

# Održavanje bušotina savitljivim tubingom

---

**Paljušić, Alen**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:116398>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**ODRŽAVANJE BUŠOTINA SAVITLJIVIM  
TUBINGOM**

Diplomski rad

Alen Paljušić

N-227

Zagreb, 2018.

## ODRŽAVANJE BUŠOTINA SAVITLJIVIM TUBINGOM

ALEN PALJUŠIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

U zadnjih desetak godina broj operacija sa savitljivim tubingom rastao je eksponencijalno te tako čini jedan od najbrže rastućih područja unutar sektora istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Prema ICoTA-i (*engl. Intervention & Coiled Tubing Association*) u 2018. godini u svijetu je bilo aktivno 2040 postrojenja za rad sa savitljivim tubingom, od čega je čak četvrtina smještena u Sjedinjenim Američkim Državama.

Savitljivi tubing izvrsno je rješenje za današnje potrebe opremanja i održavanja bušotina zato jer postoje mnogi zahtjevi za izradu ultra dubokih bušotina, zbog sve veće iscrpljenosti plićih ležišta, a i zbog sve veće eksploatacije nekonvencionalnih ležišta u kojima je potrebna velika duljina horizontalnog dijela kanala bušotine te velika kontaktna površina između kanala bušotine i ležišta.

U ovom radu biti će opisani pojedine operacije opremanja i održavanja kanala bušotine te dani prijedlozi sastava alata za sklapanje dubinskog niza alatki za obavljanje određene operacije u kanalu bušotine.

Ključne riječi: savitljivi tubing, opremanje i održavanje, postrojenje, dubinski sklop alatki, horizontalne bušotine

Diplomski rad sadrži: 81 stranica, 3 tablice, 69 slika i 42 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a  
2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a  
3. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a

Datum obrane: 28. 09. 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## COILED TUBING WORKOVER

ALEN PALJUŠIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

In the previous decade, the number of coiled tubing operations within the petroleum industry grew exponentially, making it one of the fastest growing sectors within the industry. According to the Intervention & Coiled Tubing Association (ICoTA) in 2018, there were 2040 active coiled tubing rigs in the world. One fourth of all rigs are located in the United States, followed by Canada and then Russia. Coiled tubing is excellent solution for use in ultra deep wells due to depletion of shallow layers and due to the increased utilization of unconventional reservoirs requiring a large horizontal reach and large contact surface between tubing and well. This paper will describe some of the workover and completion operations and provide suggestions of the tool composition for creating high quality bottom hole assembly for proper and successful application.

Keywords: coiled tubing, workover and completion, rig, bottom hole assembly, horizontal wells

Thesis contains: 81 pages, 3 tables, 69 figures and 42 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

2. Professor Zdenko Krištafor, PhD

3. Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Date of defense: 28 September 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	III
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. POVIJEST RAZVOJA POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM .....</b>	<b>2</b>
<b>3. SVOJSTVA TUBINGA I NAČIN IZRADE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Postupak proizvodnje savitljivog tubinga .....</b>	<b>6</b>
<b>3.2. Alternativni materijali za izradu savitljivog tubinga .....</b>	<b>11</b>
3.2.1. Kompozitni materijali .....	11
3.2.2. Titan .....	12
<b>4. POSTROJENJE ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1. Površinska oprema .....</b>	<b>15</b>
4.1.1. Bubanji s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem savitljivog tubinga.....	15
4.1.1.1. Osovina bubnja.....	16
4.1.1.2. Kuglasti ventil i rotirajuća spojnica.....	18
4.1.1.3. Automatski redač.....	19
4.1.1.4. Pogonski sustav bubnja .....	22
4.1.2. Injektorski sklop.....	24
4.1.2.1. Injektor .....	24
4.1.2.2. Vodicica savitljivog tubinga.....	27
4.1.2.3. Indikator težine .....	29
4.1.2.4. Nosač injektora.....	29
4.1.3. Preventerski sklop .....	30
4.1.3.1. Stripper .....	30

4.1.3.2. Hidrauličko mehanički preventerski sklop (BOP's) .....	31
4.1.4. Pogonsko hidraulički regulacijski sklop .....	33
4.1.4.1. Motor .....	34
4.1.4.2. Hidrauličke sisaljke .....	34
4.1.4.3. Ventili za kontrolu tlaka .....	34
4.1.4.4. Spremnik hidrauličkog fluida .....	35
4.1.4.5. Filteri i cjedila .....	35
4.1.4.6. Izmjenjivači topline.....	35
4.1.4.7. Hidraulički fluid .....	35
4.1.4.8. Kontrolna kabina .....	36
<b>5. PRIMJENA SAVITLJIVOG TUBINGA U OPERACIJAMA OPREMANJA I</b>	
<b>ODRŽAVANJA BUŠOTINA .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1. Pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine .....</b>	<b>37</b>
5.1.1. Projektiranje čišćenja kanala bušotine od nataloženih čvrstih čestica .....	39
5.1.2. Reverzna cirkulacija.....	42
5.1.3. Koncentrični savitljivi tubing.....	42
5.1.4. Ispiranje pomoću mlaznice.....	44
5.1.4.1. Sastav alata .....	44
<b>5.2. Instrumentacija .....</b>	<b>50</b>
5.2.1. Projektiranje instrumentacije.....	51
5.2.2. Sastav alata.....	54
<b>5.3. Karotažna mjerenja.....</b>	<b>62</b>
5.3.1. Sastav alatki za obavljanje karotažnih mjerenja uz korištenje niza savitliivog tubinga.....	65
<b>5.4. Hidrauličko frakturiranje .....</b>	<b>67</b>
<b>6. PRIMJER MODERNE UPORABE DUBINSKOG SKLOPA ALATA</b>	
<b>SAVITLJIVOG TUBINGA .....</b>	<b>71</b>
<b>6.1. Alatka za povlačenje savitljivog tubinga malog promjera (traktor) .....</b>	<b>71</b>

6.2. Primjer ugradnje savitljivog tubinga pomoću alatke za povlačenje tubinga....	73
7. ZAKLJUČAK .....	76
8. LITERATURA .....	77

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Izrada cjevovoda za projekt PLUTO .....	2
<b>Slika 2-2.</b> Polaganje nizova cjevovoda pomoću brodova .....	3
<b>Slika 2-3.</b> Izrada prvog bubnja za namatanje cjevovoda za opreaciju PLUTO .....	3
<b>Slika 2-4.</b> Prototip injektorskog sklopa kompanija California Oil Company i Bowen Tools .....	4
<b>Slika 3-1.</b> Dijagonalni var .....	5
<b>Slika 3-2.</b> Talionica željeza .....	6
<b>Slika 3-3.</b> Čelične ploče .....	7
<b>Slika 3-4.</b> Postupak namatanja čelika.....	7
<b>Slika 3-5.</b> Valjkasti rezači .....	8
<b>Slika 3-6.</b> Čelične trake željenih dimenzija.....	8
<b>Slika 3-7.</b> Varenje dugih nizova čeličnih traka .....	9
<b>Slika 3-8.</b> Oblikovanje čeličnih traka.....	9
<b>Slika 3-9.</b> Indukcijski zavarivač .....	10
<b>Slika 3-10.</b> Novi savitljivi tubing .....	11
<b>Slika 3-11.</b> Kompozitni savitljivi tubing .....	12
<b>Slika 4-1.</b> Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom sastavljeno od zasebnih jedinica ....	13
<b>Slika 4-2.</b> Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na teretno vozilo .....	14
<b>Slika 4-3.</b> Postrojenje postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na prikolici .	14
<b>Slika 4-4.</b> Odobalno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom .....	15
<b>Slika 4-5.</b> Dimenzije bubnja.....	17
<b>Slika 4-6.</b> Rotirajuća spojnica .....	18
<b>Slika 4-7.</b> Spoj savitljivog tubinga postavljenog na bubanj s ostatkom površinskog sustava za cirkulaciju fluida .....	19
<b>Slika 4-8.</b> Automatski redač .....	20
<b>Slika 4-9.</b> Shema automatskog redača .....	20
<b>Slika 4-10.</b> Mjerač duljine tubinga.....	21
<b>Slika 4-11.</b> Pomoćni sustav za mjerenje duljine savitljivog tubinga .....	22
<b>Slika 4-12.</b> Shema bubnja za namatanje savitljivog tubinga.....	22
<b>Slika 4-13.</b> Primjer loše manipulacija savitljivim tubingom.....	23



<b>Slika 4-14.</b> Injektor .....	25
<b>Slika 4-15.</b> Različite izvedbe lanaca i zatezača u injektorskom sklopu .....	26
<b>Slika 4-16.</b> Tarni segmenti za obuhvaćanje određenog promjera .....	26
<b>Slika 4-17.</b> Shema rasporeda zatezača na lancima injektorskog sklopa .....	27
<b>Slika 4-18.</b> „Big wheel“ sustav .....	28
<b>Slika 4-19.</b> Stripper .....	30
<b>Slika 4-20.</b> Čeljusti preventerskog sklopa.....	32
<b>Slika 4-21.</b> Različite izvedbe preventerskog sklopa na postrojenju za rad sa savitljivim tubingom.....	33
<b>Slika 4-22.</b> Pogonsko hidraulički regulacijski sklop.....	34
<b>Slika 4-23.</b> Kontrolna kabina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom .....	36
<b>Slika 5-1.</b> Sile koje djeluju na kretanje čvrstih čestica tijekom ispiranja kanala bušotine..	38
<b>Slika 5-2.</b> Primjer destabilizacije fluida uslijed reakcije s ugljikovodicima.....	40
<b>Slika 5-3.</b> Ponašanje čvrstih čestica u horizontalnom dijelu kanala bušotine.....	41
<b>Slika 5-4.</b> Presjek koncentričnog savitljivog tubinga.....	42
<b>Slika 5-5.</b> Tok fluida kroz koncentrični savitljivi tubing .....	43
<b>Slika 5-6.</b> Djelovanje mlazne pumpe s mlaznicama .....	44
<b>Slika 5-7.</b> Spojnica savitljivog tubinga s vanjskim klinovima.....	45
<b>Slika 5-8.</b> Dvostruki protupovratni ventil .....	46
<b>Slika 5-9.</b> Ravna cijev .....	47
<b>Slika 5-10.</b> Alatka za ispiranje s mlaznicama .....	48
<b>Slika 5-11.</b> Pulsirajući niz za ispiranje kanala bušotine.....	49
<b>Slika 5-12.</b> Primjer detaljnog opisa stanja stanja alatki zaostalih u bušotini neposredno prije provođenja operacije instrumentacije.....	51
<b>Slika 5-13.</b> Mogući položaj alatki u otklonjenom kanalu bušotine neposredno prije instrumentacije .....	52
<b>Slika 5-14.</b> Uobičajeni dubinski sklop alata za instrumentaciju .....	53
<b>Slika 5-15.</b> Sponica savitljivog tubinga s vanjskim klinovima u vijscima za dotezanje.....	55
<b>Slika 5-16.</b> Alatka za razdvajanje savitljivog tubinga i dubinskog sklopa .....	56
<b>Slika 5-17.</b> Mehanički udarač (škare) .....	57
<b>Slika 5-18.</b> Hidraulički udarač kompanije NOV.....	58
<b>Slika 5-19.</b> Alatka za vanjsko hvatanje .....	59
<b>Slika 5-20.</b> Čeljusti za vanjsko hvatanje .....	59
<b>Slika 5-21.</b> Alatka za unutarnje hvatanje .....	60

