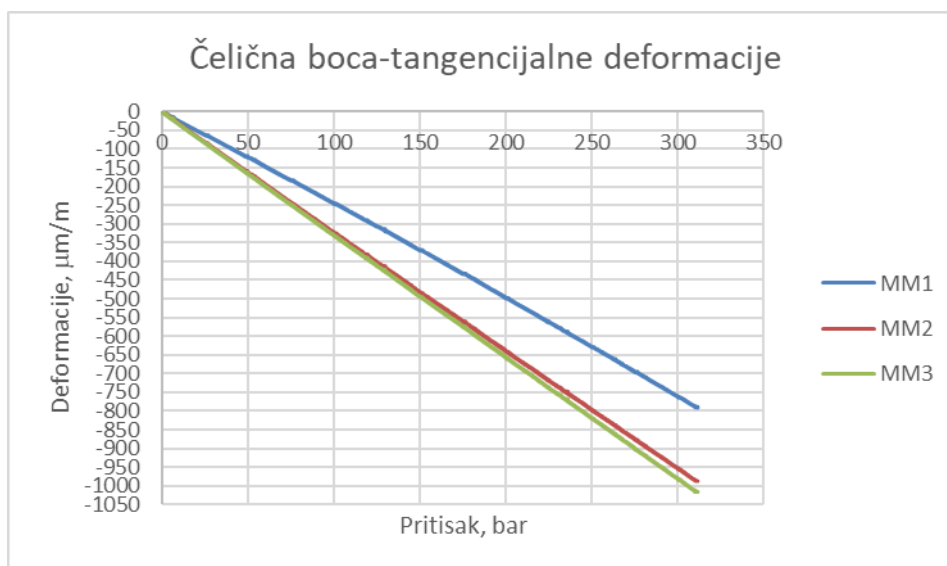


Dijagram 16. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

### 14.1.5 Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar



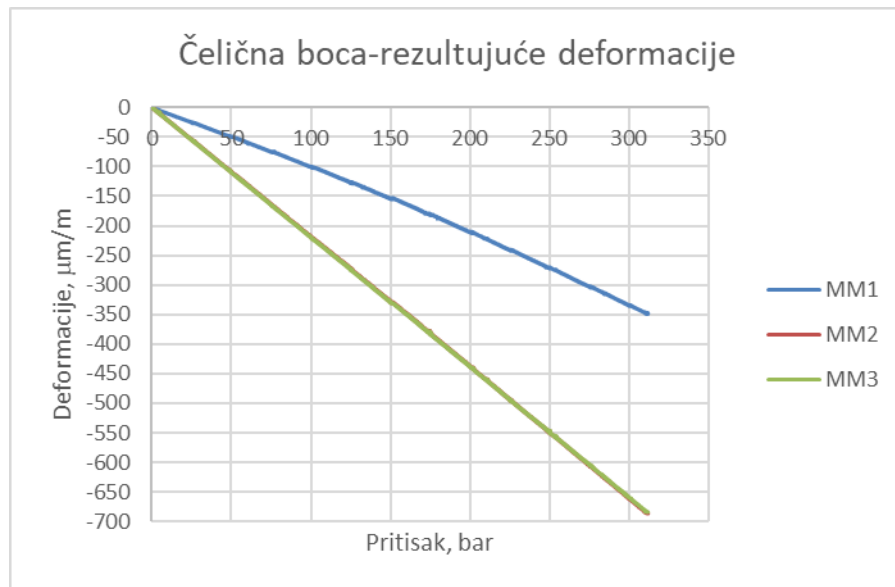
Dijagram 17. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.



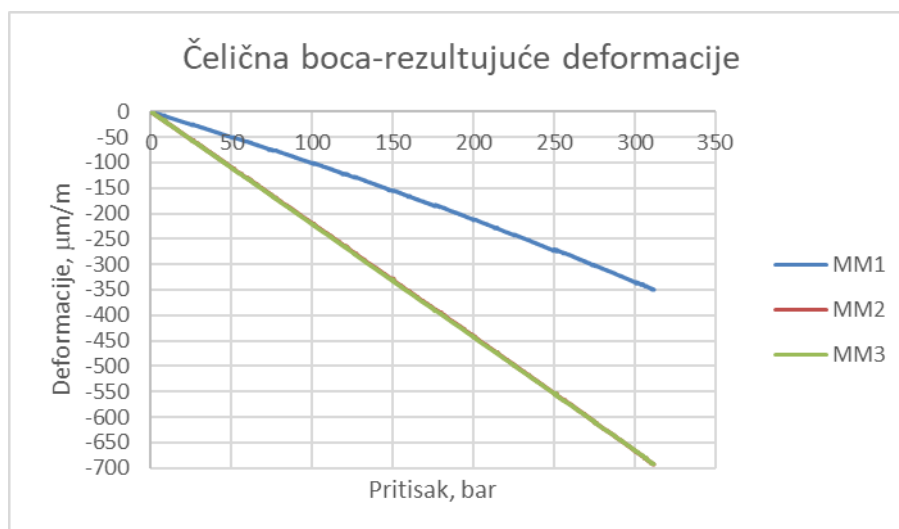
Dijagram 18. Čelična boca – tangencijalne deformacije ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.



### 14.1.6 Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar



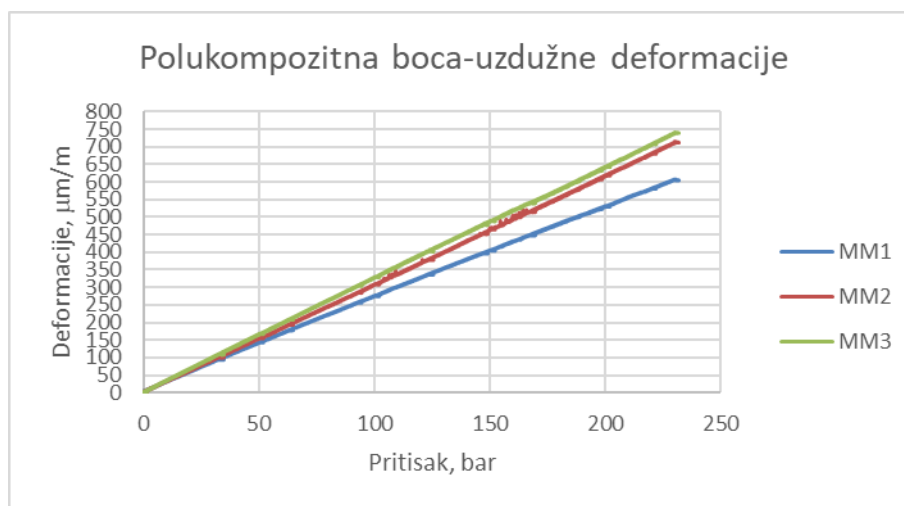
Dijagram 19. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.



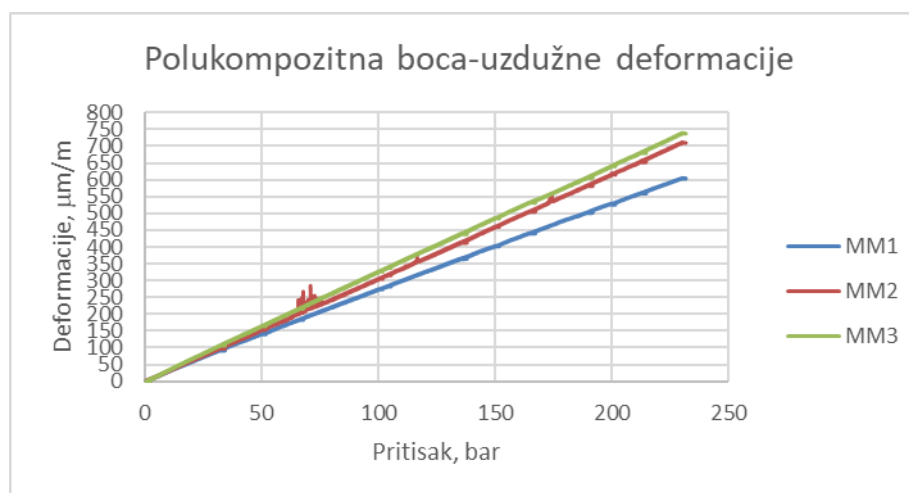
Dijagram 20. Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