<b>Slika 5-22.</b> Čeljusti za unutarnje hvatanje.....	60
<b>Slika 5-23.</b> Dubinski sklop za instrumentaciju s vibrirajućim udaračem dvosmjernog djelovanja .....	61
<b>Slika 5-24.</b> Injekcijski sustav za uvlačenje električnog kabela u niz savitljivog tubinga ...	64
<b>Slika 5-25.</b> Dubinski sklop alatki savitljivog tubinga za provođenje karotažnih ispitivanja tvrtke NOV Coiled Tubing Tools.....	67
<b>Slika 5-26.</b> Dubinski sklop alatki za višestupanjsko frakturiranje uz primjenu niza savitljivog tubinga .....	69
<b>Slika 5-27.</b> Klizni rukavac.....	69
<b>Slika 5-28.</b> Postupak otvaranja kliznog rukavca.....	70
<b>Slika 6-1.</b> Početni dio dubinskog sklopa alatki. ....	72
<b>Slika 6-2.</b> Shema kretanja traktora .....	73
<b>Slika 6-3.</b> Fotografija traktora smanjenog promjera .....	73

## **POPIS TABLICA**

Tablica 4-1. Pripadajuće K vrijednosti savitljivom tubingu.....	17
Tablica 4-2. Minimalni preporučeni zazor koji nastaje kod namatanja savitljivog tubinga na bubanj .....	18
Tablica 6-1. Tehničke specifikacije „traktor“ alatke.....	74

# 1. UVOD

Pojam savitljivi tubing u teoriji predstavlja ništa drugo nego veoma dugu metalnu cijev vanjskog promjera od 25 do 83 mm. Danas su postrojenja za rad sa savitljivim tubingom jedna od vodećih postrojenja pri opremanju i održavanju bušotina. U proteklom desetljeću broj operacija sa savitljivim tubingom unutar naftne industrije rastao je eksponencijalno te tako čini jedan od najbrže rastućih područja unutar sektora istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Prema ICoTA-i (*engl. Intervention & Coiled Tubing Association*) u 2018. godini u svijetu je bilo aktivno 2040 postrojenja za rad sa savitljivim tubingom, od čega se četvrtina nalazi se u Sjedinjenim Američkim Državama, dok su na drugom mjestu Kanada, a zatim Rusija. Tvrtke kao što su Baker Hughes, Halliburton, Schlumberger, BJ, NOV... imaju jako dugu tradiciju u korištenju i primjeni savitljivog tubinga u različitim zahvatima koje se provode u bušotinama te su danas svjetski lideri u pogledu razvijanja ove opreme njihove primjene. Sama konstrukcija postrojenja za rad sa savitljivim tubingom konstrukcija kao i kontinuirani razvoj dubinskih sklopova alatki čini ga primjerenim za korištenje u operacijama čišćenja kanala, postavljanja pakera, instrumentacije, frakturiranja, karotaznih mjerenja, prdobivanja fluida i sl. Savitljivi tubing izvrsno je rješenje za današnje potrebe zato jer postoje mnogi zahtjevi za izradu, a i zbog sve većeg iskorištavanja nekonvencionalnih ležišta u kojima je potrebna velika duljina horizontalnog dijela kanala bušotine te velika kontaktna površina između tubinga i ležišta.

U usporedbi s drugim remontnim postrojenjima postrojenje za rad sa savitljivim tubingom omogućava: rad u aktivnim bušotinama zbog mogućnosti cirkulacije kroz niz čime se smanjuje mogućnost oštećenja formacije jer nema potrebe za gušenjem bušotine; premještanje postrojenja na novu lokaciju u kratkom vremenu, rad s manjim brojem potrebnih operatera, jednostavno smještanje na odobalna postrojenja koristeći izvedbu na vodilicama (*engl. skid mounted units*)i dr.

U ovom radu biti će dan kratki pregled osnovnih komponenti postrojenja za rad sa savitljivim tubingom te opisane pojedine operacije opremanja i održavanja bušotine te sklopovi alatki koji se tijekom tih operacija koriste.

## 2. POVIJEST RAZVOJA POSTROJENJA ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

Savitljivi tubing se kao dio opreme u naftnom rudarstvu počeo koristiti 60-ih godina prošlog stoljeća i odmah se nametnuo kao jedan od rješenja prilikom opremanja i održavanja bušotina. Neposredno prije iskrcavanja savezničkih sila u Normandiji 1944. godine, engleski inženjeri razvili su i proizveli nizove veoma dugih i neprekidnih cjevovoda koje su koristili za transport goriva iz Engleske na europski kontinent te su pomoću njih snabdjeveni savezničke snage (slika 2-1). Spomenuti projekt nazvan je PLUTO (*engl. Pipe Lines Under The Ocean*) što bi u slobodnom prijevodu glasilo cjevovodi na dnu oceana, a uključivao je proizvodnju i polaganje nekoliko cjevovoda preko morskog dna kanala La Manche-a (slika 2-2). Postavljeni nizovi sastojali su se od pojedinih sekcija duljine 1219 m (4 000 ft), promjera 76,2 mm (23“), koje su bile spojene i namotane na bunjeve (kaleme) promjera 12,2 m (40 ft) (slika 2-3). Od 23 cjevovoda, 17 ih je bilo duljine od oko 48 km (30 mi), dok je duljina ostalih 6 iznosila oko 110 km (70 mi).



**Slika 2-1.** Izrada cjevovoda za projekt PLUTO (Imperial War Museums, 2018)



**Slika 2-2.** Polaganje nizova cjevovoda pomoću brodova (D Day Overlord, 2018)



**Slika 2-3.** Izrada prvog bubnja za namatanje cjevovoda za operaciju PLUTO (Blogs from DNV GL, 2018)

Uspješna proizvodnja i namatanje na bubanj neprekinutog niza cijevi (cjevovoda) postavila je temelj za daljnji razvoj koji je u konačnici doveo do razvoja savitljivog tubinga koji se koristi na današnjim modernim postrojenjima za rad sa savitljivim tubingom.

Još jedan izum potrebno je spomenuti zbog njegove iznimne važnosti u povijesnom razvoju savitljivog tubinga, a to je prva potpuno operativna jedinica za rad sa savitljivim tubingom prikazana na slici 2-4, koje su proizvele tvrtke California Oil Company i Bowen Tools. Primarna funkcija postrojenja bila je ispiranje nataloženog pijeska. Prva injektorska glava radila je na principu dvaju uspravno postavljenih, suprotno rotirajućih lanaca, gotovo

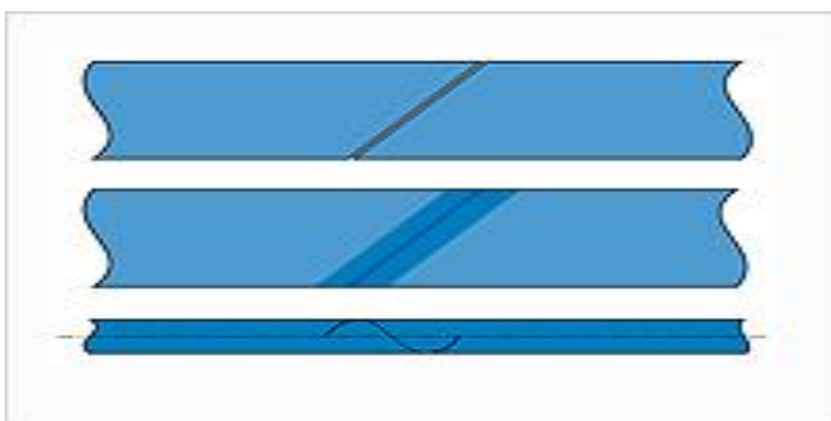
identično današnjim postrojenjima za rad sa savitljivim tubingom. Stripper je bio napravljen kao jednostavan uređaj koji je brtvio prstenasti prostor oko tubinga, a aktivirao bi se hidraulički kada bi bio izložen relativno malenim tlakovima na ušću bušotine. Prvi savitljivi tubing korišten u početnim ispitivanjima proizveden je čeonim zavarivanjem sekcija duljine 15,24 m (50 ft) te vanjskog promjera 3,493 cm (1,375 in). Ukupna duljina savitljivog tubinga iznosila je 4 572 m (15 000 ft) namotana na bubanj promjera 2,743 m (9 ft). (Petrowiki, 2012a)



**Slika 2-4.** Prototip injektorskog sklopa kompanija California Oil Company i Bowen Tools (Coil Solutions, 2007)

### 3. SVOJSTVA TUBINGA I NAČIN IZRADE

Sve do pred kraj prošlog stoljeća, za izradu odnosno spajanje kratkih cijevi u niz savitljivog tubinga koristili su se čeonni varovi. Od tog pristupa se polako odustajalo pošto se ispostavilo kako su upravo mjesta varova bila gotovo uvijek mjesta pojave deformacija odnosno pucanja samog tubinga. Čeonni varovi imali su poprilično loša mehanička svojstva pogotovo kada su bili izloženi visokim temperaturama. Ponekada su se čeonni varovi koristili za spajanje ravnih čeličnih traka tijekom procesa njihovog rezanja u manje odgovarajuće dimenzije, no ti varovi nisu bili dostatne kvalitete te su rađeni samo iz razloga kako bi omogućili neprekidan ulazak čeličnih traka u navedeni rezač. Proces čeonog varenja uključivao je usmjeravanje dvije čelične trake jedne prema drugoj te primjenu aparata za varenje. Promjer vara nikada nije bio jednak zavarenim čeličnim trakama već je bilo prisutno određeno povećanje promjera na varu. Taj višak bilo je potrebno ukloniti za daljnju obradu. Kako se utvrdilo da takvi varovi jednostavno ne omogućavaju dovoljnu kvalitetu u procesu izrade savitljivog tubinga tražila su se kvalitetnija rješenja. Rješenje se pojavilo u obliku vara izrađenog pod kutem od 45 stupnjeva (*engl. bias weld*) koji je služio za spajanje čeličnih traka nakon procesa njihovog rezanja u manje dimenzije (slika 3-1). Rezultat ovakve izrade bio je takav da su mehanička svojstva obje zavarene trake bila gotovo identična, a profil zavara se spiralno raspoređivao po cijevi nakon njezinog oblikovanja ravnomjerno je preuzimao naprezanja po svojoj površini. (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018a).



**Slika 3-1.** Dijagonalni var (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018b)

### 3.1. Postupak proizvodnje savitljivog tubinga

Prije nego što se pristupi samoj proizvodnji čelika potrebno je utvrditi koja su željena svojstva tubinga i u kakvim uvjetima će se koristiti proizvedeni tubing. Željezo je osnovna komponenta od koje izrađuje čelik. U tvornici čelika željezo se dobiva iz talionica koja proizvodi sirovo željezo (poznatije kao gvožđe) (slika 3-2). U talionici se uklanjaju nečistoće iz sirovog željeza te se dodaju razne primjese karakteristične za svaku pojedinu kvalitetu sirovog materijala koji se koristi u izradi savitljivog tubinga.



**Slika 3-2.** Talionica željeza (Keen Ovens, 2018)

Nedugo potom talina se izljeva u kanalice te nastaju teške čelične trake koje se skladište u tvornici čelika sve do procesa namatanja (slika 3-3). Pažljivo koristeći kontrolirani proces grijanja i hlađenja rotirajući valjci preoblikuju velike čelične ploče u namotaje čelika čija širina uobičajeno iznosi oko 1 metar (slika 3-4). Površina takvog čelika izvrsne je kvalitete i uvelike poboljšana u odnosu na kvalitetu sirovog željeza te ima veoma malene oscilacije u promjeru, odnosno u granicama je dopuštenih odstupanja. Po završetku procesa namotaji se tretiraju kiselinom kako bi uklonili površinsku oksidaciju odnosno provodi se postupak poznat kao čišćenje čelika. Na namotaje se još nanose i posebni premazi kako bi zaštilili površine od oštećenja prilikom transporta.





**Slika 3-3.** Čelične ploče (HKM, 2018)



**Slika 3-4.** Postupak namatanja čelika (National Oilwell Varco, 2018a)

Postupak koji slijedi je rezanje čeličnih namotaja na odgovarajuće dimenzije. Namotaji željeza zahvaćaju se posebnom dizalicom, na nju je montirana osovina koja omogućuje rotaciju namotaja i usmjeravanje željeza u valjkaste rezače (slika 3-5). Rezači svojom rotacijom izrađuju nekoliko manjih traka čelika, ovisno o željenim dimenzijama finalnog proizvoda (slika 3-6). Broj valjkastih rezača ovisi o početnom promjeru čelične trake i zadanom promjeru manjih te tako varira od izrade do izrade, a brzina rezanja može se povećati do 180 m/min . Zatim se provjeravaju debljine novonastalih traka pomoću

mikrometara i kalibara, a dopuštena odstupanja iznose  $\pm 0,254$  mm (0,01 in). Pristupa se još i provjeri kvalitete bočnih rezova, a zatim se novonastale trake namataju na bubanj.



**Slika 3-5.** Valjkasti rezači (Georg, 2018)



**Slika 3-6.** Čelične trake željenih dimenzija (Webco Industries, 2018)

Slijedeće korak u procesu proizvodnje savitljivog tubinga je spajanje čeličnih traka manjih promjera po duljini. To se izvršava korištenjem već gore spomenutog vara pod kutem od 45 stupnjeva (slika 3-7). Kada se takve trake formiraju u cijev, var poprima spiralni oblik po obodu cijevi koji je mnogo učinkoviti od uobičajenog čeonog vara jer omogućuje ravnomjerniju raspodjelu naprezanja. Kvaliteta svakog vara se potom provjerava jednom od nedestruktivnom metodom poput recimo x zraka. Var se potom

polira te se testira njegova čvrstoća u željenim uvjetima. Gotove trake se u procesu izrade odmah namataju na tzv. akumulacijski bubanj sve do konačne duljine potrebne za izradu tubinga.



**Slika 3-7.** Varenje dugih nizova čeličnih traka (National Oilwell Varco, 2018b)

Završni stupanj obrade odnosi se oblikovanje čeličnih traka u cijev. S akumulacijskog bubnja traka se usmjerava u prvi par horizontalnih valjaka koji prešaju čelične trake do na željenu konačnu debljinu stijenke. Drugi par valjaka počinje savijati rubove trake prema gore, dajući joj karakterističan U-oblik. Sljedeći u nizu su okomiti valjci koji dalje usmjeravaju rubove trake prema gore sve dok one ne formiraju oblik cijevi (slika 3-8).



**Slika 3-8.** Oblikovanje čeličnih traka (Jason Oil & Gas Equipment LLC, 2018)

Tako oblikovana cijev ulazi u indukcijski zavarivač koji radi uz pomoć visoko frekventne struje, u tom procesu toplina se prenosi duž formirane zavojnice. Zavojnica zagrijava rubove čelične trake te se ona dalje kreće u par valjaka koji spajaju dva užarena ruba i time oblikuju čeličnu cijev bez uporabe neko drugog materijala za spajanje čelika (slika 3-9). Nastale cijevi usmjeravaju se na karbidni rezač koji uklanja deformaciju čelika nastalu na površini vara i oblikuje ju na željeni promjer savitljivog tubinga. Za posebne zahtjeve moguće je ukloniti i unutarnje deformacije vara uz pomoć posebnih alata. Nadalje var se termalno obrađuje kako bi imao što bolja svojstva. Nakon termo obrade vara savitljivi tubing ulazi u jedinicu za dimenzioniranje vanjskog promjera, a dopušteno odstupanje iznosi  $\pm 0,254$  mm (0,01 in). Tubing zatim ulazi u drugu sekciju za termo obradu gdje se zagrijava cjelokupna površina tubinga na predodređenu temperaturu s ciljem kontrole i smanjenja naprezanja unutar stijenki.



**Slika 3-9.** Indukcijski zavarivač (EFD Induction, 2018)

Posljednja radnja u ovom procesu je namatanje savitljivog tubinga na bubanj, pri čemu se posebna pažnja posvećuje preciznosti namatanja kako bi se izbjegla neželjenih oštećenja (slika 3-10). Namotani savitljivi tubing treba još izložiti hidrodinamičkom testu, voda s kontroliranom pH vrijednosti utiskuje se u tubing pod određenim tlakom kako bi se ispitalo integritet tubinga. Minimalno vrijeme provođenja testa iznosi 15 minuta pri 80% vrijednosti granice tečenja i 5 minuta pri 100% vrijednosti. Ispituje se još i prohodnost tubinga uz pomoć kuglice određenog promjera koja mora prolaziti čitavom duljinom

savitljivog tubinga kako bi bili sigurni da nema nikakvih suženja na unutarnjoj stijenci. Kako bi se tubing u potpunosti očistio od vode u cirkulaciju se pušta dušik u kombinaciji s vijcima brisačima, a zatim slijedi i obrada inhibitorom korozije. Posljednja operacija je umetanje čepova na oba kraja savitljivog tubinga.



**Slika 3-10.** Novi savitljivi tubing (OCTG Pipes Products, 2015a)

### **3.2. Alternativni materijali za izradu savitljivog tubinga**

Postoji i nekoliko alternativnih materijala od kojih se izrađuju cijevi savitljivog tubinga s namjerom izvođenja operacije u mnogo korozivnijim i agresivnijim uvjetima te kako bi se produljio osigurava dugovječnost tubinga u bušotini.

#### **3.2.1. Kompozitni materijali**

Ovakva vrsta savitljivog tubinga nastala je ugrađivanjem vlakana (najčešće karbonskih ili staklenih) u matricu smole. Vlakna se kontinuirano namotavaju oko termoplastičnih cijevi te se tako namotana vlakna zasićuju epoksidnom smolom.

Slika 3-11 prikazuje primjere tri različita savitljiva tubinga od kompozitnih materijala tvrtke Fiberspar (bijela i zatamnjena površina unutar cijevi je termoplastični sloj). Za određeni promjer i debljinu stijenske, Fiberspar može pružiti široki raspon karakteristika i performansi kontrolirajući mješavinu vlakana, orijentaciju njihovih namota i svojstava matrice smole, a sve to ovisi dakako o uvjetima u kojima se tubing planira

primijeniti. Prva komercijalna primjena takvog kompozitnog savitljivog tubinga bila je 1998. godine u Nizozemskoj, a primjenila ga je tvrtka Halliburton.



**Slika 3-11.** Kompozitni savitljivi tubing (CTES, 2005)

Prednosti kompozitnih materijala pred čelično izrađenim savitljivim tubingom su:

- velika otpornost na oštećenja nastala zamorom materijala, 10 puta veća od čelika;
- otporan na hrđanje (koroziju);
- značajno manja masa u odnosu na čelik za jednaki promjer savitljivog tubinga;
- vodiči električne struje ili optička vlakna mogu biti u sastavu stijenke tubinga;

Dakako postoje i određeni nedostaci vezani uz kompozitne materijale koje je potrebno napomenuti:

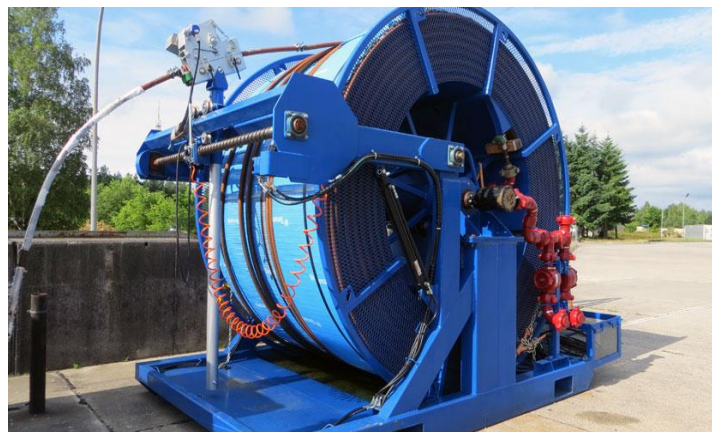
- od 3 do 5 puta veća cijena izrade samog tubinga;
- maksimalna temperatura u bušotini kod koje se može primijeniti 120 °C (na višim temperaturama dolazi do topljenja smole);
- znatno manja krutost;
- ograničena dostupnost.

### 3.2.2. Titan

Titan kao materijal primjenjuje se u ekstremno visokim korozivnim uvjetima. Vrlo je poželjan u primjeni prilikom operacija sa savitljivim tubingom no njegova visoka cijena nameće se kao glavni od problem. Cijena titanskog savitljivog tubinga iznosi od prilike 10 puta više od čeličnog standardnog tubinga. Još jedan od problema u njegovoj izradi predstavlja težina varenja takvog materijala jertemperatura taljenja titana iznosi 1668 °C (CTES, 2005).

#### 4. POSTROJENJE ZA RAD SA SAVITLJIVIM TUBINGOM

U sljedećem poglavlju biti će opisano klasično postrojenje za rad sa savitljivim tubingom te oprema koja se uobičajeno koristi pri većini operacija pri opremanju i održavanju bušotina nizom savitljivog tubinga. Postoji nekoliko standardnih izvedbi postrojenja za rad sa savitljivim, a to su: zasebne jedinice (dijelovi postrojenja smješteni su na „skid“ jedinice ili zasebna postolja) (slika 4-1.), jedinice izvedene u cjelini s teretnim vozilom (slika 4-2.), jedinice montirane na prikolice (pogonski dio zajedno s akumulatorskim jedinicama smješten na samom kamionu, a ostatak opreme na prikolici) (slika 4-3.) i offshore jedinice (slika 4-4).



**Slika 4-1.** Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom sastavljeno od zasebnih jedinica (Goes, 2015a)



**Slika 4-2.** Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na teretno vozilo (Goes, 2015b)



**Slika 4-3.** Postrojenje postrojenje za rad sa savitljivim tubingom montirano na prikolici (Stewart and Stevenson, 2018)





**Slika 4-4.** Odobalno postrojenje za rad sa savitljivim tubingom (National Oilwell Varco, 2018c)

#### **4.1. Površinska oprema**

Standardne elemente postrojenja za rad sa savitljivim tubingom čine:

- bubanj s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem savitljivog tubinga,
- injektorski sklop,
- preventerski sklop,
- pogonsko-hidrauličko-regulacijski sklop.

##### **4.1.1. Bubanj s namotanim savitljivim tubingom i automatskim redačem savitljivog tubinga**

Glavna zadaća bubnja je pohrana i transport savitljivog tubinga. Bubanj mora osigurati odgovarajuću napetost savitljivog tubinga na putu prema injektoru kako bi omogućio optimalno kretanje tubinga u kanal bušotine, te njegovo vađenje odnosno namatanje pri ponovnom povratku na bubanj. Osovina bubnja postavljena je u ležištima potporih stupova noseće konstrukcije. Ležajevi su dimenzionirani na veličinu koja je u stanju preuzeti opterećenje od tereta bubnja, namotanih uzlaznih cijevi i bilo kojeg fluida u

cijevima. Hidraulički motor pričvršćen je na postolju i može se prema potrebi djelomično pomicati kako bi se ostvario potreban nateg lanca, kojim se prenosi rotacija na pogonsku osovinu bubnja (Matanović i Moslavac, 2011).

Prema spomenutome glavne dijelove bubnja možemo razvrstati na:

- osovina bubnja,
- kuglasti ventil i rotirajuća spojnica,
- automatski redač,
- pogonski sustav bubnja.