## 14.2 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja vodom za polukompozitnu bocu

### 14.2.1 Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar

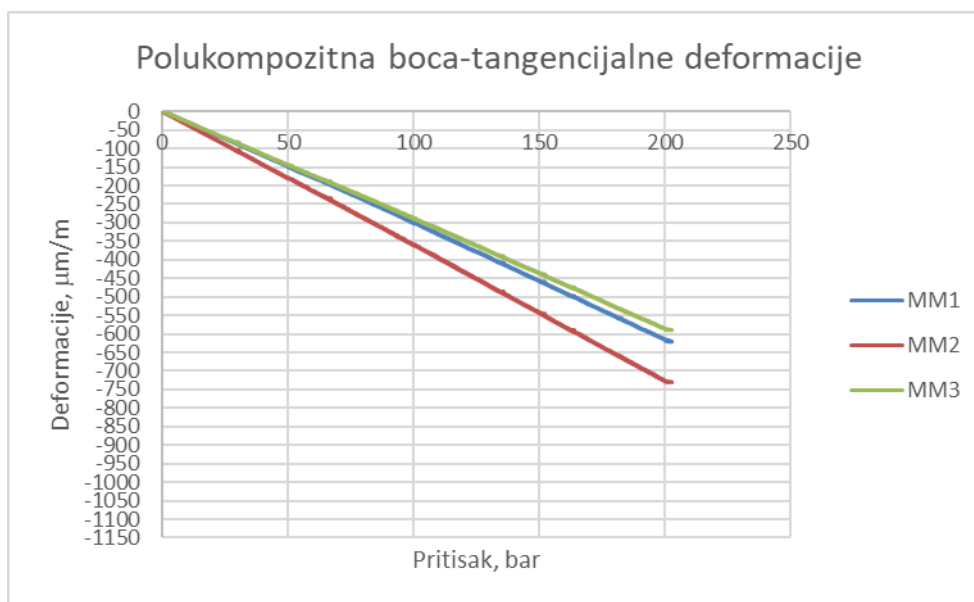


Dijagram 21. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

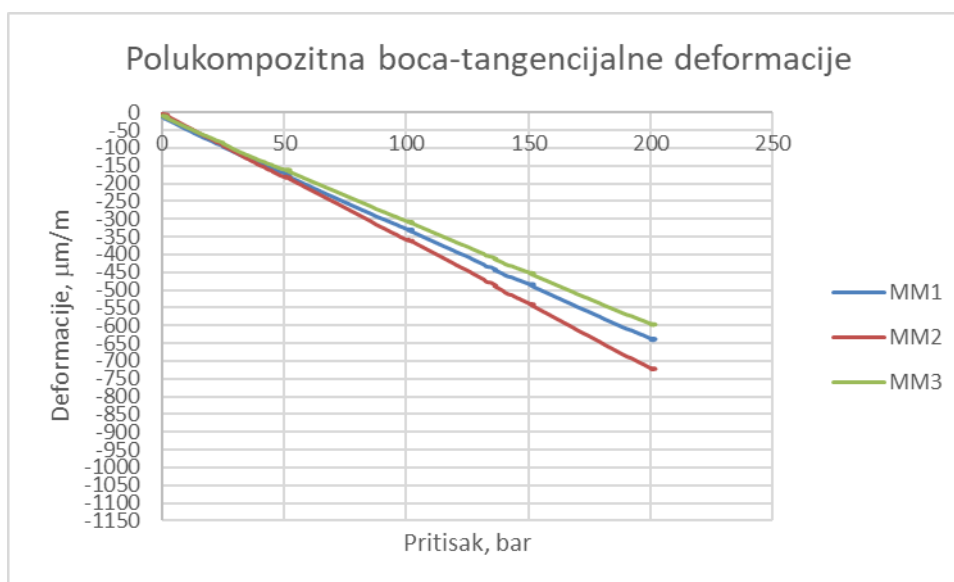


Dijagram 22. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

### 14.2.2 Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar

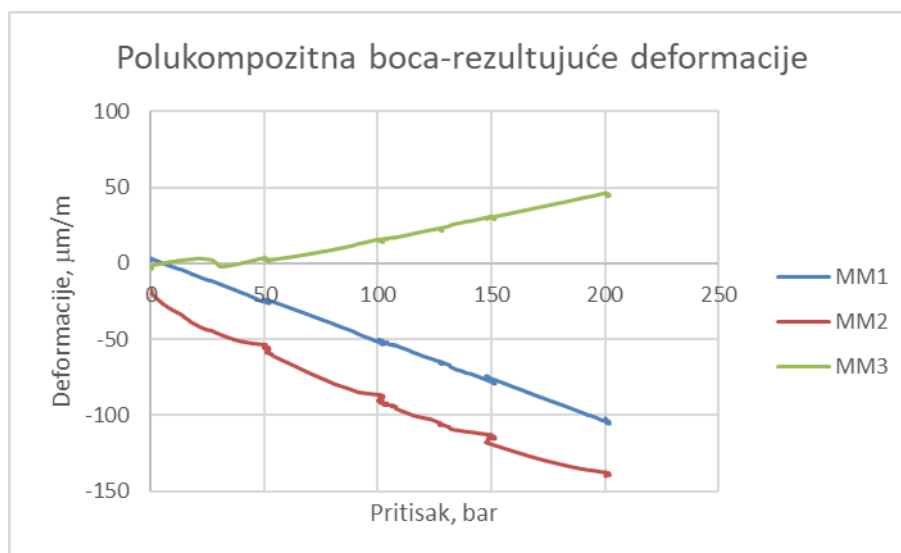


Dijagram 23. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

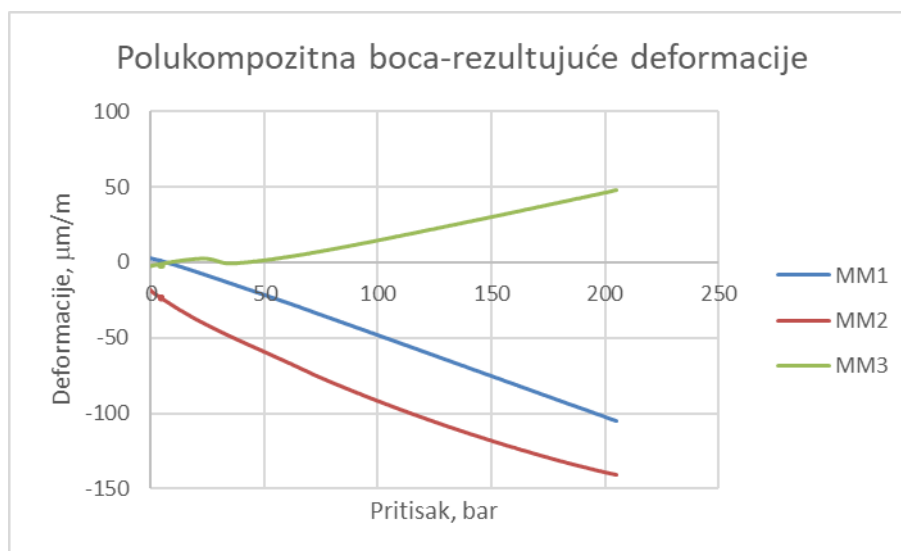


Dijagram 24. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

### 14.2.3 Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 bar

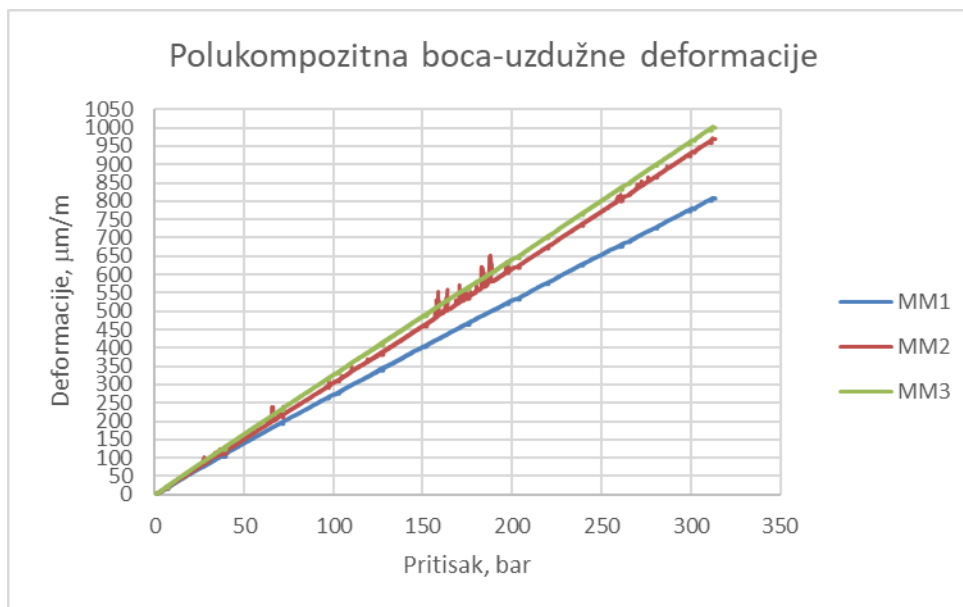


Dijagram 25. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

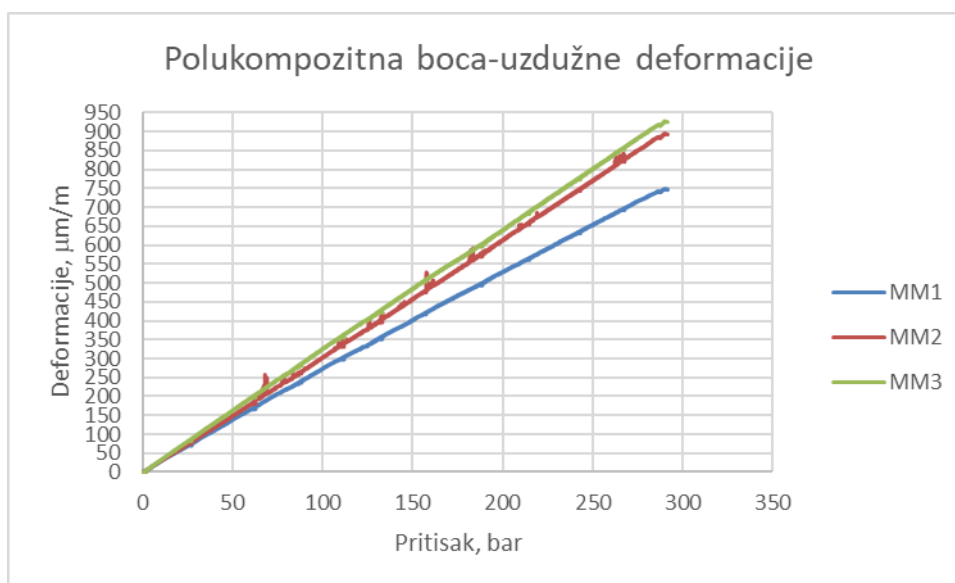


Dijagram 26. Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 200 bar.

#### 14.2.4 Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar

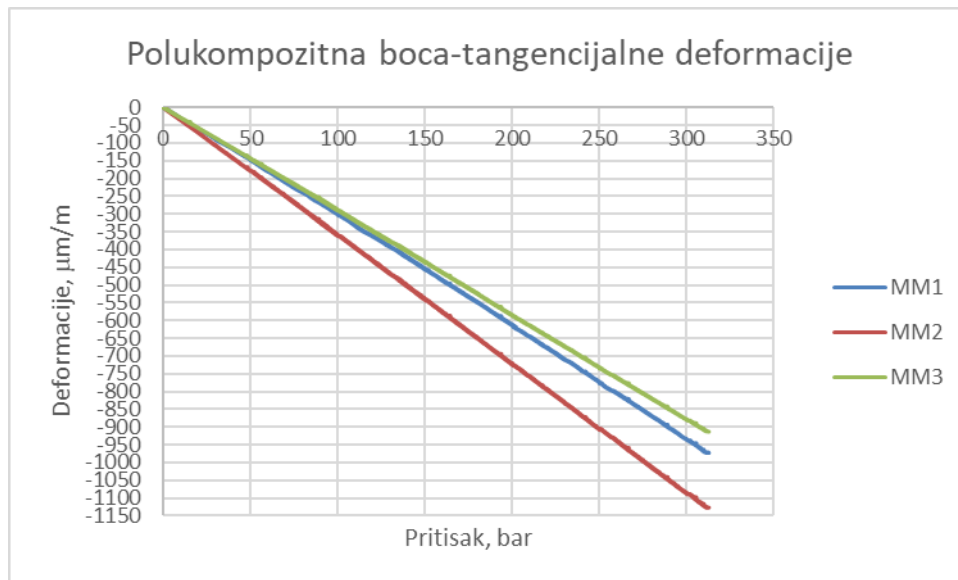


Dijagram 27. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

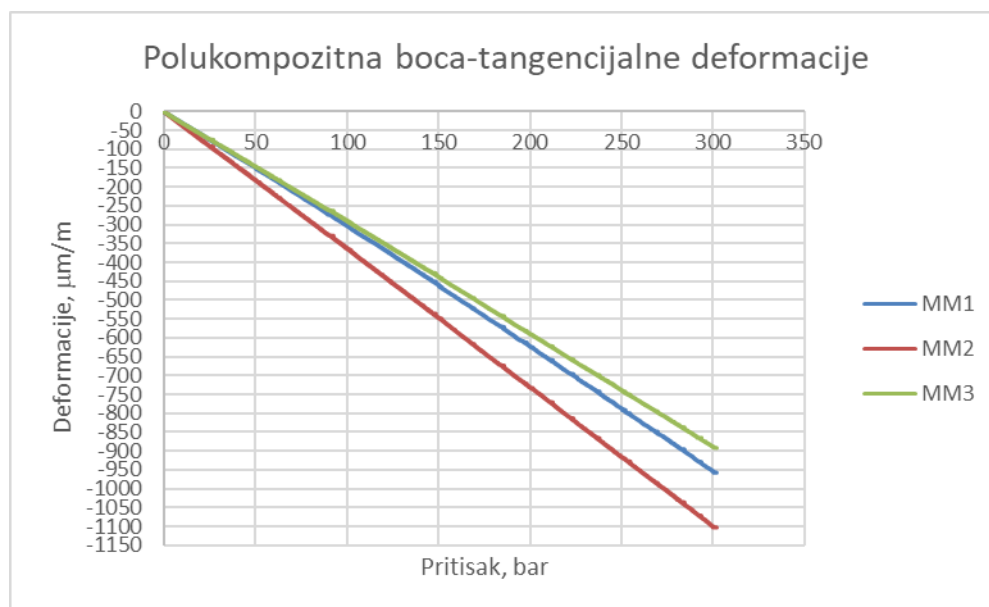


Dijagram 28. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

### 14.2.5 Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar

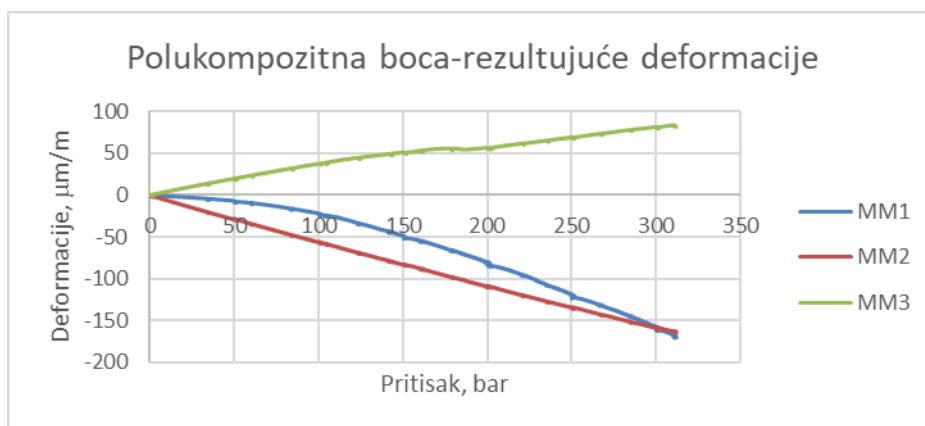


Dijagram 29. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

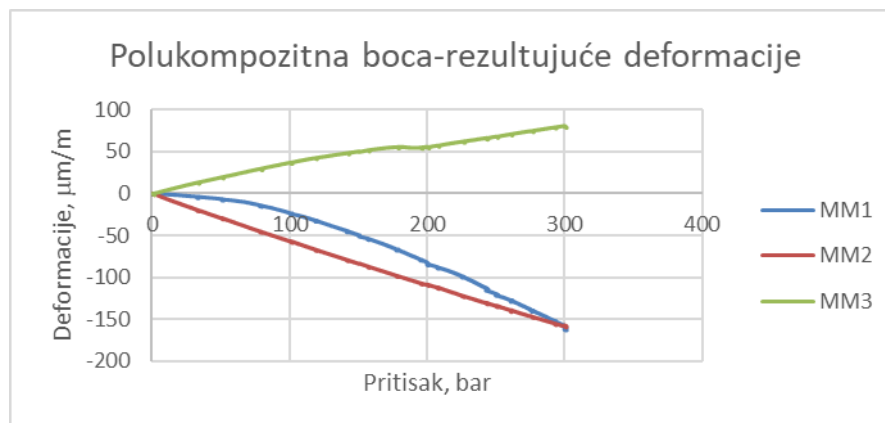


Dijagram 30. Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

### 14.2.6 Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 300 bar



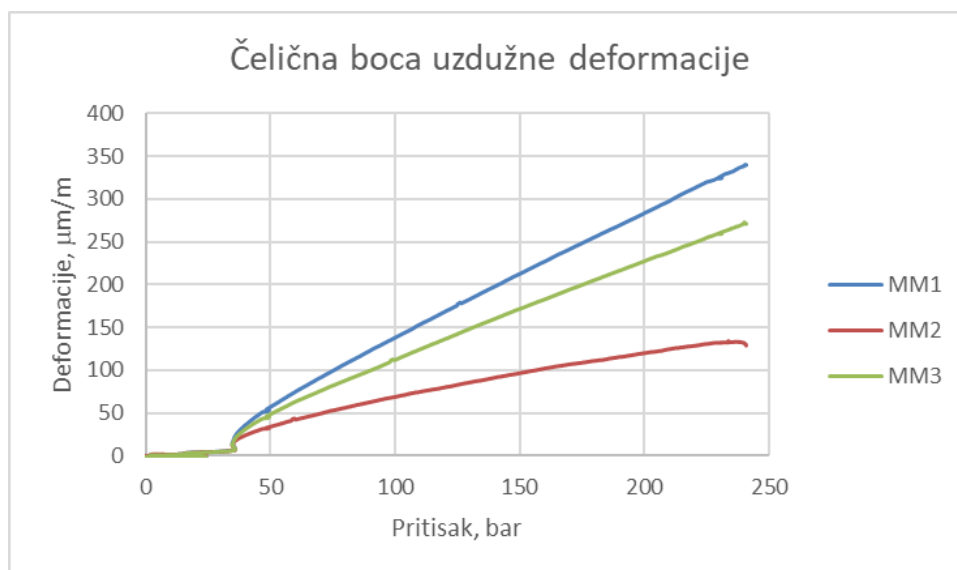
**Dijagram 31.** Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.



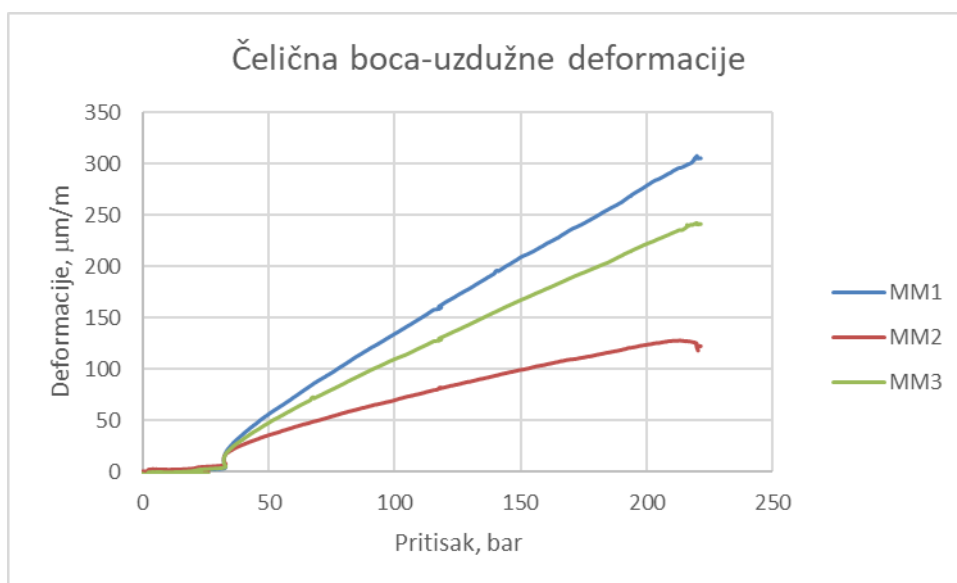
**Dijagram 32.** Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar.