#### *4.1.1.1. Osovina bubnja*

Najčešći materijal za izradu samog bubnja za savitljivi tubing je čelični lim. Kako bi se utvrdio kapacitet bubnja za pohranu tubinga određenog promjera i duljine, mogu se primijeniti postupak i formula 3-1 navedeni u nastavku. Rezultati su približni, a formula pretpostavlja idealno namatanje tubinga na bubanj.

$$L = (A + C) \times (A) \times (B) \times (K) \quad (3-1)$$

Gdje su:

L = kapacitet skladištenja tubinga (m),

A = visina namotaja tubinga oko osovine bubnja (cm),

B = širina bubnja (cm),

C = promjer osovine bubnja (cm),

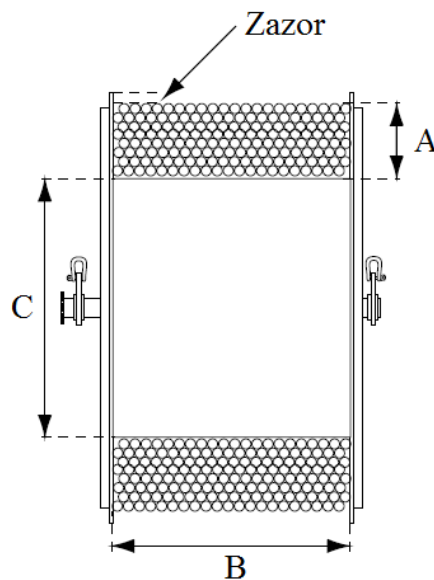
K = vrijednosti specifične za različite promjere tubinga (tablica 4-1)

K vrijednosti specifične za različite promjere tubinga

Tablica 4-1. Pripadajuće K vrijednosti savitljivom tubing (Schlumberger Dowell, 1995)

Vanjski promjer Tubinga (cm)	K vrijednost
2,54	0,262
3,18	0,168
3,81	0,116
4,45	0,086
5,08	0,066
6,03	0,046
7,30	0,032
8,89	0,021

Zazor predstavlja određenu udaljenost između vanjskog promjera bočnih stranica bubnja i vanjskog promjera tubinga pri maksimalnom broju namotaja oko osovine (L) (slika 4-5). Preporučeni minimalni zazor prikazan u tablici 4-2 varira ovisno o promjeru tubinga (Schlumberger Dowell, 1995).



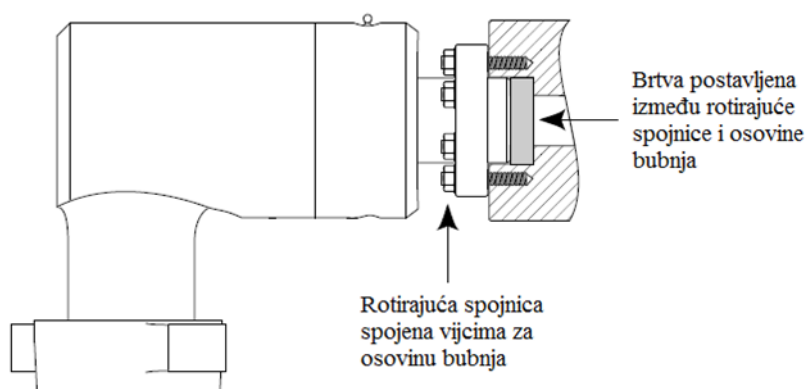
Slika 4-5. Dimenzije bubnja (Schlumberger Dowell, 1995)

**Tablica 4-2.** Minimalni preporučeni zazor koji nastaje kod namatanja savitljivog tubinga na bubanj (Schlumberger Dowell 1995)

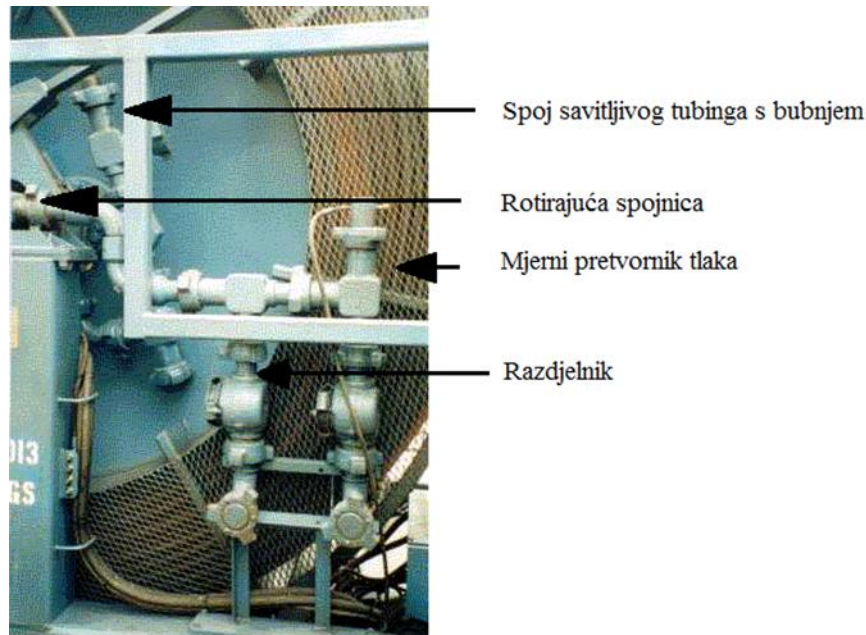
Vanski promjer tubinga (cm)	Zazor (cm)
2,54 i 3,18	3,81
3,81 i 4,45	5,08
5,08 i 6,03	7,62
7,30 i 8,89	10,16

#### 4.1.1.2. Kuglasti ventil i rotirajuća spojnica

Bubanj savitljivog tubinga opremljen je s rotirajućom spojnicom kako bi omogućio protjecanje fluida kroz tubing prilikom rotacije samog bubnja. Rotirajuća spojnica spojena je prirubnicom za osovinu bubnja (slika 4-6). Početak savitljivog tubinga spaja se na čelične cijevi odnosno razdjelnika bubnja te tako omogućuju protjecanje fluida. Dizajn razdjelnika varira ovisno o izvođaču, ali gotovo u svakome će se pronaći kuglasti ventil za izolaciju tubinga. U većini primjera u sastavu se nalazi i mjerni pretvornik tlaka kako bi omogućio operateru praćenje tlaka u sustavu nakon ulaska fluida u savitljivi tubing (slika 4-7).



**Slika 4-6.** Rotirajuća spojnica (Schlumberger Dowell, 1995)



**Slika 4-7.** Spoj savitljivog tubinga postavljenog na bubanj s ostatkom površinskog sustava za cirkulaciju fluida (BJ Services Tomball, 2005)

Važno je napomenuti sa se u ovom dijelu opreme nalaze još električni klizni prsten i razdjelnik za puštanje kuglice u sustav. Zadaća kliznog prstena je da omogućava vezu tijekom rotacije između električnog kabela u savitljivom tubingu i vanjskog priključnog kabela, s ciljem obavljanja mjerenja u kanalu bušotine . Razdjelnik omogućuje ubacivanje raznim dijelova opreme unutar savitljivog tubinga poput kuglice, čepovi ili dr.

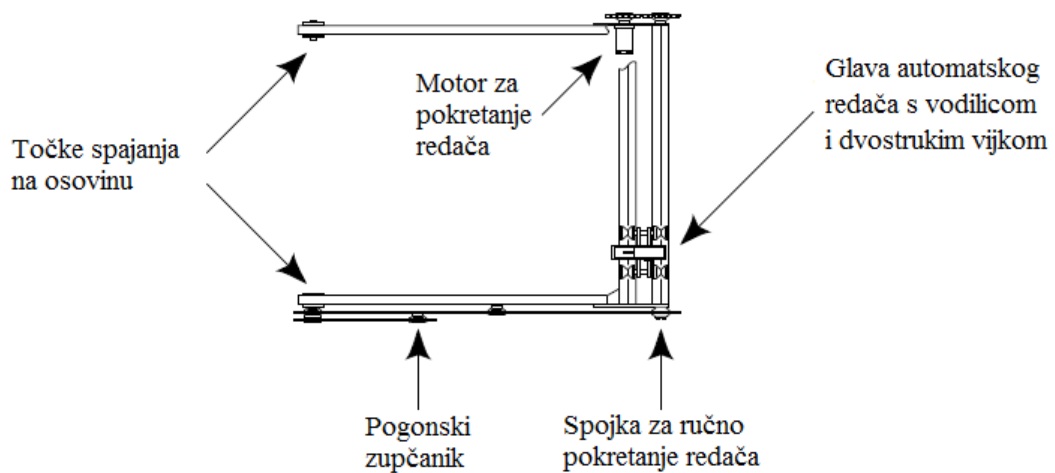
#### *4.1.1.3. Automatski redač*

Automatski redač služi kao vodilica za savitljivi tubing prilikom njegovog odmatanja ili ponovnog namatanja na bubanj (slika 4-8). Da bi se smanjilo naprezanje i mogućnost mehaničkog oštećenja tubinga, važno je osigurati da se tubing ravnomjerno odmotava odnosno namotava na bubanj.



**Slika 4-8.** Automatski redač (OCTG Pipes Products, 2015b)

Svojom konstrukcijom osigurava ravnomjerne pomake, a dvostruki dijamantni vijak sinkrozirano se pomiče po horizontalnoj osi prateći brzinu rotaciju bubnja (slika4-9). U slučaju potrebe operator može isključiti automatski rad redača i kontrolirati ga ručno. Na taj način može se izbjeći nekvalitetno namatanje tubinga na bubanj. Visina automatskog redača može se podesiti na dva načina, hidraulički ili ručno, kako bi ona odgovarala kutu ulaska tubinga u vodilicu injektorskog sklopa. Visina automatskog redača pruža prikladan prostor za smještaj mjerača dubine. Osim mjerača u ovom prostoru također se nalazi i oprema za podmazivanje i dodavanje inhibitora korozije (CTES, 2005).



**Slika 4-9.** Shema automatskog redača (Schlumberger Dowell, 1995)

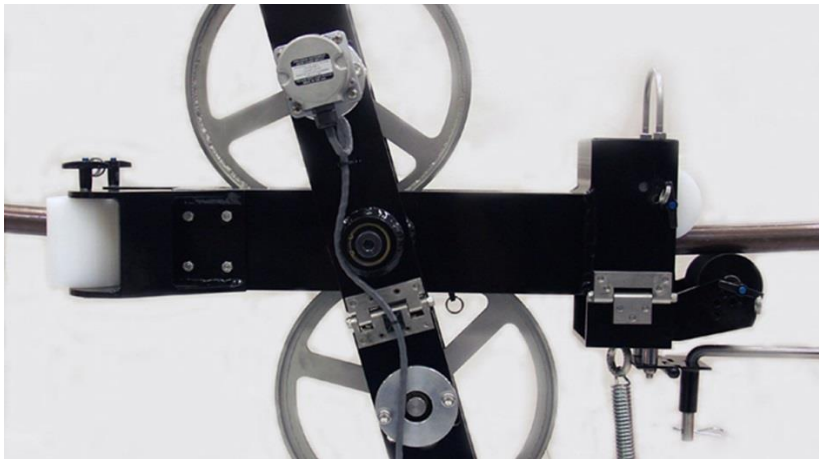
Mjerač duljine tubinga uobičajeno je odometar poput onoga koji se koristi u automobilima. Mehanički digitalni brojač (odometar, enkoder) pričvršćena je za osovinu kotača na koji priliježe savitljivi tubing te ga okreće oko njegove osi. Nasuprot pogonskog ležaja nalazi se drugi kotač koji osigurava da tubing cjelokupno vrijeme priliježe na pogonski kotač povezan s mehaničkim digitalnim brojačem (slika 4-10). Sila trenja između tubinga i pogonskog kotača osigurava njegovu kontinuiranu rotaciju tijekom kretanja tubinga. Na digitalnom prikazu ili jedinici za prikupljanje podataka na konzoli operatera pretvaraju se okretaji kotača u linearnu udaljenost koju je prošao savitljivi tubing, točnije ta vrijednost predstavlja dubinu na kojoj se nalazi tubing. Dubina se očitava u obliku peteroznamenkastog broja. Izmjerena dubina je ona duljina tubinga koja je utisnuta ispod injektora u kanal bušotine. Izmjerena dubina može se izravno izmjeriti na još nekoliko mjesta na postrojenju za rad s savitljivim tubingom. Osim na bubnju duljina savitljivog tubinga u kanalu bušotine se može mjeriti na injektoru ili vodilici savitljivog tubinga. Duljina se također može izračunati i indirektno mjerenjem rotacije pogonske osovine injektora. Bitno je napomenuti da se mjerena duljina može razlikovati od stvarne dubine do koje doseže savitljivi tubing ugrađenog u kanal bušotine. To se događa zbog nekoliko razloga kao što su: profil kanala bušotine, spiralnog rasprostiranja tubinga u kanalu, istežanja tubinga uslijed visoke temperature te djelotvornosti mjerača (Schlumberger Dowell, 1995).



**Slika 4-10.** Mjerač duljine tubinga (Drilling Contractor, 2018)

Postoje i varijante primjene pomoćnih sustava za mjerenje duljine savitljivog tubinga koja se odmotava ili namotava na bubanj. Najčešće se oni postavljaju kada su potrebna

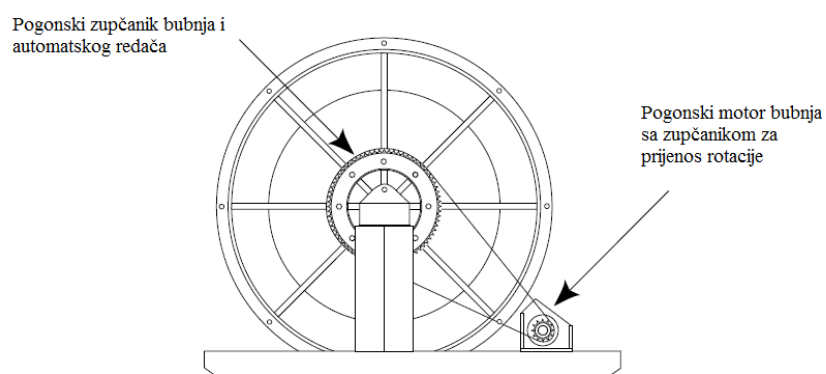
ekstremno precizna mjerenja duljine. Takvi mjerači postavljaju se na savitljivi tubing u prostoru između automatskog redača i vodilice savitljivog tubinga (slika 4-11). Poseban računalni program detektira i kompenzira greške nastale klizanjem uslijed trenja tubinga po osovini mjernog kotača. Izračun daje završnu vrijednost s točnošću od +/- 3,5 m na 3 050 m savitljivog tubinga.



**Slika 4-11.** Pomoćni sustav za mjerenje duljine savitljivog tubinga (National Oilwell Varco, 2018d)

#### 4.1.1.4. Pogonski sustav bubnja

Bubanj savitljivog tubinga pokreće se pomoću hidrauličkog motora. Motor pokreće osovinu bubnja prijenosom rotacije s vlastite osovine na bočne zupčanike koji su povezani lančanicima s zupčanicom na osovini bubnja.



**Slika 4-12.** Shema bubnja za namatanje savitljivog tubinga (Schlumberger Dowell, 1995)



Novije izvedbe bubnjeva imaju pogon koncipiran na principu zupčastog prijenosa (reduktora) koji se spajaju izravno s osovinom bubnja. Tijekom svih operacija mora se održavati odgovarajući nateg između bubnja i vodilice, a to se može ostvariti kontrolom broja okretaja samog motora. Tijekom namatanja tubinga na bubanj, bubanj ima veći broj okretaja od okretaja lanaca u injektorskom sustavu. Na taj način osiguravaju se ravnomjerni i dostatno zategnuti namoti savitljivog tubinga na bubanj. Na sljedećoj slici (slika 4-13.) primjer je lošeg manipuliranja bubnjem savitljivog tubinga. Prilikom spuštanja tubinga i dubinskog sklopa alatki u kanal bušotine nije se uočilo dostizanje niza na dno te se nije na vrijeme zaustavila rotacija bubnja i rad injektora. Ova pojava poznata je pod engleskim nazivom „run away“.



**Slika 4-13.** Primjer loše manipulacija savitljivim tubingom (CTES, 2005)

Prilikom transporta uključuje se djelovanje kočnica da bi se spriječila rotacija bubnja. Izvedbe i smještaj kočnica ovise o samim proizvođačima ili modelima bubnja. Prvi modeli kočnica djelovali su na način da su tarni segmenti dijelovali određenom silom na prirubnice osovine bubnja i tako usporavali njegovu rotaciju. Današnje izvedbe bubnjeva uključuju hidraulički kontrolirane kočnice koje se nalaze unutar kućišta motora. Bubanj u svojem sastavu uključuje još i sigurnosni uređaj za zaštitu samog bubnja i hidrauličkog sustava u slučaju mehaničkog kvara ili pogreške pri rukovanju samog operatera (osoba koja rukuje postrojenjem za rad sa savitljivim tubingom).

#### 4.1.2. Injektorski sklop

Glavni dijelovi injektorskog sklopa su:

- injektor,
- vodilica savitljivog tubinga,
- indikator težine,
- nosač injektora.

##### 4.1.2.1. Injektor

Glavne funkcije injektora su:

- prijenos dinamičke aksijalne sile na savitljivi tubing kako bi omogućio njegovo kretanje u ili iz bušotine;
- osiguravanje dovoljno sile trenja između tarnih segmenata injektora i samog savitljivog tubinga kako bi se izbjeglo njegovo proklizavanje;
- primjena statičke sile za pridržavanje savitljivog tubinga tijekom njegovog zaustavljanja
- osiguravanje prostora za smještaj senzora za mjerenje težine niza i njegove duljine.

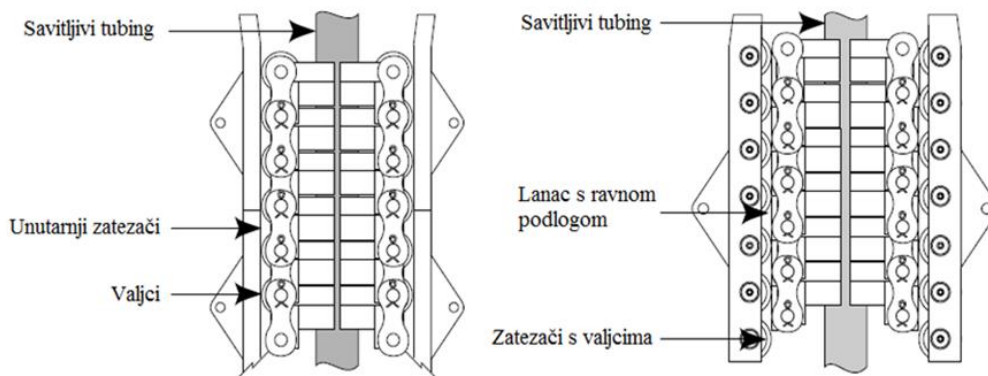
Glava injektora glavna je komponenta jedinice za rad sa savitljivim tubingom (slika 4-14). Ona omogućava utiskivanje ili vađenje savitljivog tubinga u ili iz kanala bušotine. Tubing zahvaćaju posebno oblikovani tarni segmenti koji se nalaze na površini dva suprotno rotirajuća lanca. Injektor koristi silu trenja između tarnih segmenata i tubinga kako bi omogućio kretanje tubinga. Brzina i smjer djelovanja injektora na tubing omogućena su djelovanjem dvaju hidrauličkih motora. Motori svojim radom pokreću rotaciju zupčanika, dok zupčanici prenose svoju rotaciju na lance i tarne segmente. Dostupne su različite konfiguracije s čak do četiri motora koji pokreću gornje i donje zupčanike. Hidraulički protutežni sustav omogućava dinamičko kočenje u slučaju smanjenja hidrauličkog tlaka odnosno kada dolazi do problema u radu hidrauličkog sustava. Mnogi motori injektora imaju ugrađen takav sustav kočnica koje se automatski aktiviraju i zaključavaju smanjenjem hidrauličkog tlaka u motoru. U starijim izvedbama injektora postoje i zasebne kočnice koje se aktiviraju ručno. Važno je cijelo vrijeme održavati točno određenu napetost između rotirajućih lanaca kako bi se izbjegli problemi

kao što su gnječenje tubinga ili njegovo klizanje uslijed premalog trenja s tarnim segmentima tarnih segmenata.



**Slika 4-14.** Injektor (Halliburton, 2015)

Lanci se sastoje od karika, tarnih segmenata i valjkastih ležajeva (slika 4-15). Budući da se cjelokupan teret pridržava djelovanjem sile trenja, materijal od kojega su izrađeni tarni segmenti uvelike utječe na učinkovitost injektora i prevenciju mehaničkih oštećenja tubinga.



**Slika 4-15.** Različite izvedbe lanaca i zatezača u injektorskom sklopu (Schlumberger Dowell, 1995)

„Tarni segmenti izrađeni su na dva načina. Ili u obliku koji obuhvaća poluobod određenog promjera savitljivog tubinga te su prikazani na slici 4-16, ili kao tzv. „V“ blokovi koji omogućuju prihvaćanje savitljivog tubinga različitog promjera s obzirom na odabrani sustav tarnog prijenosa. Postoje i sustavi tarnog prijenosa s izmjenjivim tarnim segmentima gdje se zamjena može obavljati uz vrlo kratak prekid vađenja ili utiskivanja savitljivog tubinga, a tubing tada drže klinovi u preventerskom sklopu.“(Matanović i Moslavac, 2011).

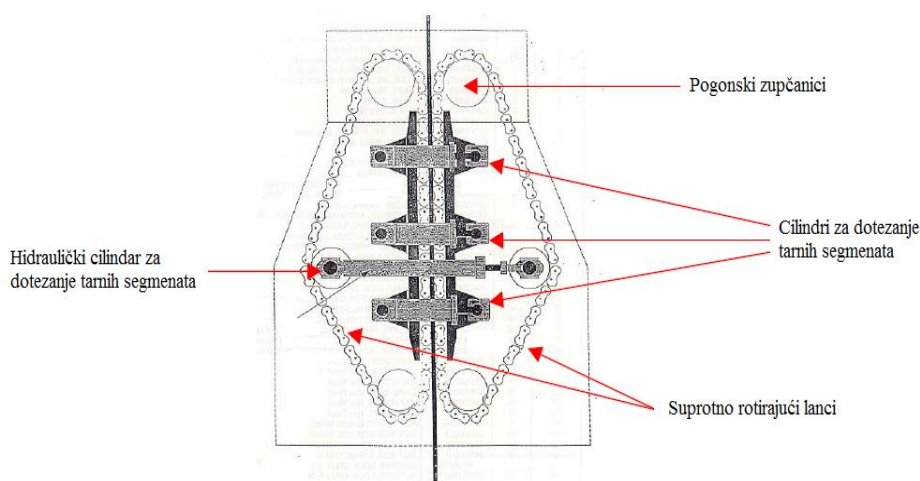
Tarni segmenti koji obuhvaćaju poluobod određenog promjera mogu se koristiti samo za jedan promjer tubinga, no kao takvi imaju prednost u tome što se cjelokupna sila trenja ravnomjerno rasporede po čitavoj površini savitljivog tubinga. Takva pojava uvelike smanjuje rizik od oštećenja tubinga.