### 14.3 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja na „banki vazduha“ za čeličnu bocu

#### 14.3.1 Čelična boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 240 i 220 bar



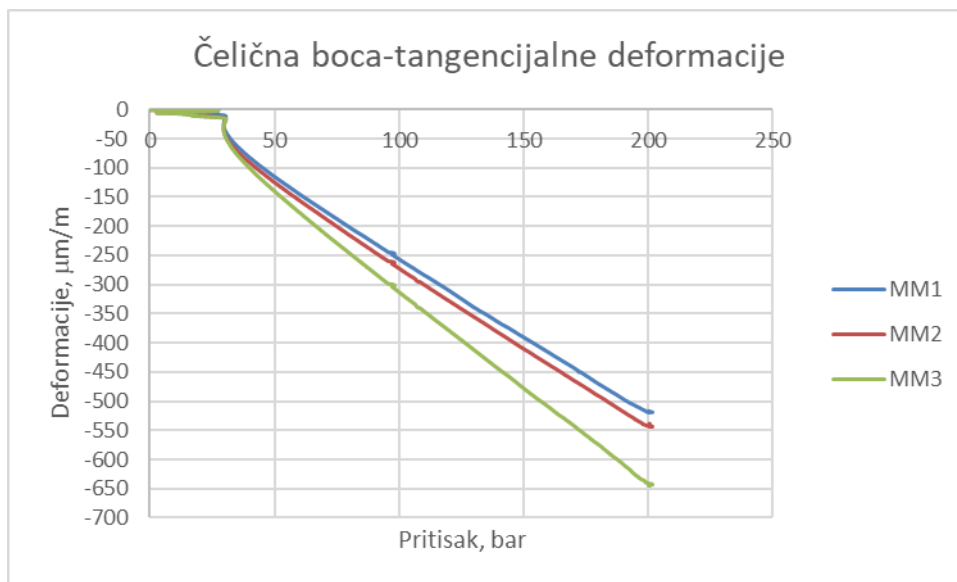
Dijagram 33. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.



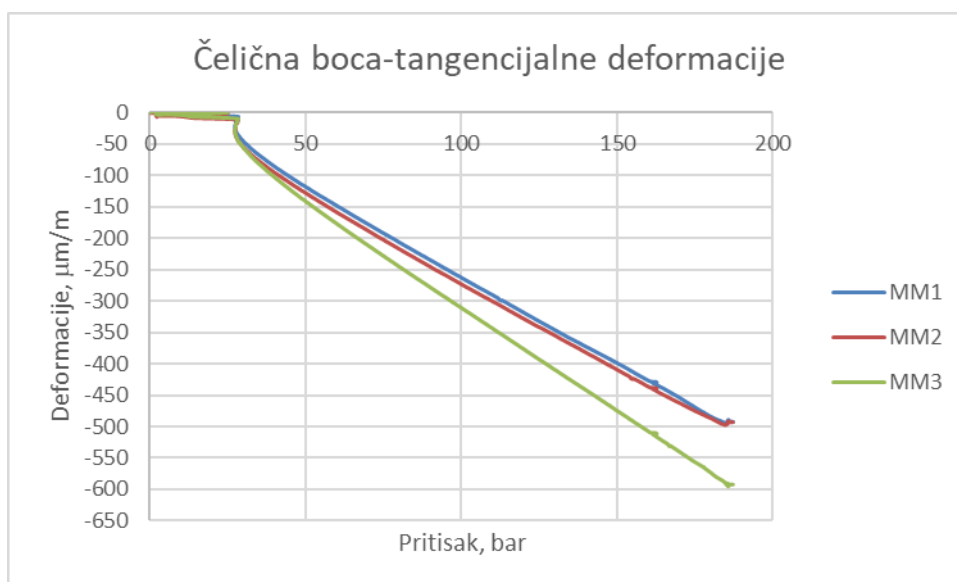
Dijagram 34. Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 220 bar.



### 14.3.2 Čelična boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 200 i 185 bar

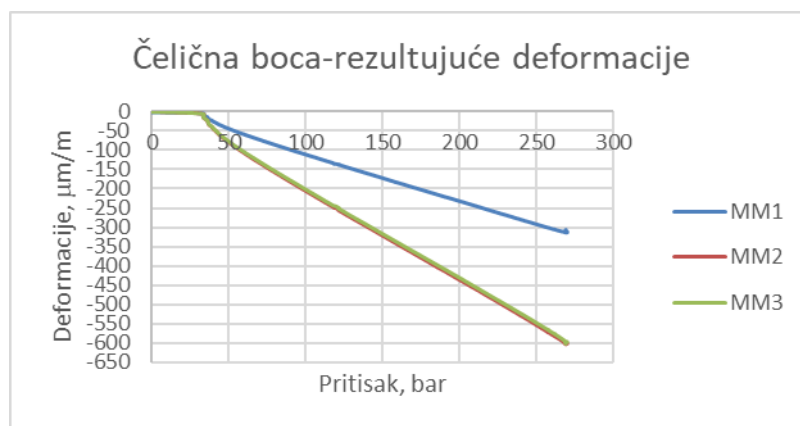


Dijagram 35. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 200 bar.

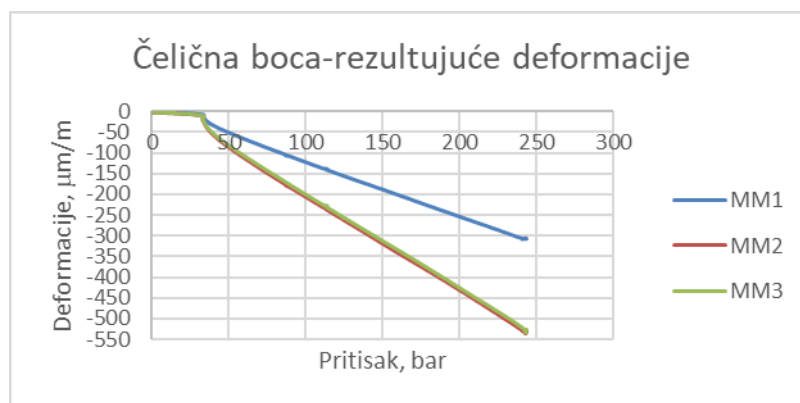


Dijagram 36. Čelična boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 185 bar.

### 14.3.3 Čelična boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 250 i 240 bar



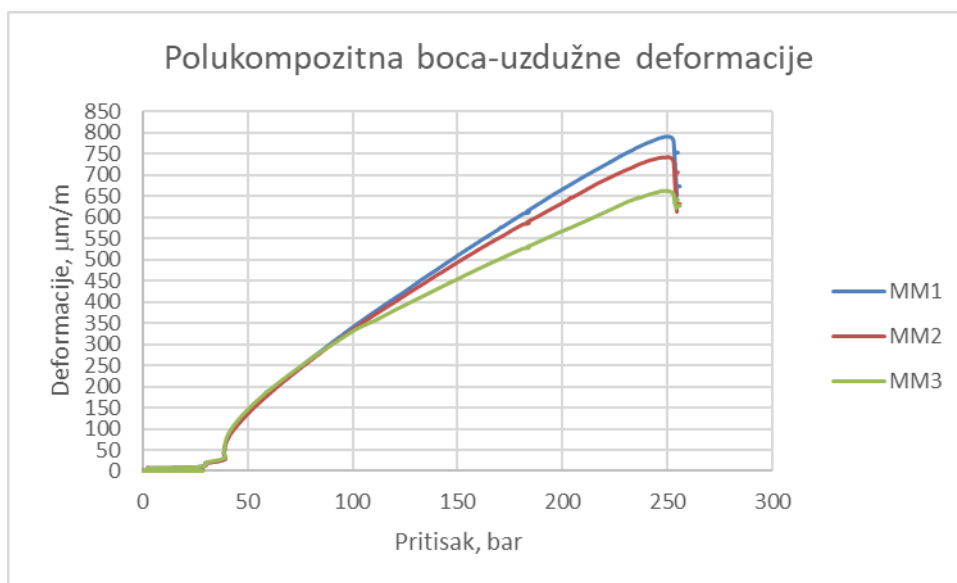
**Dijagram 37.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar.



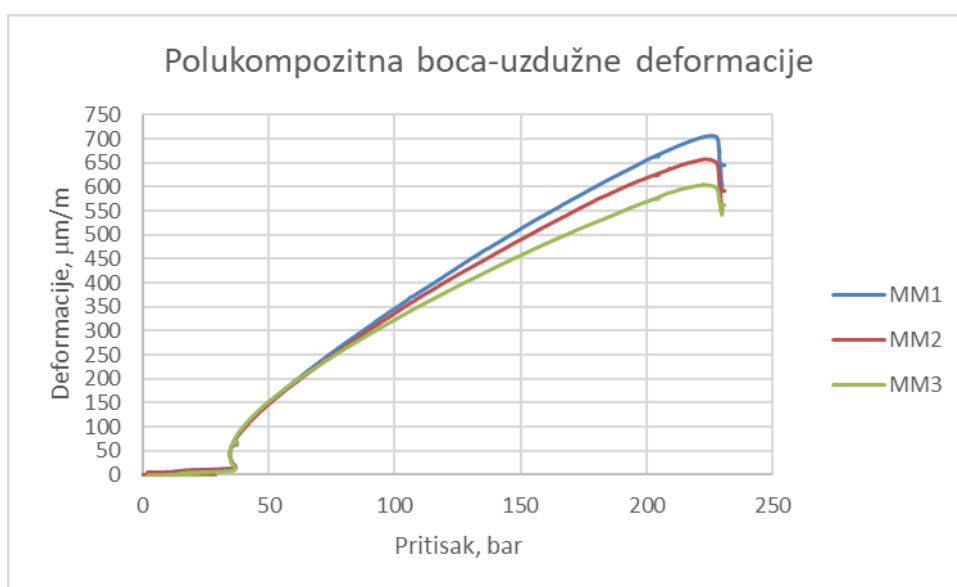
**Dijagram 38.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.

#### 14.4 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja na „banki vazduha“ za polukompozitnu bocu

##### 14.4.1 Polukompozitna boca – uzdužne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 250 i 240 bar

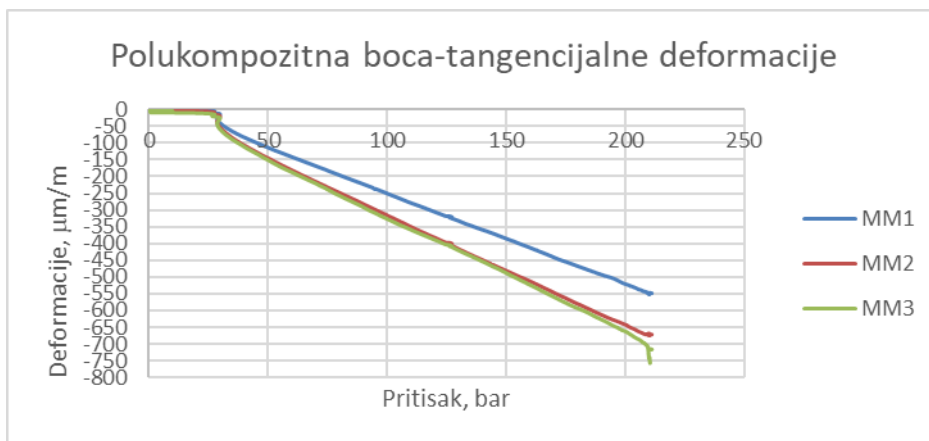


Dijagram 39. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar.

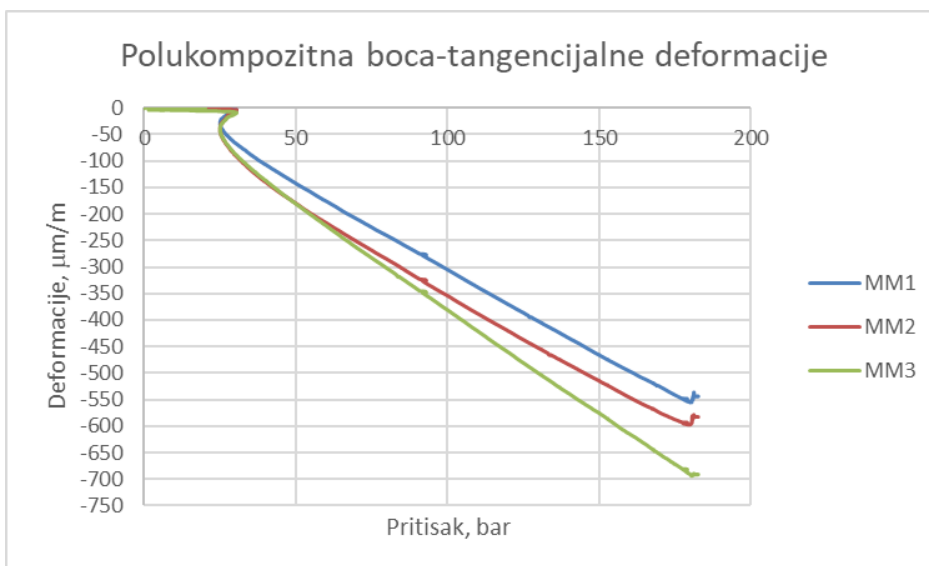


Dijagram 40. Polukompozitna boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar.

#### 14.4.2 Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 210 i 180 bar

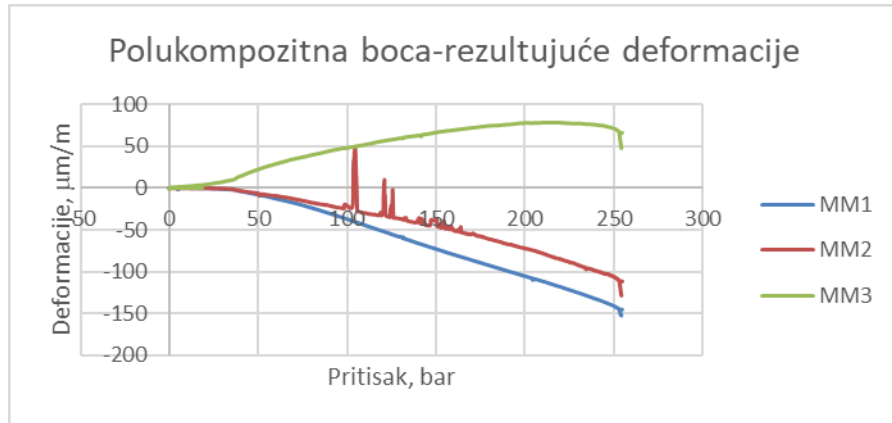


**Dijagram 41.** Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 210 bar.

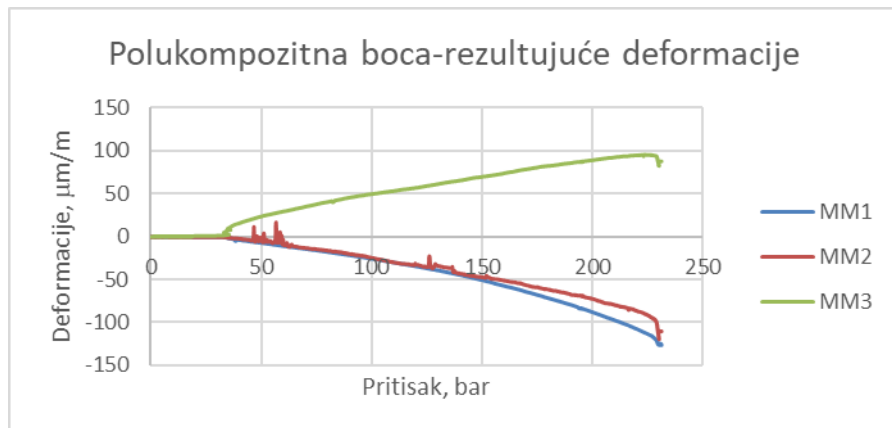


**Dijagram 42.** Polukompozitna boca – tangencijalne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 180 bar.

### 14.4.3 Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije pri unutrašnjem pritisku od 0 bar do 255 i 230 bar



**Dijagram 43.** Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 255 bar.



**Dijagram 44.** Polukompozitna boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 230 bar.

### 14.5 Mjerenje temperature na mjernim mjestima čelične i polukompozitne boce

Tokom vršenja eksperimentalnih ispitivanja na „banki vazduha“, vršena su i mjerenja temperature na mjernim mjestima neposredno prije punjenja, kao i nakon punjenja. U obzir su uzimani i mikroklimatski parametri, poput: vlažnosti i pritiska vazduha i temperature prostorije (kompresorske stanice) u kojoj su vršena eksperimentalna ispitivanja (t. 21 do t. 24).