**Slika 4-16.** Tarni segmenti za obuhvaćanje određenog promjera (Power Hydraulics Engineering and Manufacturing, 2018)

Druga vrsta tarnih blokova, su spomenuti „V“ tarni blokovi koji obuhvaćaju savitljivi tubing na četiri točke prilikom nasjedanja. Prednost ovakvog dizajna tarnih segmenata je što oni mogu obuhvatiti određeni raspon promjera savitljivog tubinga. Takav dizajn operaterima omogućava veću fleksibilnost prilikom korištenja. Potencijalni nedostatak leži u tome što ovi tarni segmenti u svojim kontaktnim točkama sa savitljivim tubingom djeluju većim tlakom pošto je dodirna površina između segmenata i tubinga manja, a sila zahvata jednaka kao i kod primjene tarnih blokova određenog promjera.

Napredovanjem tubinga u kanal bušotine povećava se opterećenje na lancima injektora što zahtjeva djelovanje veće sile na tarne segmente kako bi održali idealnu silu trenja. To se postiže primjenom hidrauličkih cilindara vezanih na zatezače koji dotežu lance. Takav sustav omogućava kontrolu jediničnog opterećenja na površinu tarnih segmenata (slika 4-17).



**Slika 4-17.** Shema rasporeda zatezača na lancima injektorskog sklopa (BJ Services Tomball, 2005)

#### 4.1.2.2. Vodilica savitljivog tubinga

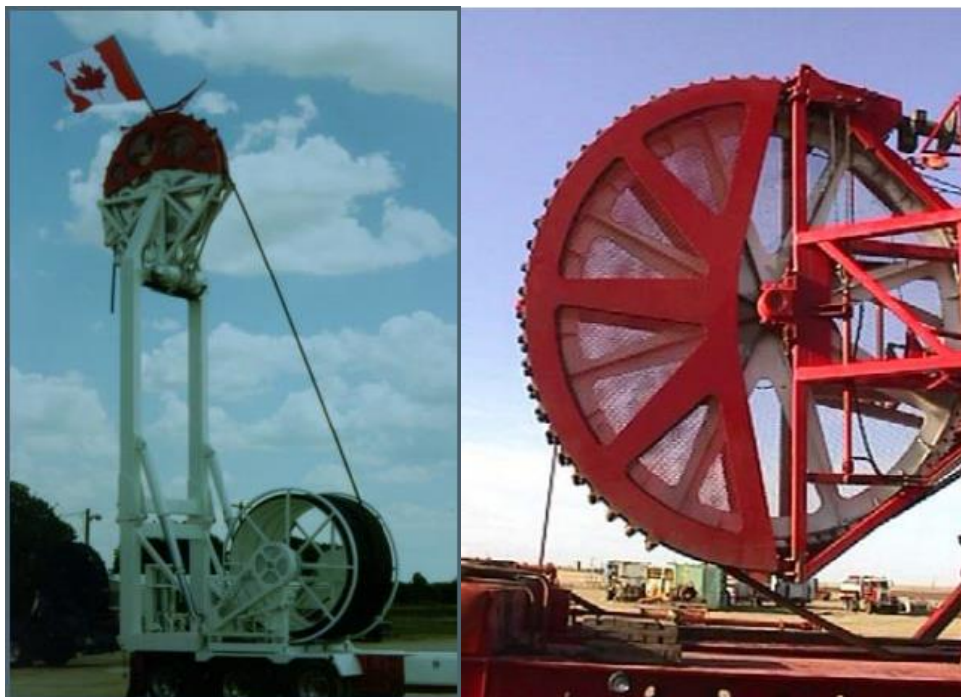
Vodilica savitljivog tubinga, poularno zvana i guskin vrat, ima nekoliko glavnih funkcija kao što su:

- pridržavanje savitljivog tubinga iznad glave injektora,
- osiguravanje kontroliranog radijusa savijanja tubinga u ili iz glave injektora,

- izdržavanje natega bubnja,
- zadržavanje kuta namatanja ili odmatanja savitljivog tubinga s/na bubanj.

Vodilica na svome vrhu ima ugrađene valjke za lakše usmjeravanje tubinga u glavu injektora. Ona podržava savitljivi tubing i djeluje na izravnavanje i usmjeravanje tubinga prilikom njegovog dolaska s bubnja i prolaska u tarne segmente injektora. To se postiže serijskim nizom valjaka i okvira koji usmjeravaju tubing kako on prolazi kroz vodilicu. Baza vodilice usmjerena je prema bubnju te se zakreće od jednog prema drugom kraju bubnja. To omogućava neometano i valjano odmatanje/namatanje s bubnja savitljivog tubinga. Nominalni radijus zakrivljenosti vodilice mora biti minimalno 48 puta veći od vanjskog promjera tubinga kojim se manipulira. Takav radijus omogućava dulji radni vijek savitljivog tubinga i smanjuje mogućnost zamora materijala. Uobičajene dimenzije odnosno radijusi zakrivljenja vodilica iznose: 183 cm, 243cm i 305cm (72", 96" i 120").

Postoji još jedna izvedba vodilice savitljivog tubinga popularno nazvana „*engl. Big wheel*“ (slika 4-18). Takva vodilica ne koristi lance za manipulaciju savitljivim tubingom. Glavni pokretač sustava je žljebasti kotač velikog promjera. Kotač okružuje okvir u kojima se nalaze valjci malog promjera koji omogućavaju kretanje savitljivog tubinga. Sila trenja kojim valjci djeluju na savitljivi tubing osigurava dostatnu silu trenja za njegovo pokretanje po obodu kotača.



**Slika 4-18.** „Big wheel“ sustav (CTES, 2005)

#### *4.1.2.3. Indikator težine*

Indikator težine na postrojenju za rad sa savitljivim tubingom ima mogućnost određivanja vlačnog i tlačnog opterećenja u savitljivom tubingom na razini injektorskog sklopa. Izmjerena vlačna sila funkcija je težine savitljivog tubinga koji je ugrađen u bušotinu pri čemu su u obzir uzete sila uzgona i utjecaj bušotine kao što je npr. geometrija. Indikator također pomaže operateru u otkrivanju nailaska na zapreke u kanalu bušotine što se manifestira na površini naglim naglim povećavanjem ili smanjenjem težine savitljivog tubinga u kanalu bušotine. Postoji nekoliko izvedbi, a to su najčešće hidraulički, elektronički ili kombinacija spomenuta dva. U sustav indikatora uvijek mora biti ugrađen sustav za bilježenje promjene iznosa težine s vremenom. Hidraulički indikator je zapravo elastomerni mjehur ispunjen hidrauličkom tekućinom ili klip unutar cilindra koji je ispunjen hidrauličkim fluidom. Hidraulička cijevčica malog promjera povezuje indikator težine i manometar u kontrolnoj sobi jedinice za rad sa savitljivim tubingom. U nekim jedinicama dodaje se i elektronički indikator težine kako bi se težina mogla prikazivati i spremati u digitalnom obliku. Elektronički indikatori najčešće su mjerni instrumenti za mjerenje narezanja. Mnogi injektori savitljivog tubinga imaju samo jedan indikator težine i to na jednoj od stražnjih nogu injektora. Ako indikator može raditi dvosmjerno, odnosno istovremeno mjeriti tlačna i vlačna opterećenja tubinga, onda on može i točno registrirati sile tijekom spuštanja alatki kroz zatvoreni preventer. Ako se koriste dva indikatora težine tada je jedan indikator uvijek pod tlakom što daje veću reciznost mjerenja. U tom slučaju svaki indikator zasebno mjeri jedan dio axialne sile koja djeluje na savitljivi tubing.

#### *4.1.2.4. Nosač injektora*

Nosač injektora čini okvir ili postolje s teleskopski podesivim nogama ili je u obliku stupa čelične rešetkaste konstrukcije, koji se hidraulički pomiče po visini (sukladno operaciji koja se obavlja i opremi koja se koristi); dok je sam injektor ovješeno o konzolu, koja je pričvršćena za vrh stupa. Nosač injektora je lancima učvršćen za erupcijski uređaj (ušće bušotine), te čeličnim užetom za sidrenu spiralu učvršćenu u tlu.

### 4.1.3. Preventerski sklop

Oprema za kontrolu tlaka u bušotini prilikom rada sa savitljivim tubingom dizajnirana je na taj način kako bi omogućila što lakše intervencije ili operacije dok je sama bušotina pod tlakom. Osnovni dijelovi preventerskog sklopa su preventer automatskog djelovanja (stripper) i nekoliko hidrauličko-mehaničkih preventera.

#### 4.1.3.1. Stripper

Stripper je primarni uređaj za izoliranje ili zadržavanje bušotinskog/ležišnog fluida u kanalu bušotine prilikom korištenja savitljivog tubinga u statičkim ili dinamičkim radnim uvjetima (slika 4-19). Spojen je za donju stranu glave injektora pomoću prirubnice i vijaka. Princip rada je takav da hidraulički tlak djeluje na klip koji svojim kretanjem steže poliuretansku gumu oko savitljivog tubinga, kreirajući tako nepropusnu barijeru. Brtveni elementi stripera smješteni su između setova mjedenih umetaka koji mogu uključivati nerastezljive prstene između umetaka i gume za brtvljenje. Dvije su glavne izvedbe stripera. Konvencionalni stripper je stariji model koji se prvi koristio za operacije koje uključuju upotrebu savitljivog tubinga. Brtveni elementi smješteni su mu između mjedenih umetaka. Klip s dvostrukim djelovanjem pritišće umetke jedan prema drugom kako bi guma brtvila oko savitljivog tubinga.



**Slika 4-19.** Stripper (National Oilwell Varco, 2018e)



Gornja sekcija stripera pričvršćena je pomoću posebnog prijelaza za tijelo injektora. Dizajn omogućava da guma stripera može biti zamijenjena tijekom rada u bušotini skidanjem spomenutog prijelaza na injektor.

Striper s bočnim otvorom dizajniran je na način da omogućava jednostavnu zamjenu brzvenih elemenata kroz bočna vrata ispod spoja sa glavom injektora. Ovim dizajnom, zamjena brtvećih elemenata je pojednostavljena i mnogo sigurnija tijekom trajanja operacija sa savitljivim tubingom. Bočna vrata moraju se prvo otključati, a nakon njihova otvaranja može se pristupiti zamjeni brtvenih elemenata. Postoje dva razloga prekomjernog trošenja gume za brtvljenje, a to su hrđa na savitljivom tubingom i suhi plin. Podmazivanje savitljivog tubinga prije ulaska u striper smanjit će trošenje elemenata. Tubing se može podmazivati na samom bubnju ili na posebnom otvoru za dodavanje inhibitora na striperu. Striper bi se trebao pozicionirati što je bliže moguće lancima na dnu injektora kako bi se izbjeglo izvijanje tubinga prilikom spuštanja u kanal bušotine. To se obično ostvaruje dodavanjem umetka za sprječavanje izvijanja koji smanjuje razmak između stripera i injektora na približno 10 cm (4“).

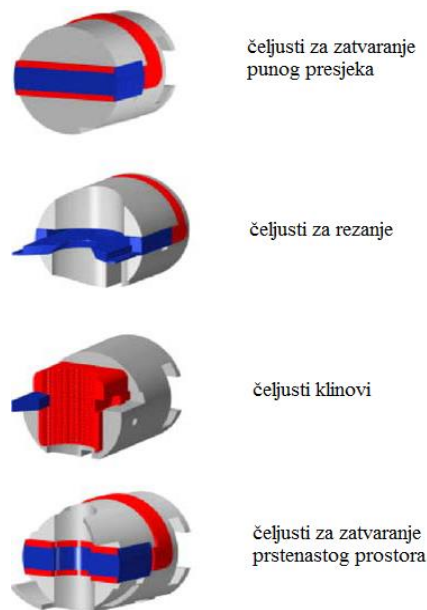
#### *4.1.3.2. Hidrauličko mehanički preventerski sklop (BOP's)*

Preventerski sklop je primarni sigurnosni uređaj dizajniran za sprečavanje nekontroliranog dotoka ugljikovodika iz bušotine i obično se spaja prirubnicom na ušće bušotine. Savitljivi tubing koristi posebno dizajnirani preventerski sustav u odnosu na konvencionalni tubing. Sustav se sastoji od nekoliko čeljusti prikazanih na slici 4-20 od kojih svaka ima određenu funkciju:

- a) čeljusti za zatvaranje punog presjeka - zatvaraju i izoliraju kanal bušotine kada u njemu nije prisutan tubing. Dizajn ovih čeljusti uključuje sustav zaključavanja koji pri tome koristi i tlak u bušotini kako bi ga zadržao zaključanim jednom kada je aktiviran. Budući da čeljusti pružaju potpunu izolaciju potrebno je prije otvaranja izjednačiti tlak iznad i ispod čeljusti;
- b) čeljusti za rezanje - imaju oštrice za rezanje tubinga ili žice. Takva potreba može se pojaviti iz raznih razloga, no najčešće su sigurnosne prirode. Kada je tubing odrezan on se izvlači iz preventera kako bi se mogle zatvoriti čeljusti za puni profil.