**Tabela 21.** Temperature na mjernim mjestima prije i poslije punjenja boca KMV.

Podaci o ispitivanju i mikroklimatski parametri; datum: 30.07.2020; vrijeme ispitivanja 19 <sup>00</sup> -20 <sup>30</sup> ; T <sub>ok</sub> = 33° C (na početku ispitivanja); T <sub>pr</sub> = 25° C; T <sub>ok</sub> = 26° C (na kraju ispitivanja); P <sub>v</sub> = 995,8 hPa								
Broj ispitivanja	Vrsta boce	Pritisak u banki vazduha P <sub>bv</sub> (bar) na početku / na kraju ispitivanja	Temperatura boce na mjernim mjestima prije punjenja (° C)			Temperatura boce na mjernim mjestima poslije punjenja (° C)		
			MM 1	MM 2	MM 3	MM 1	MM 2	MM 3
I	čelična	268/254	33	34	33	52	58	57
	polukomp.	254/242	36	36	35	54	58	58
	čelična	242/230	18	19	21	46	47	47
	polukomp.	230/217	17	17	17	38	44	45

**Tabela 22.** Temperature na mjernim mjestima prije i poslije punjenja boca KMV.

Podaci o ispitivanju i mikroklimatski parametri; datum: 26.09.2020; vrijeme ispitivanja 10 <sup>30</sup> -13 <sup>30</sup> ; T <sub>ok</sub> = 15,5° C (na početku ispitivanja); T <sub>pr</sub> = 20° C; T <sub>ok</sub> = 22° C (na kraju ispitivanja); P <sub>v</sub> = 998,2 hPa								
Broj ispitivanja	Vrsta boce	Pritisak u banki vazduha P <sub>bv</sub> (bar) na početku / na kraju ispitivanja	Temperatura boce na mjernim mjestima prije punjenja (° C)			Temperatura boce na mjernim mjestima poslije punjenja (° C)		
			MM 1	MM 2	MM 3	MM 1	MM 2	MM 3
II	čelična	250/233	18	17	17	36	43	41
	polukomp.	233/220	17	18	19	33	34	35
	čelična	220/210	12	11	12	30	36	35
	polukomp.	210/198	5	5	3	25	29	30
	čelična	198/189	3	5	4	31	35	34
	polukomp.	189/180	3	5	6	25	30	32

**Tabela 23.** Temperature na mjernim mjestima prije i poslije punjenja boca KMV.

Podaci o ispitivanju i mikroklimatski parametri; datum: 12.05.2022; vrijeme ispitivanja 15 <sup>45</sup> -17 <sup>20</sup> ; T <sub>ok</sub> = 29° C (na početku ispitivanja); T <sub>pr</sub> = 21° C; T <sub>ok</sub> = 22° C (na kraju ispitivanja); P <sub>v</sub> = 998,7 hPa								
Broj ispitivanja	Vrsta boce	Pritisak u banki vazduha P <sub>bv</sub> (bar) na početku / na kraju ispitivanja	Temperatura boce na mjernim mjestima prije punjenja (° C)			Temperatura boce na mjernim mjestima poslije punjenja (° C)		
			MM 1	MM 2	MM 3	MM 1	MM 2	MM 3
III	čelična	290/268	24	27	27	42	47	50
	polukomp.	268/254	25	25	25	37	44	46
	čelična	254/241	19	19	19	40	45	42
	polukomp.	241/228	17	17	17	37	43	45
	čelična	228/221	26	27	26	43	50	45
	polukomp.	221/207	22	21	21	39	44	45

**Tabela 24.** Temperature na mjernim mjestima prije i poslije punjenja boca KMV.

Podaci o ispitivanju i mikroklimatski parametri; datum: 12.05.2022; vrijeme ispitivanja 15 <sup>45</sup> -17 <sup>20</sup> ; T <sub>ok</sub> = 29° C (na početku ispitivanja); T <sub>pr</sub> = 21° C; T <sub>ok</sub> = 22° C (na kraju ispitivanja); P <sub>v</sub> = 998,7 hPa								
Broj ispitivanja	Vrsta boce	Pritisak u banki vazduha P <sub>bv</sub> (bar) na početku / na kraju ispitivanja	Temperatura boce na mjernim mjestima prije punjenja (° C)			Temperatura boce na mjernim mjestima poslije punjenja (° C)		
			MM 1	MM 2	MM 3	MM 1	MM 2	MM 3
IV	čelična	210/220	22	22	22	43	50	45
	čelična	200/192	20	20	20	38	43	43
	čelična	192/185	18	18	16	35	40	41

### 14.6 Saniranje oštećenja na polukompozitnoj boci

U skladu sa pomoćnom hipotezom odabrana je polukompozitna boca (dimenzija  $\varnothing$  158×515 mm) sa dva mehanička oštećenja nastala kao posljedica korištenja pri akcidentnim situacijama. Mehanička oštećenja polukompozitne boce nalaze se na gornjem torisferičnom dijelu boce (sl. 86). Oba oštećenja spadaju u II kategoriju. Jedno oštećenje je rez, dužine 45 mm, širine 1 mm i dubine 0,6 mm, nastalo prilikom izvlačenja izolacionog aparata iz ležišta u naslonu teretnog motornog vozila pri izlasku iz vozila, dok je drugo oštećenje površine cca 100 mm<sup>2</sup> i dubine 0,4 mm, nastalo kao posljedica udara boce o tvrdu podlogu prilikom korištenja izolacionog aparata na intervenciji. Ostala vidljiva oštećenja na boci su površinska oštećenja boje.

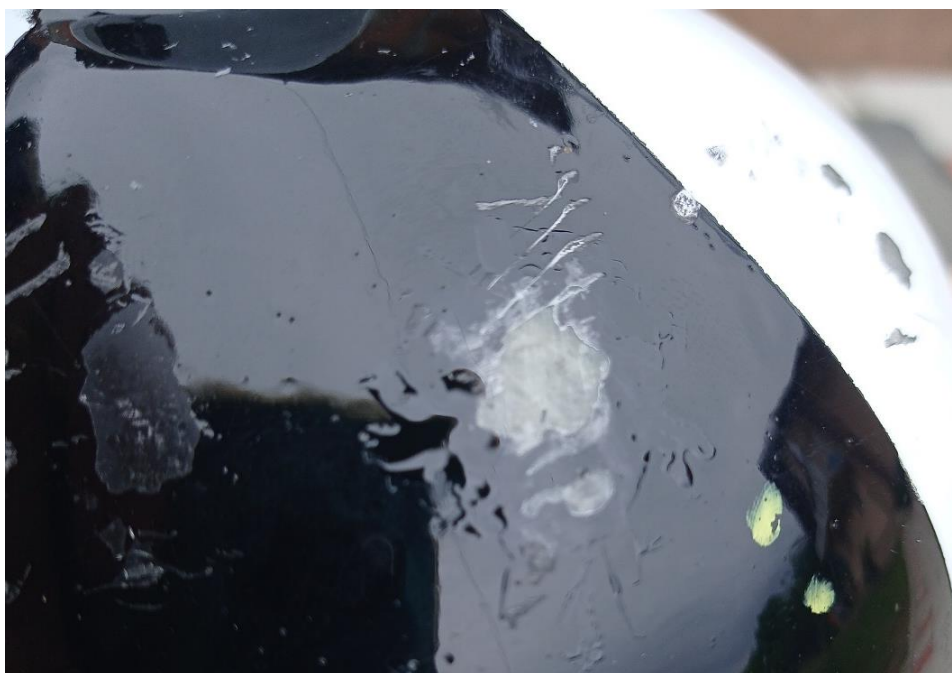


*Slika 86. Oštećenja na polukompozitnoj boci.*

Oštećena mjesta su očišćena sa sredstvom za odmašćivanje koje je došlo uz dvokomponentno ljepilo, a zatim sanirana dvokomponentnim ljepilom – epoksidnom smolom (sl. 87 i 88) proizvođača „Bison“ bez dodavanja staklenih ili karbonskih vlakana.



**Slika 87.** Sanirano oštećenje na polukompozitnoj boci – rez.



**Slika 88.** Sanirano oštećenje na polukompozitnoj boci prouzrokovano udarcem. Ostala vidljiva oštećenja na boci su površinska oštećenja boje.

Na Katedri za inženjerstvo zaštite radne sredine, Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Banjoj Luci, nekoliko dana nakon sanacije oštećenja, izvršeno je ispitivanje polukompozitne boce vodom. Za ovo ispitivanje korištena je slijedeća oprema: davač i transmiter pritiska HBM 1-P3IC/3000 bar (sl. 61), hidraulična manuelna pumpa visokog pritiska CPP 700-H sa ventilom za rasterećenje od pritiska (sl. 83) i softver Catman Easy.



Pomoću navedene opreme, polukompozitna boca opterećena je unutrašnjim ispitnim pritiskom od 450 bar u trajanju od 5 minuta. Tokom opterećenja praćene su vrijednosti pritiska koji je bio konstantan, a na boci tokom i nakon opterećenja nisu uočene deformacije u zoni saniranih mjesta.

## 15. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽVANJA

### 15.1 Analiza izolacionih aparata zatvorenog i otvorenog sistema

Princip rada regeneracionih izolacionih aparata sa komprimovanim kiseonikom, bazira se na rekuperaciji i obogaćivanju izdahnutog vazduha kiseonikom u unutrašnjosti aparata. Kao i kod svakog drugog proizvoda, tako i kod izolacionih aparata, samom pojavom na tržištu i u praksi javljao se veći broj proizvođača, koji su međusobno stvarali konkurenciju, ali i davali nova tehničko-tehnološka rješenja.

Ranije provedenim istraživanjima dokazano je da korisnik izolacionih aparata zatvorenog sistema ni u kom slučaju ne udiše 100 %-tni kiseonik, već smjesu približnu sastavu vazduha sa povećanim procentom kiseonika, [4].

Takođe je dokazana škodljivost kiseonika po korisnika koja se manifestuje u vidu blagog tremora mišića, opijenosti, koja može dovesti do gubitka svijesti, samo u slučajevima, ukoliko bi se isti udisao u 99,5 %-noj koncentraciji u vremenskom intervalu dužem od 6 (šest) časova.

Ronilački aparati zatvorenog sistema na komprimovani kiseonik, ne smiju se upotrebljavati na dubinama većim od 6 m zbog parcijalnog pritiska kiseonika, [4].

Uvođenjem regeneracionih izolacionih aparata na komprimovani kiseonik u upotrebu, uočilo se i štetno djelovanje alkohola, ne samo na umanjenje mentalne i fizičke sposobnosti korisnika, nego i zbog oštećenja alkalij umetka, što se odražavalo na bezbjednost korisnika.

Elektronskim monitoringom u regeneracionim izolacionim aparatima novije generacije na komprimovani medicinski kiseonik, ali i u aparatima zatvorenog sistema sa kiseonikom dobijenim putem hemijske reakcije, precizno se doziraju potrebne količine kiseonika u smjesi vazduha u unutrašnjosti izolacionih aparata, čime se produžava vremenski interval upotrebe.

Izolacioni aparati otvorenog sistema – izolacioni aparati na komprimovani vazduh su zastupljeniji u upotrebi u odnosu na regeneracione izolacione aparate zatvorenog sistema na komprimovani kiseonik iz više razloga: jeftiniji su, održavanje im je jednostavnije, uređaji za pretakanje kiseonika su zahtjevniji, zahtijevaju veći stepen bezbjednosti (uglavnom su membranske pumpe/kompresori bez podmazivanja, jer ulja i pojedine supstance u prisustvu kiseonika burno reaguju). Izolacioni aparati na komprimovani kiseonik zahtijevaju posjedovanje veće količine kiseonika; tzv. „banke kiseonika”. Iz navedenog se vidi da je daleko lakše komprimovati vazduh iz okoline, kako bi se filtriranjem dobio medicinski komprimovani

vazduh, ili posjedovati i „banke medicinskog vazduha”, čije je pretakanje i korištenje daleko bezbjednije u odnosu na kiseonik.

Elektronski sistemi za monitoring na izolacionim aparatima na komprimovani medicinski vazduh pružaju sigurnost korisniku tokom intervenisanja, a isto tako daju neprocjenjive podatke rukovodiocu akcije o lokaciji, stanju okoline (koncentracija opasnih i eksplozivnih gasova), kao i stanju pritiska u bocama korisnika izolacionog aparata.

Proizvođači Interspiro i MSA, u proizvodnji svojih najnovijih modela izolacionih aparata, primijenili su iskustva kroz korištenje u praksi, tako da su poboljšali ergonomiju nosača izolacionog aparata (podešavanje četiri veličine) ili primijenili jednocijevni sistem (crijevo srednjeg u crijevu viskog pritiska) kao i upotrebu brzih kopči u sistemu i za punjenje boca, [53, 54, 59].

Redovnim edukacijama, korisnici se upoznaju sa osnovnim dijelovima, izmjenama na novijim modelima, principu rada, kao da i najmanja nemarnost i nedostatak u obuci, održavanju i kalibraciji aparata ugrožava njegov vlastiti život.

Lica koja su zadužena za rad u kompresorskim stanicama na punjenju boca izolacionih aparata („banke vazduha“ i kompresori za medicinski vazduh visokog pritiska) moraju biti edukovana za vršenje tih poslova. Kompresori visokog pritiska i sva ostala oprema pod pritiskom mora se pregledati prije upotrebe (periodični pregled), i u zakonom propisanom roku kod nadležne institucije (redovan pregled).

Za raziku od boca za SCBA aparate koje se čuvaju u horizontalnom položaju, boce SCUBA aparata, čuvaju se u vertikalnom položaju, jer na dnu boca imaju gumene navlake oblikovane tako da osiguravaju njihovu stabilnost.