U „combi“ izvedbama čeljusti za puni profil služe i kao čeljusti za rezanje. U slučaju kada se takve čeljusti žele koristiti za rezanje tubinga, tu dodantu silu za rezanje omogućava im cilindar spojen na čeljusti. Aktivacijom cilindra dolazi do pomicanja klipa te primjene veće sile na tubing te naposljetku do njegovog rezanja. Koriste se za tubinge većeg promjera ili velike debljine stijenke.

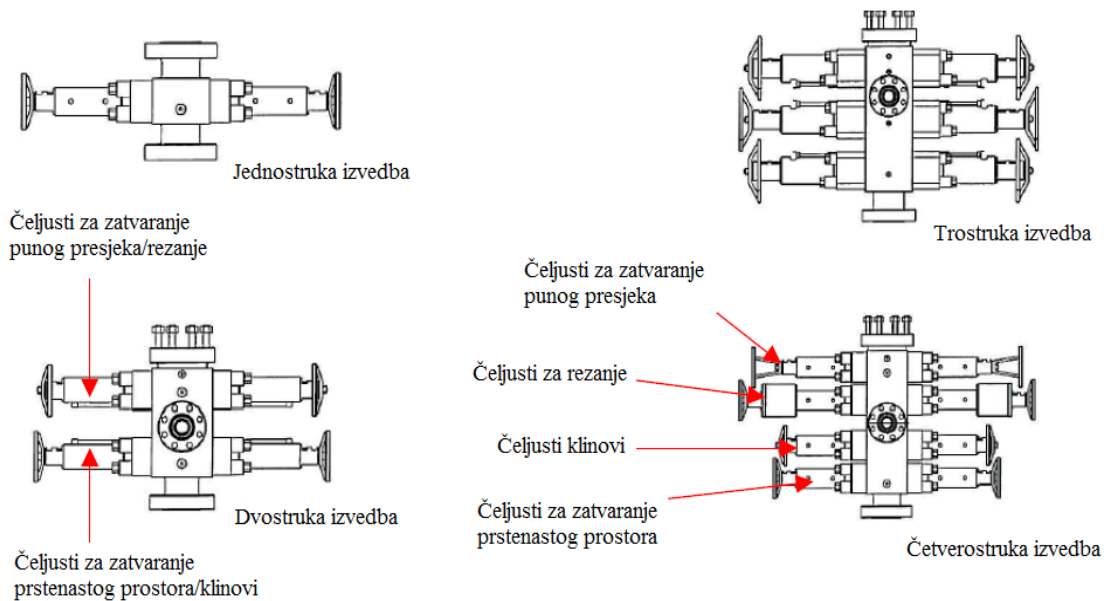
- c) čeljusti klinovi - zadržavaju tubing i sprječavaju njegovo kretanje u oba smjera pomoću čeličnih inserata koji su oblikovani za prihvat tubinga;
- d) čeljusti za zatvaranje prstenastog prostora - brtve prostor oko savitljivog tubinga i kontroliraju tlak u bušotini. U „Combi“ izvedbi preventera, čeljusti za zatvaranje prstenastog prostora i klinovi spojene su u jednu konfiguraciju. Broj i vrsta čeljusti u sastavu preventera određen je njihovom izvedbom a postoje: jednostruka, dvostruka, trostruka i četverostruka izvedba (slika 4-21) (BJ Services Tomball, 2005).



**Slika 4-20.** Čeljusti preventerskog sklopa (Baker Hughes, 2003)

Minimalni tlak za nove preventere iznosi 68,947 kPa (10 000 psi), a radni tlak 103,421 kPa (15000 psi). Četverostruka izvedba preventera ima dva priključka za izjednačavanje tlaka, po jedan koji djeluje na svaku čeljust posebno. Njihova uloga je izjednačiti djelovanje tlaka koji djeluje na lice čeljusti. Ova izvedba ima poseban vod između čeljusti za rezanje i klinova kako bi omogućila gušenje bušotine ili utiskivanje

fluida ako je to potrebno. Vod se koristi samo u iznimnim slučajevima i ne koristi se za standardnu cirkulaciju fluida. Njima se upravlja hidraulički iz kontrolne sobe pomoću hidrauličkog sklopa i akumulatora. Akumulator osigurava rezervu hidrauličke energije kako bi omogućio normalan rad preventerskog sklopa ograničen broj puta u slučaju gašenja motora ili kvara u strujnom krugu (BJ Services Tomball, 2005).



**Slika 4-21. Različite izvedbe preventerskog sklopa na postrojenju za rad sa savitljivim tubingom (BJ Services Tomball, 2005)**

#### 4.1.4. Pogonsko hidraulički regulacijski sklop

Ovaj sklop sastoji se od pogonskog stroja, hidrauličkih sisaljki, te kontrolne kabine koja upravlja radom bubnja, injektora i preventera (slika 4-22).



**Slika 4-22.** Pogonsko hidraulički regulacijski sklop (National Oilwell Varco, 2018f)

#### *4.1.4.1. Motor*

Najčešća pogonska jedinica je dizelski motor smješten na prikolicu ili u skid izvedbi. Sastoji se od hidrauličkih pumpi, regulatora hidrauličkog tlaka, hidrauličkih spremnika i akumulatora kako bi se omogućio učinkovit rad jedinice savitljivog tubinga. Dizajn pogonskih jedinica uvelike ovisi o prirodnom okruženju u kojima će se operacije izvoditi.

#### *4.1.4.2. Hidrauličke sisaljke*

Postoji mnogo vrsta i modela hidrauličkih pumpi. Pumpa koja se gotovo u pravilu koristi je krilna pumpa, jednoradna ili dvoradna.

#### *4.1.4.3. Ventili za kontrolu tlaka*

Obavljaju funkcije kao što su ograničavanje maksimalnog tlaka u sustavu ili regulacija tlaka (u pravilu smanjenja) potrebnog za pojedine dijelove sustava. Rasteretni ventil nalazi se u svakom sustavu i njegova je funkcija ograničavanje maksimalnog tlak na način da preusmjerava hidraulički fluid iz sustava u spremnik i time smanjuje radni tlak.

#### *4.1.4.4. Spremnik hidrauličkog fluida*

Zadaća mu je da skladišti hidraulički fluid, osigurava njegovo hlađenje, ispušta zraka ako je slučajno ušao u sustav te omogućava sedimentaciju bilo kakvih nečistoća.

#### *4.1.4.5. Filteri i cjedila*

Njihovom uporabom fluid se kontinuirano pročišćava tijekom cirkulacije u sustavu. Cjedila se smještaju na usisnu stranu sustava na dno rezervoara. S druge strane filteri se mogu smjestiti bilo gdje u sustav. Prema tome filteri se odabiru s obzirom na iznos tlaka kojeg moraju izdržati u sustavu.

#### *4.1.4.6. Izmjenjivači topline*

Višak toplinske energije učestali je problem u hidrauličkom sustavu. Izmjenjivači topline dizajnirani su da hlade fluid, no u nekim okruženjima može biti potrebno zagrijati fluid. U hladnim područjima potrebno je ulje visoke viskoznosti koje se koristi u hidrauličkom pogonskom sustavu postrojenja za rad sa savitljivim tubingom, zagrijavati kako bi smanjila viskoznost. Izmjenjivač može koristiti zrak kao sredstvo za hlađenje, dok se u najvećem broju slučajeva koristi voda za hlađenje ili grijanje fluida.

#### *4.1.4.7. Hidraulički fluid*

Fluid ima četiri osnovne zadaće, a to su: prenošenje snage, podmazivanje pokretnih dijelova, brtvljenje prostor između određenih dijelova opreme te hlađenje opreme. Odabir fluida koji će se koristiti prilikom operacija također ovisi o prirodnom i radnom okruženju u kojem se koristi (Schlumberger Dowell, 1995).

#### 4.1.4.8. Kontrolna kabina

Omogućava potpunu kontrolu nad svim operacijama vezanim uz primjenu postrojenja za rad sa savitljivim tubingom. Obično je smještena na povišeno postolje kako bi operater imao bolji pregled. U svom sastavu sadrži: komande za rad s injektorom, bubnjem i preventerskim sustavom, indikator hidrauličkog tlaka u sustavu, indikator težine, indikator tlaka unutar savitljivog tubinga, indikator tlaka na ušću bušotine, jedinicu za prikupljanje podataka te komande za urapvljanje pogonskom jedinicom (slika 4-23). Kabina treba biti opremljena za rad u svim vremenskim uvjetima pa bi tako trebala sadržavati klimu za rad u toplim krajevima te sustav grijanja za rad u hladnim krajevima. Sva potrebna crijeva za rad i kontrolu injektora, preventerskog sklopa, pogonskog sklopa i bubnja savitljivog tubinga nalaze se ispred kabine na posebnom bubnju. Samo je ovlaštenom osoblju omogućen pristup i manipulacija komandama u kabini postrojenja za rad sa savitljivim tubingom.



**Slika 4-23.** Kontrolna kabina postrojenja za rad sa savitljivim tubingom (Consolidated Rig Works, 2018)

## **5. PRIMJENA SAVITLJIVOG TUBINGA U OPERACIJAMA OPREMANJA I ODRŽAVANJA BUŠOTINA**

### **5.1. Pročišćavanje i ispiranje kanala bušotine**

Savitljivi tubing se od početka svoje primjene u naftnoj industriji primarno koristio za operacije u kojima je bilo potrebno pročistiti kanal eksploatacijske bušotine od nataloženih čestica koje su se akumulirale tijekom određenog perioda pridobivanja ugljikovodika na određenoj bušotini. Osnovni razlog zbog čega je potrebno pristupiti ovakvim operacijama je poboljšanje proizvodnosti bušotine. Nakupljanje čestica predstavlja osobit problem u otklonjenim i horizontalnim bušotinama stoga se savitljivi tubing najčešće primjenjivao baš u ovakvim slučajevima. Glavni ciljevi uklanjanja istaloženih čestica iz kanala bušotine su:

- ponovno uspostavljanje proizvodnih mogućnosti bušotine;
- omogućavanje neometanog prolazka opreme na žici i drugih servisnih alata;
- omogućavanje rada uređaja za kontrolu cirkulacije na dnu niza (dubinskih sapnica, kliznih vrata i dr.);
- održavanje prostora ispod perforiranog intervala čistim kako bi se omogućio nesmetan prolazak cjelokupnog niza za opremanje bušotine;
- uklanjanje materijala koji bi mogao u budućnosti utjecati na buduće radove na opremanju i održavanju bušotina.