Redovnim održavanjem kompresora visokog pritiska, kao i zamjenama filtera u propisanim rokovima prema preporuci proizvođača, ostvaruje se zadovoljavajući kvalitet komprimovanog medicinskog vazduha. Naročito se redovnom zamjenom filtera izbjegava razvoj patogenih i uslovno patogenih mikroorganizama koji ozbiljno mogu ugroziti zdravlje korisnika izolacionog aparata. Mikroorganizmi ne mogu se razmnožavati u vazduhu i u njegovoj sredini, relativno brzo propadaju, dok njihov opstanak zavisi od vlastitih osobina, ali i od temperature i vlažnosti vazduha. [3, 21, 23].

Najveći naponi na numeričkom modelu za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 30 MPa, jednak je za sva tri mjerna mjesta. Nešto manje vrijednosti napona, javljaju se na prelazu sa cilindričnog na torisferni dio, dok se najmanje vrijednosti napona uočavaju na torisfernom dijelu čelične boce.

U okviru numeričkih proračuna za opterećenje unutrašnjim pritiskom od 30 MPa, vršena je linearno statistička analiza, te se uvidom u dijagrame 2, 3, 4 i 5 može uočiti linearna promjena napona sa promjenom opterećenja.

## 15.2 Diskusija numeričkih rezultata

Metodom konačnih elemenata izračunate su vrijednosti Mizesovih deformacija na posudi cilindričnog oblika – čeličnoj boci izolacionog aparata dimenzija  $\varnothing 140 \times 530$  mm, debljine stijenke 5 mm, zapremine 6 l, izrađenoj za izlaganje radnom pritisku 300 bar i ispitnom pritisku 450 bar. Materijal od kojeg je izrađena boca je čelik za poboljšanje 30CrNiMo8.

Upoređivanjem vrijednosti Mizesovih deformacija dobijenih numeričkim simulacijama, vršeno je poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima. Ovim analizama je dokazano da se materijal od kojeg je izrađena boca u toku opterećenja unutrašnjim pritiskom 30 MPa nalazi u području elastičnosti i da su u posmatranim zonama naponi radnih opterećenja ispod dozvoljenog napona.

Mehaničke karakteristike materijala od kojeg je izrađena čelična boca potrebne su za izradu nelinearnog proračuna, a na osnovu uzoraka materijala od kojeg je izrađena predmetna boca, izvršeno je ispitivanje na zatezanje, kojim su dobijene mehaničke karakteristike posude, kao i dijagram napon – deformacija za čelik 30CrNiMo8 (prilog 1).

### 15.2.1 Faktori koncentracije napona

Izvor najveće koncentracije napona na posudi opterećenoj unutrašnjim pritiskom pri elastičnim deformacijama predstavljaju mjesta sa najvećim diskontinuitetom geometrije posude i ova mjesta se definišu kao faktori koncentracije napona ( $\alpha_k$ ) sa odnosom maksimalnog napona na odabranom mjestu ( $\sigma_{\max}$ ) i vrijednosti nominalnog napona na mjestu pravilne geometrije ( $\sigma_n$ ).

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (21)$$

Vrijednost nominalnog napona uzima se na mjestu udaljenom od izvora koncentracije napona. Na pozicijama geometrijskih diskontinuiteta, odnosno na mjestima najvećih napona određuju se faktori napona.

### 15.3 Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja

Monitoringom prilikom punjenja boca uočena je ravnomjerna kolorizacija (ravnomjerno raspoređivanje toplote) kod polukompozitnih boca, odnosno neravnomjerna kolorizacija kod čeličnih boca (neravnomjerno raspoređivanje toplote), da bi se pred sam kraj punjenja čeličnih boca uočilo izjednačavanje toplote na tijelu boce. Iz navedenog se može zaključiti da raspoređivanje toplote na bocama zavisi od materijala od kojeg su izrađene.

Prilikom kompresije vazduha iz okoline u boce SCBA i SCUBA aparata, nisu zabilježena veća temperaturna odstupanja, osim prilikom ekspanzije komprimovanog medicinskog vazduha u okolinu, tabela 18.

Komprimovanjem vazduha iz okoline pomoću kompresora visokog pritiska dolazi do zagrijavanja njegovih komponenti, čime se neznatno vrši prenos toplote preko vazduha iz kompresora visokog pritiska na komprimovani vazduh u bocama. Ove temperaturne promjene dovode do manjih termičkih dilatacija na bocama SCBA i SCUBA aparata.

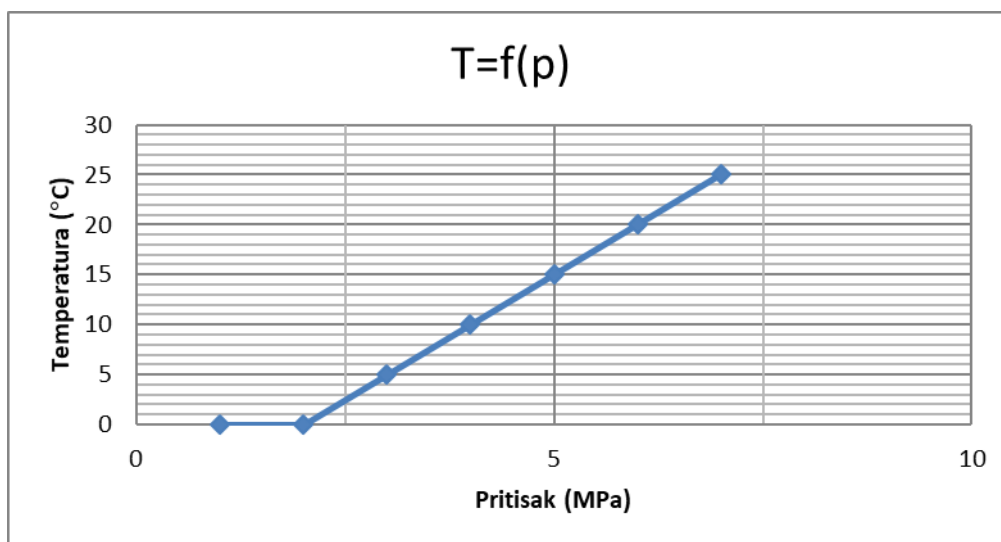
Najveća izmjerena temperatura na kompresoru visokog pritiska, Bauer K14, zabilježena je na prvom stepenu kompresora i iznosila je oko 117<sup>0</sup> C, dok je prilikom punjenja „banke“ vazduha zabilježena najveća temperatura od 131°C (sl. 70).



**Slika 70.** Termovizijska slika – temperatura na kompresoru prilikom punjenja.

Identifikovanim vrijednostima temperature, može se konstatovati da je njen porast neznatan i nema velikog uticaja na toplotne dilatacije materijala pri klasičnom komprimovanju vazduha u boce.

Porast temperature boca tokom punjenja raste s povećanjem pritiska u istima (dijagram 8), ili drukčije rečeno, promjena temperaure u bocama tokom punjenja je u funkciji pritiska.



**Dijagram 8.** Grafički prikaz promjena temperature u funkciji promjene pritiska u boci

Kod ekspanzije vazduha iz boca veoma je bitan gradijent pada pritiska u bocama koji može prouzrokovati mehanička oštećenja ventila boce i nedozvoljena naponska stanja u stijenci boce.

Temperatura boca pri određenom pritisku na sredini i u gornjem dijelu boca tokom punjenja „banke vazduha“ varirala je za 1-2 °C.

Punjenjem boca izolacionih aparata tokom intervenisanja iz „banke vazduha“, prouzrokovane su povrede korisnika sa smrtnim ishodomima, te je potrebno vršiti edukaciju korisnika.

Tokom punjenja čelične boce na „banki vazduha“ i na kompresoru visokog pritiska, uočena je neravnomjerna kolorizacija pomoću termovizijske kamere i zagrijavanje iste prouzrokovane toplotom kao direktnoj posljedici ekspanzije komprimovanog medicinskog vazduha.

Laboratorijskim spitivanjem materijala od kojeg je izrađena čelična boca, konstatovano je da je izrađena od NiCrMoMn legiranog čelika, dok je njegova službena oznaka prema DIN/EN 30CrNiMo8, tzv. „CNM“ legirani čelik, kako ga proizvođač službeno označava, [73].

Povećanjem koncentracije nikla u ovoj leguri, smanjuje se kritična brzina hlađenja i poboljšava jednolikost presjeka, a ne utiče na pad žilavosti. Kombinacija hroma i nikla ne utiče na smanjenje kritične brzine hlađenja. Molibden u ovoj leguri sprečava krtost popuštanja, kojima su skloni NiCr čelici, [30, 79].

## **15.4 Diskusija eksperimentalnih rezultata**

Na posudi cilindričnog oblika – čeličnoj boci izolacionog aparata dimenzija  $\varnothing 140 \times 530$  mm, debljine stijenke 5 mm, zapremine 6 l, izrađenoj za izlaganje radnom pritisku 300 bar i ispitnom pritisku 450 bar izvršena su eksperimentalna istraživanja.

Rezultati dobijeni eksperimentalnim putem, obrađivani su matematičkim metodama za svako mjerno mjesto, kojim su obuhvaćene vrijednosti Mizesovih deformacija.

Metoda mjernih traka, poslužila je u eksperimentalnom dijelu ove disertacije za mjerenje lokalnih deformacija pomoću kojih se može matematičkom relacijom izračunati ekvivalentni napon, kako bi se potvrdile vrijednosti Mizesovih napona dobijenih numeričkom metodom, a iste zadovoljavaju odstupanja u procentu od rezultata dobijenih numeričkim proračunom, čime se dokazuje da je numerički model dobro postavljen.

### **15.4.1 Analiza rezultata za ispitivanja vodom čelične i polukompozitne boce**

Analizirajući rezultate deformacija na čeličnoj i polukompozitnoj boci za pritiske 200 i 300 bar, može se konstatovati da rastu linearno. Obrada dobijenih podataka sprovedena je matematičkim metodama za svako mjerno mjesto.

Najveće vrijednosti deformacija prilikom eksperimentalnih istraživanja uzdužnih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 9 i 10 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 15 i 16 za pritisak 300 bar) detektovane su na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), dok deformacije na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), imaju veće vrijednosti od deformacija na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce).

Prilikom detekcija tangencijalnih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 11 i 12 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 17 i 18 za pritisak 300 bar), najveće vrijednosti deformacija,

detektovane su na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), zatim na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce), dok su deformacije na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), značajno manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta. Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Analizirajući rezultate rezultujućih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 13 i 14 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 19 i 20 za pritisak 300 bar), uočavaju se najveće vrijednosti deformacija na mjernim mjestima (MM 3 – gornji dio boce) i (MM 2 – sredina boce), dok su vrijednosti deformacija na (MM 1 – donji dio boce), značajno manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta. Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Najveće vrijednosti deformacija prilikom detekcije uzdužnih deformacija na polukompozitnoj boci (dijagrami 21 i 22 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 27 i 28 za pritisak 300 bar) detektovane su na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), dok deformacije na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce) imaju veće vrijednosti od deformacija na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce). Takođe su uočene oscilacije intenziteta deformacija na (MM 2 – sredina boce).

Prilikom detekcije tangencijalnih deformacija na polukompozitnoj boci (dijagrami 23 i 24 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 29 i 30 za pritisak 300 bar), najveće vrijednosti deformacija, detektovane su na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce), zatim na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), dok su deformacije na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), nešto manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta. Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Analizirajući rezultate rezultujućih deformacija (dijagrami 25 i 26 za pritisak 200 bar) i (dijagrami 31 i 32 za pritisak 300 bar), uočavaju se najveće vrijednosti deformacija na mjernim mjestima (MM 2 – sredina boce) i (MM 1 – donji dio boce) i one su negativne, dok su deformacije na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), pozitivne i nešto manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta.

Sve deformacije prilikom testiranja obe vrste boca (čelična i polukompozitna) nalaze se u području elastičnosti.



#### **15.4.2 Analiza rezultata za ispitivanja na „banki vazduha“**

##### **čelične i polukompozitne boce**

Obzirom da se eksperimentalni dio ispitivanja, odnosno na „banki vazduha“ vrši u realnim uslovima, dolazi do pada pritiska u „bankama vazduha“ poslije svakog punjenja boca. Obrada dobijenih podataka sprovedena je metodama statističke analize za svako mjerno mjesto. Naime, iako se „banka vazduha“ u Vatrogasnoj brigadi Banja Luka sastoji od tri boce zapremine 50 l, napunjene komprimovanim medicinskim vazduhom pod pritiskom od 300 bar, u bocama izolacionih aparata koje se pune direktno na njoj, najveći pritisak nakon punjenja iznosi od 290 do 295 bar, zavisno od zapremine boce. Svakim narednim punjenjem, pritisak u napunjenoj boci, biće manji za 10 do 15 bar u odnosu na prethodno napunjenu bocu (t. 21, 22, 23 i 24).

Analizirajući intenzitet deformacija na čeličnoj i polukompozitnoj boci u rasponu pritiska od 185 do 250 bar, može se konstatovati da iste rastu linearno, kao i kod ispitivanja vodom pod pritiskom.

Najveće vrijednosti deformacija prilikom ispitivanja uzdužnih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 33 i 34, za pritiske 240 i 220 bar) detektovane su na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), dok deformacije na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), imaju veće vrijednosti od deformacija na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce).

Prilikom detekcije tangencijalnih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 35 i 36, za pritiske 200 i 185 bar), najveće vrijednosti deformacija, detektovane su na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), zatim na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce), dok su deformacije na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), nešto manje u odnosu na deformacije na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce). Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Analizirajući rezultate rezultujućih deformacija na čeličnoj boci (dijagrami 37 i 38, za pritiske 250 i 240 bar), uočavaju se najveće vrijednosti deformacija na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce) i mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), dok su vrijednosti deformacija na (MM 1 – donji dio boce) značajno manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta. Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Najveće vrijednosti deformacija prilikom istraživanja uzdužnih deformacija na polukompozitnoj boci (dijagrami 39 i 40, za pritiske 250 i 240 bar) detektovane su na mjernom

mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), dok deformacije na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce) imaju veće vrijednosti od deformacija na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce).

Prilikom istraživanja tangencijalnih deformacija na polukompozitnoj boci (dijagrami 41 i 42, za pritiske 210 i 180 bar), najveće vrijednosti deformacija, detektovane su na mjernom mjestu 3 (MM 3 – gornji dio boce), zatim na mjernom mjestu 2 (MM 2 – sredina boce), dok su deformacije na mjernom mjestu 1 (MM 1 – donji dio boce), nešto manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta. Vrijednosti deformacija na sva tri mjerna mjesta imaju negativan predznak.

Analizirajući rezultate rezultujućih deformacija (dijagrami 43 i 44, za pritiske 255 i 230 bar), uočavaju se najveće vrijednosti deformacija na mjernim mjestima (MM 1 – donji dio boce) i (MM 2 – sredina boce) i one su negativne, dok su deformacije na (MM 3 – gornji dio boce), pozitivne i nešto manje u odnosu na deformacije na prethodna dva mjerna mjesta.

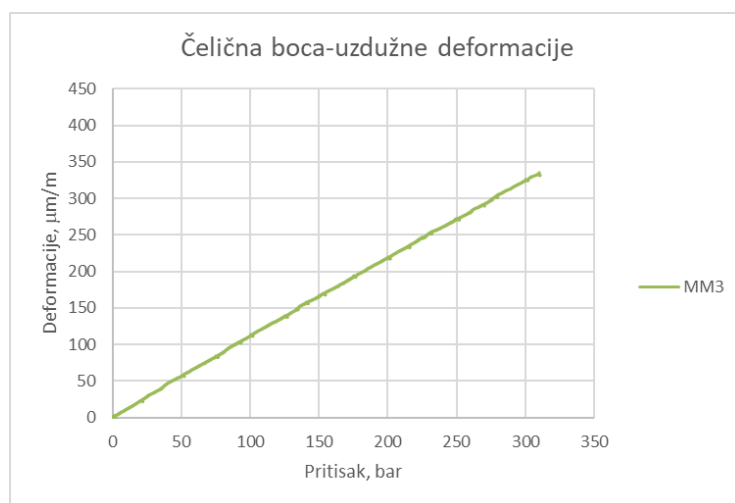
Uvidom u tabelarne preglede (t. 21, 22, 23 i 24) prilikom izvođenja eksperimentalnih istraživanja na „banki vazduha“, prilikom naglih ekspanzija komprimovanog medicinskog vazduha, uočava se povećanje temperature na sva tri mjerna mjesta na čeličnoj i polukompozitnoj boci. Temperature boca (čelične i polukompozitne) na mjernim mjestima prije i nakon naglih ekspanzija komprimovanog medicinskog vazduha variraju u temperaturnom intervalu od 18° C do 28° C u zavisnosti od mjernog mjesta. Prva mjerenja temperature u tabelama (t. 21, 22, 23 i 24) bilo da se radi o mjerenjima temperature prije ili poslije punjenja boca imaju nešto veće vrijednosti, dok izmjerene temperature nakon pražnjenja boca – ispuštanjem komprimovanog medicinskog vazduha u okolinu imaju nešto niže vrijednosti, zbog hlađenja ventila i boca prilikom ekspanzije. Analizirajući temperature na mjernim mjestima obe boce nakon ispuštanja i ponovnog punjenja komprimovanim medicinskim vazduhom, može se konstatovati da se ti temperaturni intervali kreću u rasponu od 18° C do 28° C (t. 21, 22, 23 i 24).

Upoređivanjem rezultata deformacija (ispitivanje vodom pod pritiskom i na „banki vazduha“) na čeličnoj boci za pritiske 200 i 300 bar, može se konstatovati da su intenziteti deformacija prilikom ispitivanja vodom pod pritiskom veće u odnosu na intenzitete deformacija za ispitivanje na „banki vazduha“, osim za slučajeve:

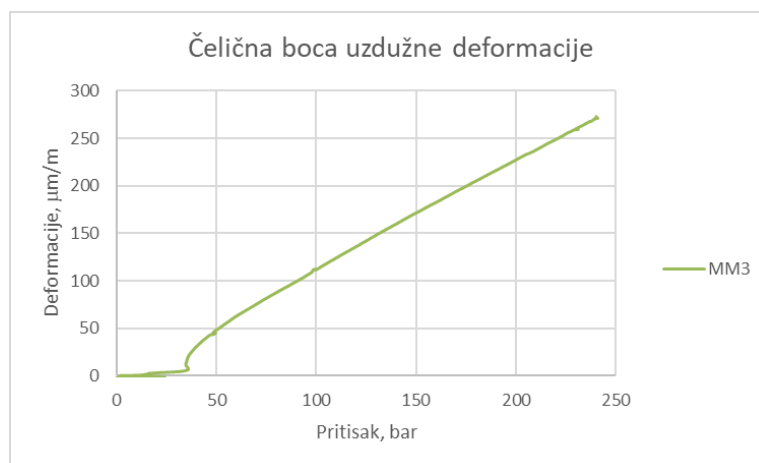
- Uzdužne deformacije na mjernom mjestu 3, za vrijednosti pritiska: 100, 150 i 200 bar, (dijagrami 45 i 46),

- Rezultujuće deformacije na mjernom mjestu 1, za vrijednosti pritiska: 100, 150, 200 i 250 bar, (dijagrami 47 i 48),
- Rezultujuće deformacije, na mjernom mjestu 2, samo za pritisak od 250 bar, (dijagrami 49 i 50).

Intenziteti deformacija na „banki vazduha“ za navedene slučajeve, veći je za 1 do 8 % u odnosu na intenzitete deformacija ispitivanja vodom pod pritiskom.

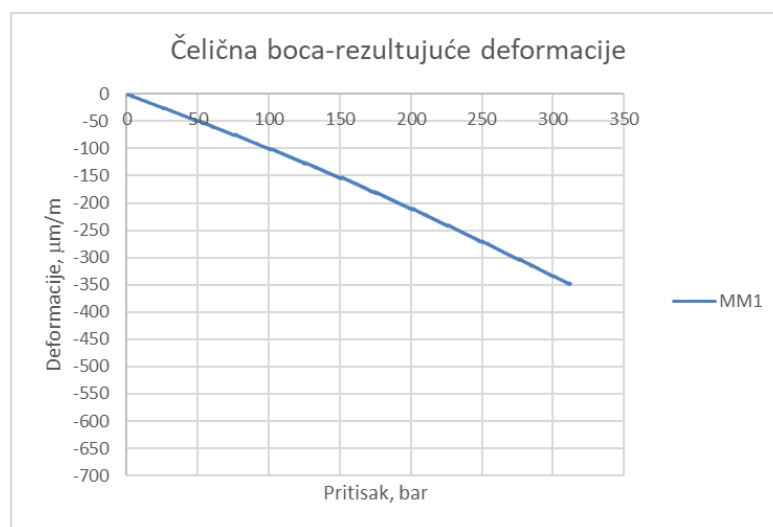


**Dijagram 45.** Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM3.  
Intenzitet deformacija na: 50 bar=56,83909; 100 bar=111,6643; 150 bar=165,834; 200 bar=219,2824.

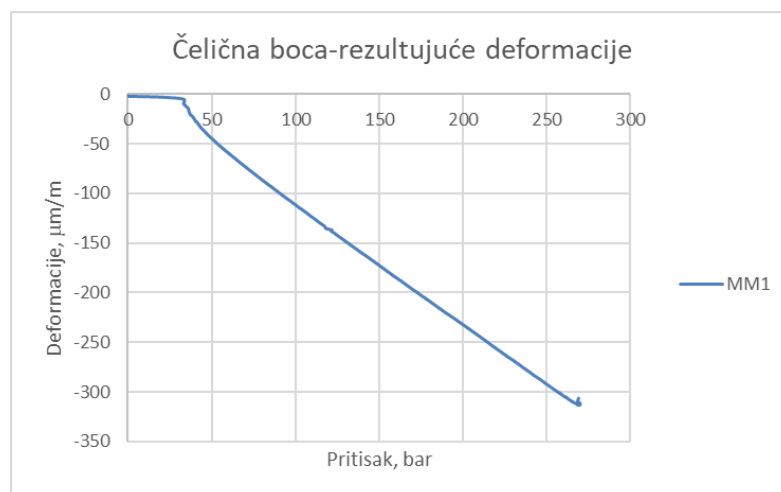


**Dijagram 46.** Čelična boca – uzdužne deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 240 bar za MM3.

Intenzitet deformacija na: 50 bar=48,64855; 100 bar=112,124; 150 bar=171,5912; 200 bar=227,12.



**Dijagram 47.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM1.  
Intenzitet deformacija na: 50 bar= -49,7651; 100 bar= -100,485; 150 bar= -154,049; 200 bar= -210,842;  
250 bar= -271,155.

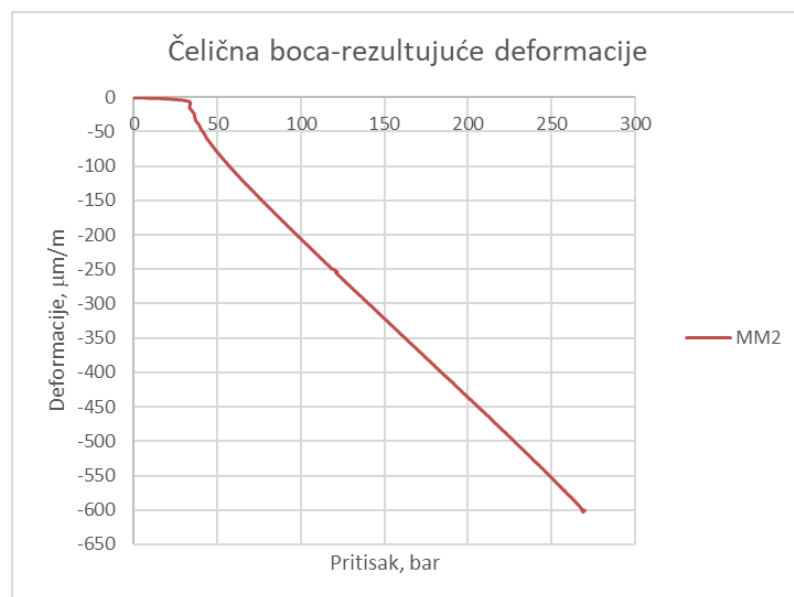


**Dijagram 48.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar za MM1.

Intenzitet deformacija na: 50 bar= -44,7154; 100 bar= -111,524; 150 bar= -172,576; 200 bar= -232,327;  
250 bar= -292,226.



**Dijagram 49.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje vodom od 0 bar do 300 bar za MM2.  
Intenzitet deformacija na: 50 bar= -109,197; 100 bar= -218,391; 150 bar= -327,902; 200 bar= -437,517;  
250 bar= -548,547.



**Dijagram 50.** Čelična boca – rezultujuće deformacije, ispitivanje na „banki vazduha“ od 0 bar do 250 bar za MM2.

Intenzitet deformacija na: 50 bar= -80,256; 100 bar= -206,139; 150 bar= -321,879; 200 bar= -436,39;  
250 bar= -553,399.

Shodno navedenom, termičke dilatacije prouzrokovane ekspanzijama komprimovanog medicinskog vazduha iz „banki vazduha“ nisu prouzrokovale trajne mehaničke deformacije na bocama/cilindrima izolacionih aparata SCBA (čeličnoj i polukompozitnoj) pri kontrolisnom gradijentu protoka vazduha, jer se nalaze u području elastičnosti, čime je dokazana glavna hipoteza.

Sanirana oštećenja na polukompozitnoj boci (do 12 procenata od debljine stijenke) nastala mehaničkim uticajima, nakon saniranja epoksidnim smolama bez dodavanja staklenih ili karbonskih vlakana, zadovoljila su ispitivanje vodom, nakon njihovog izlaganja pritisku koji je za 50 procenata veći od nazivnog pritiska vazduha u boci, čime je potvrđena pomoćna hipoteza.

#### **15.4.3 Diskusija osnovnih naučnih ciljeva disertacije**

Analiza noponsko-deformacionog stanja omotača posuda (čelične i polukompozitne boce) izloženih unutrašnjem pritisku vodom i komprimovanom medicinskom vazduhu na „banki vazduha“ je podloga eksperimentalnih rezultata detektovanih lokalno (u jednoj tački), u uzdužnoj i tangencijalnoj ravni na vanjskom plaštu boce.

Na osnovu numeričkih vrijednosti napona-deformacija nakon ispitivanja materijala od kojeg je izrađena čelična boca (30CrNiMo8) za slučaj opterećenja unutrašnjim pritiskom, urađena je nelinearna numerička analiza, a dobijenim rezultatima potvrđeno je da su vrijednosti ekvivalentnih napona ispod granice elastičnosti materijala od kojeg se rade čelične boce, odnosno da je do vrijednosti pritiska od 30 MPa, materijal čelične posude u zoni elastičnosti.

#### **15.4.4 Pravci daljih istraživanja**

Imajući u vidu da su ove vrste posuda pod pritiskom, koje su bile predmeti eksperimentalnih istraživanja izložene raziličitim vrstama opterećenja tokom upotrebe (opterećenje unutrašnjim pritiskom, raznim mehaničkim uticajima, kao i dejstvu toplote) u narednim istraživanjima, potrebno je izvršiti istraživanje istih pod dejstvom unutrašnjeg pritiska uz njihovu izloženost vanjskim dinamičkim i statičkim opterećenjima.

Takođe, potrebno je veća istraživanja vršiti na kompozitnim bocama zbog njihove sve

veće primjene. Kompozitne boce novijeg datuma izrade kod kojih je osnova izrađena od termoplastike, dok su ostali slojevi izrađeni kao i na polukompozitnoj boci, naizmjeničnim namotavanjem karbonskih i staklenih vlakana oko osnove uz njihovo međusobno uvezivanje epoksidnim smolama.

Dalja istraživanja mogu se raditi na povećanju gradijenta protoka komprimovanog medicinskog vazduha pri punjenju boca na „banki vazduha“, odnosno na smanjenju vremena punjenja boca, što predstavlja podlogu za razmatranje pouzdanosti primjene tzv. smanjenja vremena punjenja boca izolacionih aparata, komprimovanim medicinskim vazduhom u akcidentnim situacijama sa povećanjem nivoa bezbjednosti po korisnika izolacionih aparata.

Prilikom mikrobioloških ispitivanja komprimovanog medicinskog vazduha, iz boca izolacionih aparata i na kompresorima visokog pritiska izolovani su ubikvitarni<sup>72</sup> uslovno patogeni<sup>73</sup> mikroorganizmi, kao i plijesni, koji povećavanjem koncentracije iznad dozvoljene granice, mogu kod korisnika izazvati razna oboljenja. Pomenuti mikroorganizmi su izolovani na univerzalnoj podlozi od agara<sup>74</sup>, tako da bi se naredna istraživanja mogla bazirati zasijavanjem na drugim vrstama podloga (krvna, žučni bujon, čokoladna i sl.), kako bi se ispitala i mogućnost izolovanja patogenih mikroorganizama iz komprimovanog medicinskog vazduha sa najmanje dvije boce po vrsti (čelična, polukompozitna i kompozitna) u cilju upoređivanja rezultata.

Takođe bi se mogla vršiti i fizičko-hemijska ispitivanja komprimovanog medicinskog vazduha iz boca izolacionih aparata, kao i na kompresorima visokog pritiska, sa najmanje dvije boce po vrsti, kako bi se mogli upoređivati rezultati kvalitete komprimovanog medicinskog vazduha.

Pravci budućih istraživanja će se usmjeriti na ispitivanje nivoa pritiska koji dovodi do razaranja crijeva (izolacionih aparata) visokog i srednjeg pritiska, kao posljedice zastarjelosti materijala ili otkaza sigurnosnog ventila na regulatoru pritiska.

---

<sup>72</sup> **Ubikvitarni** – nalaze se svuda.

<sup>73</sup> **Uslovno patogeni** – bezopasni do određenog broja, iznad kojeg mogu kod ljudi i životinja prouzrokovati razna oboljenja.

<sup>74</sup> **Agar** – polisaharid sastavljan od velikog broja molekula galaktoze (vrsta šećera koji se nalazi u mliječnim proizvodima i šećernoj repi). Prvobitno se dobijao iz malajske alge po kojoj je i dobio ime. Koristi se kao dodatak hranljivim podlogama biljne ili bakterijske kulture, za izradu kapsula od lijekova, u prehrambenoj industriji i dr.

## 16. ZAKLJUČAK

Konvencionalna metoda za mjerenje deformacija i napona na realnim konstrukcijama, upotrebom mjernih traka za mjerenje lokalnih napona je dosta pouzdana metoda u praksi, a nedostatak iste je što se detektuju vrijednosti samo u jednoj tački.

Disertacijom su obuhvaćene analize deformacija čelične i polukompozitne posude izolacionih aparata izloženih unutrašnjem pritisku od 30 MPa vodenom probom i na „banki vazduha“ na tri mjerna mjesta za svaku bocu. Takođe su prikazani radni parametri, instalacije, opterećenja, sanacije oštećenja na polukompozitnoj boci, kao i postupci mjerenja.

Metodama statističke analize vršena je obrada rezultata u cilju razmatranja veličina i utvrđivanja relevantnih funkcionalnih zavisnosti.

Na dijagramima koji prikazuju zavisnost deformacija od promjene unutrašnjeg pritiska vodom i komprimovanog medicinskog vazduha za uzdužne, tangencijalne ili rezultujuće deformacije uočava se razlika u porastu deformacija na početku porasta pritiska. Naime, kod deformacija povećanjem pritiska vodom u čeličnoj i polukompozitnoj boci uočava se linearan porast deformacija za sva tri mjerna mjesta od samog početka zbog nestišljivosti ispitnog fluida (voda). Imajući u vidu gasovito stanje komprimovanog medicinskog vazduha, porast deformacija za ispitivanje vodom pod pritiskom čelične ili polukompozitne boce je tako reći konstantan za sva tri mjerna mjesta do cca 30 bar, nakon čega linearno rastu različito za svako mjerno mjesto.

Deformacije prilikom istraživanja za obe vrste boca (čelična i polukompozitna) bilo da se radi o eksperimentalnom istraživanju vodom ili komprimovanim medicinskim vazduhom, imaju poznatu zavisnost.

Vršenjem više uzastopnih mjerenja na dijagramima „banki vazduha“, kontrolisanim gradijentom protoka komprimovanog medicinskog vazduha, vrijeme punjenje čelične i polukompozitne boce, iznosio je od 45 do 70 sekundi.

Sprovedenim teoretskim, numeričkim i eksperimentalnim istraživanjima moguće je izvesti slijedeće zaključke:

- Moguća su dalja usložavanja problema i simulacije na osnovu izrađenog numeričkog modela posude pod pritiskom,



- Minimalne deformacije i naponi javljaju se na torisferičnim dijelovima boce (gornji i donji dio boce),
- Upoređivanje rezultata neumeričkih proračuna i eksperimentalnih istraživanja je na zadovoljavajućem nivou.

Ostvareni naučni doprinos ove doktorske disertacije, ogleda se u:

- Analiziranim rezultatima numeričkih i eksperimentalnih istraživanja koji se mogu svrstati u oblast multidisciplinarnih istraživanja praćenjem savremenih trendova u međunarodnim standardima u svrhu poboljšanja performansi kvaliteta i bezbjednosti u radnoj sredini,
- Prilikom brzog punjenja boca na „banki vazduha“, temperatura boca se povećava za cca 20° C i nema uticaja na promjenu naponsko-deformacionog stanja u materijalima od kojih se rade ove boce,
- Pri brzom punjenju polukompozitnih boca na „banki vazduha“ u odnosu na klasično punjenje (na kompresoru visokog pritiska), promjena gradijenta porasta napona do 10 % brzo raste, nakon čega je porast deformacija ravnomjeran,
- Mehanička opterećenja polukompozitne boce koja se nalazi u granicama (dimenzija Ø 158×515 mm), poslije reparacije nema uticaj na pogoršanje bezbjednosti korisnika,
- Dokaz da brzina punjenja boca u razmatranom vremenskom periodu nema značajan uticaj na promjenu porasta naponskog stanja u stijenama boce,
- Razlog manjeg intenziteta deformacija između dna i cilindra boce je zbog ojačane strukture materijala prilikom izrade boce i zbog geometrijskog oblika na mjernom mjestu,
- Pri propisanim procedurama korištenja i održavanja ovih akumulatora (boca), bezbjednost korisnika je na zadovoljavajućem nivou.

## 17. LITERATURA

### Knjige i naučno-stručni izvori:

- [1] A. Đerić; J. Nikolić; N. Mitrović; M. Balać; A. Petrović; *Comparative Display of Calculation and Result analysis for Pressure Vessels According to Serbian and European Standards – cylindrical Shells*; Structural Integrity and Life, Vol. 12; 10<sup>th</sup> International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture; Kyoto, Japan; 2013.
- [2] A. Majstorović; *Safety parts of body to respiration with breathing apparatus in dangerous zone*. 10<sup>th</sup> Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2011.
- [3] A. Majstorović; *Microbiological Analysis of Compressed Medical Air*. 11<sup>th</sup> International Conference of Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2013.
- [4] A. Majstorović; *The Safety Using of Breathing Apparatus in Accident's Situations*; Lambert Academish Publishing; Saarbrücken; Germany; 2014.
- [5] A. Majstorović; *Thermal Imagers and their Appliance in the Fire Units*. 12<sup>th</sup> International Conference of Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2015.
- [6] A. Majstorović; M. Todić; *The Heat Distribution at Compression Filling of Bottles and Expansion of medical Air*; 13<sup>th</sup> International Conference of Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2017.
- [7] A. Majstorović; M. Todić; *Distribution of Tnsion in Bottles ob Breathing Apparatus During Normal and Fast Expansion of Compressed Medical Air*; 14<sup>th</sup> International Conference of Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2019.

- [8] B. Kraut; *Strojarski priručnik*; Tehnička knjiga; Zagreb; 1981.
- [9] D. Ćorić; Ž. Alar; *Odabrana svojstva iz mehaničkih svojstava materijala-predavanja*; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2016.
- [10] DAN Europe. *Oxygen First Aid for Scuba Diving Injuries 2005*. Divers Alert Network.
- [11] D. Stojanović; *Zaštita od požara i eksplozija*. Naučnoistraživačka radna organizacija; Institut zaštite od požara i eksplozije; Sarajevo; 1988.
- [12] I. Dujmović; *Sustavi za zaštitu od požara u tunelima*; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2012.
- [13] K. Popović; D. Vasiljević-Krušedolac; *Evaluation of Health Condition of Fireman's*. 8<sup>th</sup> Yugoslav and 5<sup>th</sup> International Conference on Fire and Explosion Protection. Institut za tehnologiju zaštite Novi Sad; Viša tehnička škola, Novi Sad; 2002.
- [14] M. Balać; „*Međusobni uticaj priključaka na stanje napona i deformacija na cilindričnom omotaču posude pod pritiskom*“, doktorska disertacija; Univerzitet u Beogradu; 2014.
- [15] M. Bogner; O. Popović; *Kompresorska postrojenja*; Atlas Copco; Beograd; 2008.
- [16] M. Dubravac; *Basics of respiratory system protection*. Fire school; Ig; Ljubljana; 2009.
- [17] M. Todić; T. Latinović; B. Đudurović; A. Majstorović; *Security Applications o Insulation Masks*; 13th International Conference of Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering; University of Banjaluka; Faculty of Mechanical Engineering; Banjaluka; 2017.
- [18] M. Todić; T. Latinović; B. Đudurović; A. Majstorović; *Security of bottle to fill in a high pressure air*; International Conference on Applied Science ICAS 2017; IOP Publishing.
- [19] N. Milovanović; *Procena integriteta rotacione opreme primenom parametara mehanike loma*, doktorska disertacija; Univerzitet u Beogradu; 2020.

- [20] N. Hrvačić; *Sprave za zaštitu dišnih organa*. Centar za stručno obrazovanje vatrogasnih kadrova; Zagreb; 1977.
- [21] O. Berger; M. Jovanović; B. Kocić; M. Kulauzov; M. Nedeljković; M. Otašević; J. Pecić; M. Švabić-Vlahović; *Specijalna bakteriologija*. Savremena administracija; Beograd 1997.
- [22] O. Stojanović; N. Stojanović; Đ. Kosanović; *Štetne i opasne materije*. Izdavačka radna organizacija "Rad" Beograd; 1984.
- [23] P. Murray; E. Baron; M. Pfaller; F. Tenover; R. Tenover; *Manual of clinical Microbiology*. ASM Press; Washington D.C. 1998.
- [24] R. Karkalić; M. Blagojević; Ž. Mitić; *Implementation of Modern Self-Contained Breathing Apparatus in Emergensiens*. 1<sup>st</sup> International Scientific on Safety Engineering and 11<sup>th</sup> International Conference on Fire and Explosion Protection; Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu; Novi Sad; 2008.
- [25] S. Gošović; G. Gošović; *Priručnik za komercijalna i mornarička dubinska ronjenja*. Sveučilišna knjižnica u Splitu; Split; 2008.
- [26] S. Gošović; *Priručnik za profesionalna i vojna ronjenja*. Grafform; Split; 1997.
- [27] S. Veljković; *Risk Factors and Their Effect on Assortment Personal Protective Equipment for firefighters Unit*. 10<sup>th</sup> International Conference on Fire and Explosion Protection; Institut za tehnologiju zaštite Novi Sad; Viša tehnička škola; Novi Sad; 2006.
- [28] S. Švaić; Monografija „*Oprema pod tlakom*“; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2006.
- [29] S. Vučić; *Oprema pod tlakom*; Hrvatska komora inženjera strojarstva; Zagreb 2010.
- [30] T. Filetin; F. Kovačiček; J. Indof; *Svojstva i primjena materijala*; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2013.
- [31] V. Kostić; *Zapaljive i druge opasne materije*. Udruženje publicista Beograda; Beograd; 1980.

**Drugi izvori:**

- [32] AirElite 4h – the innovative KO closed-circuit breathing apparatus.
- [33] Closed-circuit breathing apparatus Dräger PSS® BG 4 plus.
- [34] C.M.A.S. Ronilac sa jednom zvijezdom R1 (P1); Priručnik i prezentacija; Uređivački odbor; Ronilački klub „BUK“; Banja Luka 2015.
- [35] Delfin servis Sremska Kamenica; n.d.
- [36] Guide to the *R&TTE Directive 1999/5/EC* Version of 20 April 2009.
- [37] [http://www.labker.hu/wp-content/uploads/PDS\\_Beta\\_series\\_machines.pdf](http://www.labker.hu/wp-content/uploads/PDS_Beta_series_machines.pdf)
- [38] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/celici-za-poboljsanje-i-poboljsani/>
- [39] <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/38aeba81-145e-4580-8717-752020173fa1/en-12245-2002>
- [40] <https://www.trcpro.rs/proizvodi/senzori-davaci/davaci-pritiska.html>
- [41] <https://vatropromet.hr/en/steel-cylinder-cyl-s-6-l-product-179/>
- [42] <https://youtu.be/IwD7LFzQ9oY>
- [43] <https://youtu.be/ZbMb85IenJA>
- [44] Interspiro. Aluminium Liner Cylinders.
- [45] Interspiro. Products Catalog.
- [46] Interspiro. Sicherheitsdatenblatt-Spirodec Plus.
- [47] Interspiro. Spiro Com.
- [48] Interspiro. Spiro Guide.
- [49] Interspiro. Spiro Guide Heads-Up Display.
- [50] Interspiro. Spiro Link.
- [51] Interspiro. Spiro Guide Monitoring.

- [52] Interspiro. User manual breathing apparatus QS.
- [53] Interspiro. User manual breathing apparatus QS 7.
- [54] Interspiro. User manual breathing apparatus Spiromatic S7.
- [55] Interspiro. User manual LABtec 400.
- [56] MSA Auer Composite Compressed Air Cylinders for Breathing Apparatus.
- [57] MSA Air Elite 4h.
- [58] MSA Air MaXX and Auto MaXX.
- [59] MSA Alpha Click.
- [60] MSA Alpha Personal Network.
- [61] MSA Clasic Alpha.
- [62] MSA Compressed Air Cylinder-Cylinder Valve.
- [63] MSA Filteri za respiratornu zaštitu.
- [64] MSA Auto MaXX Function of Lung Automat.
- [65] MSA Maintenance Specialist Manual.
- [66] MSA Maintenance Specialist Manual for MSA AUER Full Face Masks.
- [67] MSA Operating Manual Smart Check.
- [68] MSA Products Catalog.
- [69] MSA Service Training INT-E Reducer 500-E.
- [70] MSA Supplement to Maintenance Specialist Manual.
- [71] MSA Steel-Compressed Air Cylinders for Breathing Apparatus.
- [72] MSASSteel%20Compressed%20Air%20Cylinders\_Operating%20Manual%  
20materijal%20celicne%20boce.pdf

- [73] MSA Steel Compressed Air Cylinders Operating Manual - GB-BG-CZ-HU-BE-PL-RO-RU-SK-UA
- [74] MSA Service training. INT-E Reducer DM 04.
- [75] P. Grom; upvh/izolacijski aparati; Gasilska brigada Ljubljana.
- [76] Pravilnik o tehničkim zahtjevima za projektovanje, izradu i ocjenjivanje usaglašenosti opreme pod pritiskom (Sl. Glasnik Republike Srbije broj: 84/11).
- [77] Regulaciona tehnika-skripta; Mašinski fakultet, Banja Luka 2006.
- [78] Sigurnosna tehnika-predavanja; Mašinski fakultet, Banja Luka 2009.
- [79] S. Kožuh; Specijalni čelici-skripta; Sveučilište u Zagrebu; Metalurški fakultet, sisak, 2010.
- [80] Uputstvo za rad sa kompresorom visokog pritiska za medicinski vazduh-Bauer; Delfin servis, Novi Sad; 2007.
- [81] V. Babić; Posude pod pritiskom, predavanja iz predmeta toplotni aparati, Mašinski fakultet, Banja Luka; nd.
- [82] [w.w.w./Croatian%20scientific%20bibliography%20-%20Browsing%20paper.html](http://w.w.w./Croatian%20scientific%20bibliography%20-%20Browsing%20paper.html)
- [83] [w.w.w.EN\\_12245\\_2002\\_02.pdf](http://w.w.w.EN_12245_2002_02.pdf)
- [84] [www.fionn.or.uk](http://www.fionn.or.uk)
- [85] [w.w.w.flir.eu/products/k65/](http://w.w.w.flir.eu/products/k65/)
- [86] [www.healeyhero.co.uk/rescue/glossary/meco](http://www.healeyhero.co.uk/rescue/glossary/meco)
- [87] [www.interspiro.com/firefighting](http://www.interspiro.com/firefighting)
- [88] [www.interspiro.com/product](http://www.interspiro.com/product)
- [89] [w.w.w.mensor.com/cpp1000 h cpp700 h en co.WIKA](http://w.w.w.mensor.com/cpp1000_h_cpp700_h_en_co.WIKA)
- [90] [www.msasaefity/alpha personal network](http://www.msasaefity/alpha_personal_network)
- [91] [www.msasaefity.rs](http://www.msasaefity.rs)

- [92] [w.w.w.Mont%20Blanc%20\(4810m\)%20-%2007.2007.html](http://w.w.w.Mont%20Blanc%20(4810m)%20-%2007.2007.html)
- [93] [w.w.w.nvms.com.au/product/quantumx-mx840b-mx440b-universal-data-acquisition-modules/](http://w.w.w.nvms.com.au/product/quantumx-mx840b-mx440b-universal-data-acquisition-modules/)
- [94] [www.pomorci.com/skole/brodomasinstvo/kompresori](http://www.pomorci.com/skole/brodomasinstvo/kompresori)
- [95] [w.w.w.Požár%20v%20tunelu%20pod%20Mont%20Blankem%20si%20vyžádal%2039%20životů%20—%20ČT24%20—%20Česká%20televize.html](http://w.w.w.Požár%20v%20tunelu%20pod%20Mont%20Blankem%20si%20vyžádal%2039%20životů%20—%20ČT24%20—%20Česká%20televize.html)
- [96] [www.trcpro.rs/proizvodi/merne-trake-i-pribor/merne-trake.html](http://www.trcpro.rs/proizvodi/merne-trake-i-pribor/merne-trake.html)
- [97] [www.upvans.com](http://www.upvans.com) kompozitne boce
- [98] [www.voltcraft.com](http://www.voltcraft.com) dt 8820



## PRILOZI

# PRILOG 1

Ispitivanje epruveta na kidalici

# Metals Tensile Test

Test standard.....BAS EN 6892-1  
 Tester.....Slavisa, Mllisav  
 Material.....C.5432

Supplier.....Aleksandar Majstorovic  
 Tested on.....2022-05-17

Testing machine.....Beta 200  
 Axial extensometer.....ME46-NG  
 Transversal extensometer.....ME46-NG  
 Pretension.....5 MPa  
 Gripped length.....105 mm  
 Test speed 1.....0 % -> 20 mm/min  
 Test speed 2.....Rp0.2 -> 20 mm/min

Directory.....Test  
 Parameter set.....Parametri za konstrukcioni celik

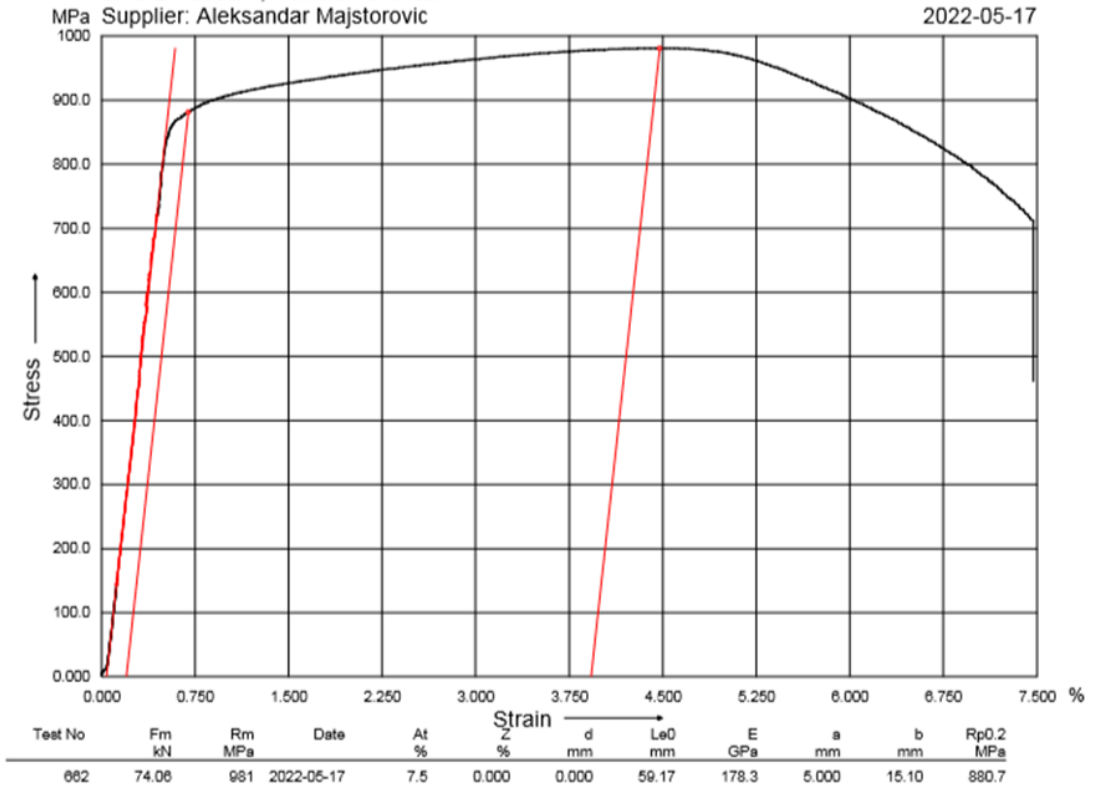
## Legend

Fm.....Maximum load  
 Rm.....Tensile strength  
 Date.....Tested on  
 At.....Total breaking elongation  
 Z.....Red. of area after break  
 d.....Diameter  
 Le0.....Extensometer gauge length  
 E.....E-Modulus  
 a.....Thickness  
 b.....Width  
 Rp0.2.....Proof stress at 0.2%

Test No	Fm kN	Rm MPa	Date	At %	Z %	d mm	Le0 mm	E GPa	a mm	b mm	Rp0.2 MPa
662	74.06	981	2022-05-17	7.5	0.000	0.000	59.17	178.3	5.000	15.10	880.7
663	77.24	997	2022-05-17	7.0	0.000	0.000	60.36	199.1	5.000	15.50	902.8
Minimum:	74.06	980.9		7.042	0.000	0.000	59.17	178.3	5.000	15.10	880.7
Maximum:	77.24	996.7		7.470	0.000	0.000	60.36	199.1	5.000	15.50	902.8
Range:	3.185	15.80		0.428	0.000	0.000	1.190	20.80	0.000	0.400	22.10
Std.dev.:	2.252	11.17		0.303	0.000	0.000	0.841	14.71	0.000	0.283	15.63
W(0.95) %:	26.75	10.15		37.47	n.a.	n.a.	12.65	70.03	0.000	16.61	15.74
Uncertainty A	1.592	7.900		0.214	0.000	0.000	0.595	10.40	0.000	0.200	11.05

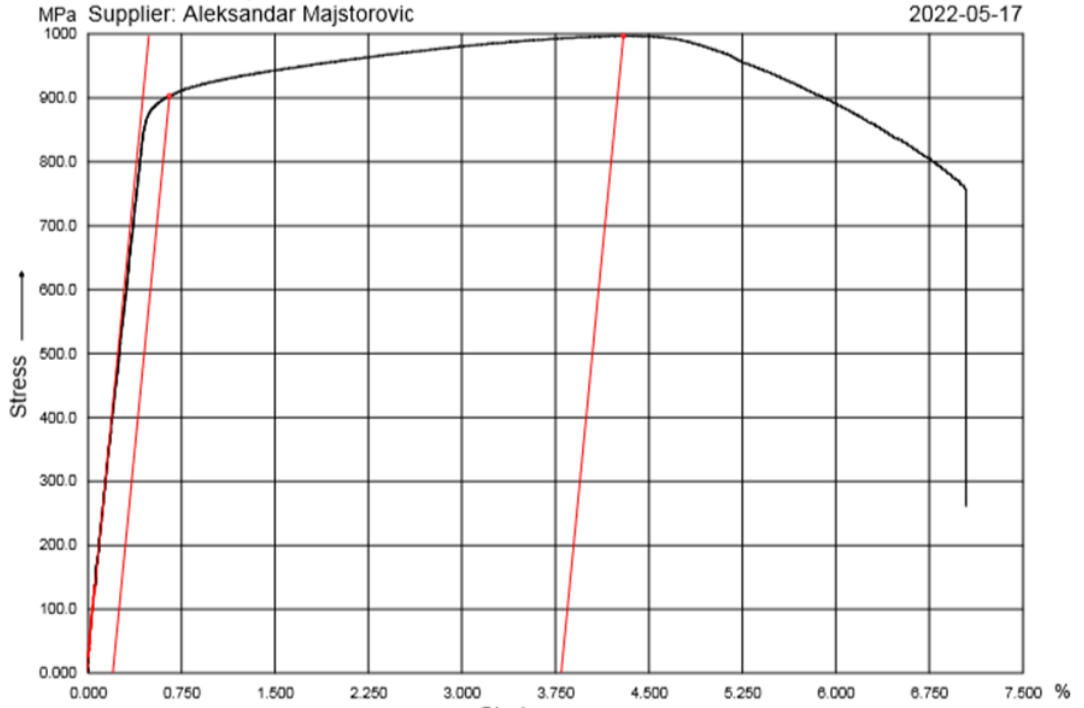
Test No 662  
 BAS EN 6892-1, Material: C.5432  
 Supplier: Aleksandar Majstorovic

2022-05-17



Test No 663  
 BAS EN 6892-1, Material: C.5432  
 Supplier: Aleksandar Majstorovic

2022-05-17



Test No	Fm kN	Rm MPa	Date	At %	Strain Z %	d mm	Le0 mm	E GPa	a mm	b mm	Rp0.2 MPa
663	77.24	997	2022-05-17	7.0	0.000	0.000	60.36	199.1	5.000	15.50	902.8

## PRILOG 2

Rezultat laboratorijskog ispitivanja isječka čelične boce

13/06/2019 8:49:02 PM Sample: PRODAJA  
Program: FELAST Task: PR\_123

Run	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Avg	0.30302	0.46993	0.26257	0.01193	0.00374	1.85831	1.80784	0.17444	0.43617	0.00670
	Ti	Al	Nb	W	As	Sn	Co	Pb	B	Sb
Avg	0.00263	0.02102	0.00344	0.01894	0.01200	0.01287	0.03904	0.00029	0.00020	0.00358
	Ta	Zr	Bi	Ca	Te	Zn	Ce	N	FE%	
Avg	-0.00031	0.00051	-0.00471	0.00015	-0.00002	0.00024	0.00109	(-0.03632	94.5907	

## BIOGRAFIJA

Aleksandar Majstorović rođen je 11.06.1971. godine u Banjoj Luci, gdje je završio Osnovnu školu Georgi Stojkov Rakovski i srednju MetalSKU školu. Diplomirao je na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci, Odsjek zaštita na radu, na katedri Inženjering zaštite na radu, sa temom „Sistemi i uređaji zaštite na dizel-električnim lokomotivama serije 661“, 2008. godine pod mentorstvom prof. dr Ostoje Miletića. Na istom fakultetu, Odsjek zaštita na radu, usmjerenje fizičko-hemijski uslovi radne sredine, odbranio je magistarski rad, na temu „Bezbednost korištenja izolacionih aparata u akcidentnim situacijama“, 2014. godine, pod mentorstvom prof. dr Mladena Todića.

Cjelokupan radni staž, uglavnom mu je vezan za poslove u Vatrogasnoj brigadi Banja Luka. Na radnom mjestu profesionalnog vatrogasca proveo je 10 godina, a nakon diplomiranja, raspoređen je na rukovodeće radno mjesto komandira tehničke službe, na kojem se zadržao sedam godina do raspoređivanja na radno mjesto komadanta vatrogasne brigade na kojem je proveo dvije i po godine. Edukovao se u zemlji i inostranstvu, gdje je stekao sertifikate: o rukovanju i osnovnom održavanju kompresora visokog pritiska, ispitivanju i održavanju izolacionih aparata proizvođača Interspiro i MSA, iz oblasti opasnih materija, specijalističkog kursa i treninga za prepoznavanje i povećavanje sigurnosti od (CBRN substances) radiološko-hemijskih i bioloških supstanci, za ronioca P1/R1 i P2/R2 kategorije. Bio je član Upravnog odbora, a zatim član Stručno-tehničke komisije Vatrogasnog saveza Republike Srpske. Učestvovao je u procesima edukacije ispitanih i profesionalnih vatrogasaca, kao predavač i u izradi nastavnih planova i programa, kao i član Ispitne komisije za profesionalnog vatrogasca i rukovodioca akcije gašenja požara.

Od 2019. godine, raspoređen je u Službu za zajedničke poslove, Gradske uprave Grada Banja Luka na radnom mjestu koordinatora za poslove javnih nabavki i praćenje komunalnih rashoda, gdje je stekao sertifikate iz oblasti javnih nabavki.

Učestvovao je na naučnim i stručnim skupovima lokalnog i međunarodnog karaktera. Autor je i koautor dvanaest naučnih i stručnih radova i knjige, objavljene kod njemačkog izdavača Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, na engleskom i njemačkom jeziku.



**Izjava 1.**

**IZJAVA O AUTORSTVU**

**Izjavljujem  
da je doktorska disertacija**

Naslov rada: „Bezbjednost izolacionih aparata pri ekspanziji komprimovanog medicinskog vazduha“

Naslov rada na engleskom jeziku: „Safety of Breathing Apparatus by Expansion of Compressed Medical Air“

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da doktorska disertacija, u cjelini ili u dijelovima, nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Banjoj Luci, \_\_\_\_\_

Potpis doktoranta  
\_\_\_\_\_

## **Izjava 2.**

### **Izjava kojom se ovlašćuje Univerzitet u Banjoj Luci da doktorsku disertaciju učini javno dostupnom**

Ovlašćujem Univerzitet u Banjoj Luci da moju doktorsku disertaciju pod naslovom: “Bezbjednost izolacionih aparata pri ekspanziji komprimovanog medicinskog vazduha“ koja je moje autorsko djelo, učini javno dostupnom.

Doktorsku disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Banjoj Luci, \_\_\_\_\_

Potpis doktoranta

\_\_\_\_\_

### **Izjava 3.**

#### **Izjava o identičnosti štampane i elektronske verzije doktorske disertacije**

Ime i prezime autora: Aleksandar Majstorović

Naslov rada: “Bezbednost izolacionih aparata pri ekspanziji  
komprimovanog medicinskog vazduha“

Mentor: prof. dr Mladen Todić

Izjavljujem da je štampana verzija doktorske disertacije identična elektronskoj verziji koju sam predao/la za digitalni repozitotijum Univerziteta u Banjoj Luci.

U Banjoj Luci, \_\_\_\_\_

Potpis doktoranta  
\_\_\_\_\_