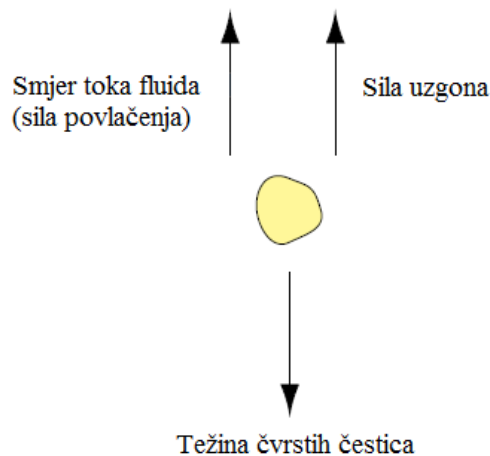
Prilikom osmišljavanja načina uklanjanja nataloženih čestica potrebno je otkriti mjesto njegovog utoka u kanala bušotine. Kod njihovog uklanjanja potrebno je izvršiti dvije temeljne zadaće ta, prva se odnosi na odabir samog načina uklanjanja dok se druga odnosi na sprječavanje ponovnog nakupljanja pijeska na tom istom mjestu. Istaložene čestice mogu biti različitog porijekla, a najčešće se radi o pijesku i druge čestice iz formacije, propantu utisnutom prilikom frakturiranja sloja i česticama nastalim raspadom pješčanog zasipa. Kako bi se lakše pristupilo odabiru primjerenog načina uklanjanja pijesaka i drugih istaloženih čestica u kanalu bušotine i odabiru alata za njegovo uklanjanje, pijesak i ostali nataloženi materijal je podijeljen u tri skupine:

- čestice veoma malog promjera,
- nekonsolidirane čestice,

- konsolidirane čestice.

U većini slučajeva uklanjanje čestica iz bušotine pomoću savitljivog tubinga jedina je primjenjiva opcija. Sposobnost održavanja neprestane cirkulacije kroz savitljivi tubing uz istovremenu kontrolu tlaka u bušotini smanjuje moguće pojave različitih problema Ipko ni se mogli odraziti na buduće davanje bušotine. Princip uklanjanja čestica temelji se na cirkulaciji fluida kroz savitljivi tubing te mlaznicu na vrhu niza koja na taj način polagano odnose nataložene čvrste čestice. Tok fluida u svoju struju zahvaća pojedine čestice te se one kreću u istom smjeru kao i fluid, a to znači da se usmjeravaju u prstenasti prostor između vanjske stijenke savitljivog tubinga i unutarnje stijenke proizvodnog niza (Schlumberger Dowell, 1995). Presudni faktor u primjeni ovog načina čišćenja kanala bušotine od nataloženih čestica je izračun brzine protoka fluida u prstenastom prostoru koja mora biti veća od brzine taloženja čestica u samom kanalu (slika 5-1).

Sile koje djeluju na čvrste čestice tijekom pročišćavanja bušotine



**Slika 5-1.** Sile koje djeluju na kretanje čvrstih čestica tijekom ispiranja kanala bušotine (Schlumberger Dowell, 1995)

Drugi princip rješavanja ovakve vrste problema je reverzna cirkulacija. Kako samo ime kaže radi se o utiskivanju fluida obrnutim redoslijedom, kroz prstenasti prostor savitljivog tubinga i proizvodnog niza u savitljivi tubing. Ovakav način pogodan je za uklanjanje velike količine čvrstih čestica različitog porijekla. Važno je napomenuti da se ova metoda može primijeniti samo na ugušenim bušotinama. Treći način primjene

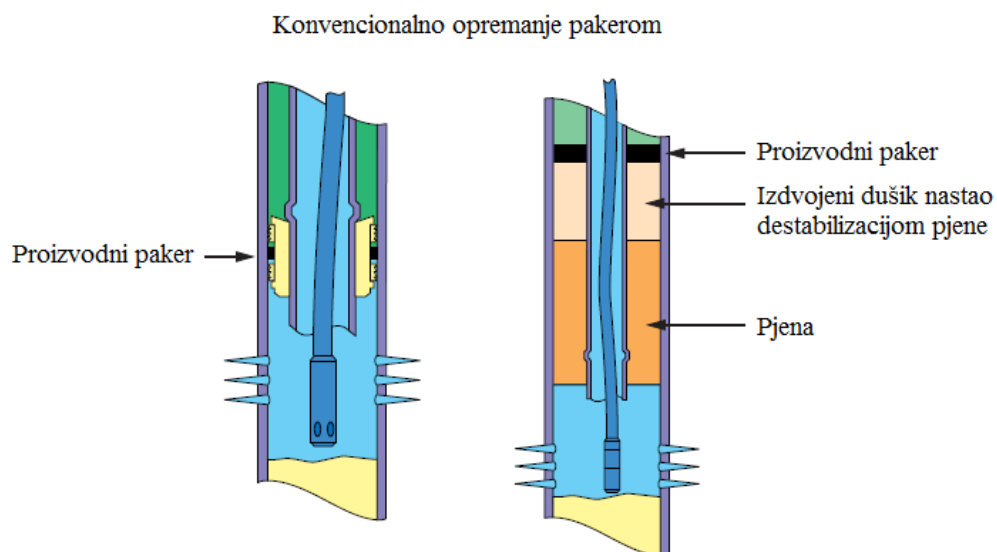


savitljivog tubinga za čišćenje kanala bušotine podrazumijeva uporabu koncentričnog savitljivog tubinga u kombinaciji s mlaznom crpkom kojom se nastoje usisati čvrste čestice istaložene na dnu bušotine. Radni fluid protječe kroz unutarnji niz savitljivog tubinga te izlazi kroz mlaznu crpku, zahvaća i podiže čvrste čestice te ih iznosi prema površini kroz prstenasti prostor između unutarnje i vanjske stijenke savitljivog tubinga. Ova metoda također se može primjenjivati samo na ugušenim bušotinama, a najčešće se koristi u bušotinama s malim ležišnim tlakom. U razmatranju čišćenja bušotina osim mehaničkih moraju se spomenuti i kemijske metode. One se najčešće koriste kao pomoć mehaničkim metodama ako je to moguće. Najčešće se ne pristupa takvim rješenjima zbog niske topljivosti samih čvrstih čestica pa takav pristup čišćenju jednostavno nije isplativ dok mehanički pristup jednostavno zahtjeva cirkulaciju i nekoliko dijelova opreme kao što su dubinski motor i mlazna crpka.

#### 5.1.1. Projektiranje čišćenja kanala bušotine od nataloženih čvrstih čestica

Prilikom odabira odgovarajućeg načina čišćenja kanala moraju se uzeti u obzir neke bitne fizikalne i kemijske karakteristike ležišta kao što su: ležišni tlak, ležišna temperatura i osjetljivost formacije na određene fluide. Ležišni tlak je najvažnija karakteristika koju treba uzeti u obzir. Potrebno je znati točan tlak na dnu bušotine kako bi se izračunala pravilna cirkulacija fluida koja će omogućiti iznošenje čvrstih čestica, a da pri tome neće doći do frakturiranja sloj. U idealnim uvjetima hidrostatski stupac fluida u prstenastom prostoru plus sila trenja uslijed protjecanja trebaju kontrolirati tlak na dnu bušotine. Moguće je primijeniti i dodatni tlak na dno uporabom voda za prigušivanje na površini. U slučaju da je ležišni tlak manji nego što bi ga ostvario stupac fluida u kanalu bušotine moguća je primjena drugačijih vrsta fluida kao što su: pjena, fluidi obogaćeni dušikom, a moguća je cirkulacija čepova dušika ili nekih drugih fluida. Temperatura fluida za ispiranje u određuje se pomoću statičke temperature na dnu bušotine (*engl. bottom hole static temperature - BHST*) kako bi se moglo dalje pristupiti projektiranju. BHST se odnosi na temperaturu na dnu bušotine u statičkim uvjetima, a ta temperatura se uobičajeno uzima kao temperatura sloja 24 sata nakon prestanka bilo kakvih operacija. Poznavanje temperature od osobite je važnosti prilikom korištenja pjene ili čepova dušika. Također temperatura utječe na neka fizikalna svojstva fluida za ispiranje kao što su reologija i gustoća. Za kraj bitno je spomenuti da su određene formacije osjetljive na određene fluide

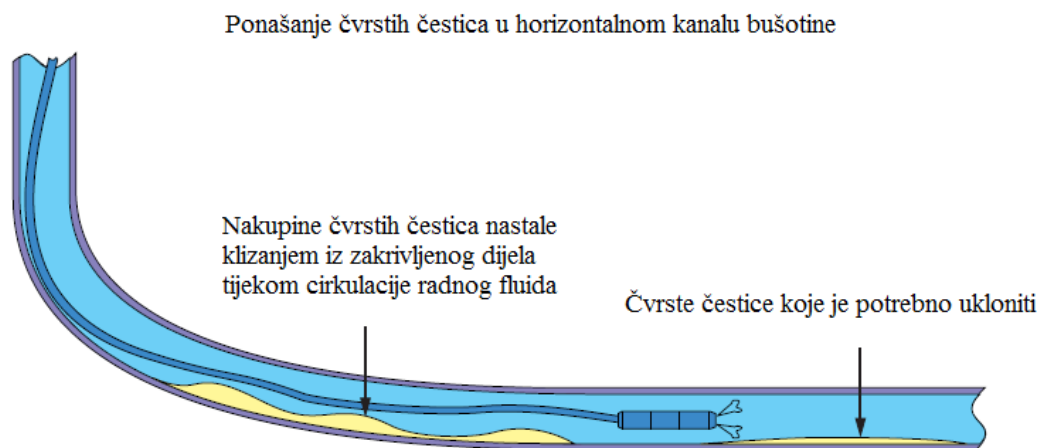
što može dovesti do promjene njihova vlastita karakteristika. Geometrijske karakteristike su još jedan razlog zbog koje je savitljivi tubing uzet u primjenu. Promjer zaštitnih cijevi točnije njihov unutarnji promjer određuje maksimalni vanjski promjer savitljivog tubinga i dubinskog sklopa alata. Zaštitne cijevi velikog unutarnjeg promjera predstavljaju problem konvencionalnom načinu ispiranja bušotina pomoću savitljivog tubinga zbog velikog zazora između zaštitnih cijevi i savitljivog tubinga položenog kroz njih. Zbog toga potrebna je veća brzina dobave crpke te brzina protjecanja fluida u prstenastom prostoru. Neka od geometrijskih ograničenja mogu onemogućavati prolazak alata ili biti moguća mjesta nastanka korozije. U bušotinama čiji je unutarnji promjer zaštitnih cijevi veoma malen može također doći do problema zbog velikog pada tlaka u prstenastom prostoru za željenu dobavu. To rezultira smanjenom brzinom iznošenja čestica te metoda postaje neučinkovita. Bušotine s aktivirani proizvodnim pakerom mogu sadržavati značajne količine ugljikovodika u prstenastom prostoru. Iskustveno poznavajući takve pojave treba biti pažljiv prilikom projektiranja novih operacija jer će u slučaju primjenu pjene u bušotini doći do njene destabilizacije i izdvajanja dušika (slika 5-2).



**Slika 5-2.** Primjer destabilizacije fluida uslijed reakcije s ugljikovodicima (Schlumberger Dowell, 1995)

Geometrija kosih i horizontalnih bušotina mora se posebno uzeti u obzir. Tijekom pridobivanja ugljikovodika i remontnih radova čvrste čestice se mogu vrlo brzo istaložiti na donju stijenku kanala bušotine. Jednom kada se čvrste čestice istalože teško ih je

ponovno okrenuti i uključiti u tok fluida. U određenim slučajevima brzina toka fluida može krhotine iznositi iz horizontalnog dijela no ne može ih transportirati kroz dio otklonjenog i vertikalnu dionicu kanala bušotine. U zakrivljenim dijelovima najčešće pod kutevima od  $30^\circ$  i  $60^\circ$  gravitacija osobito dolazi do izražaja i krhotine se počinju akumulirati na stijenkama i ponovno klizati u horizontalni dio kanala bušotine (slika 5-3). U ovakvim slučajevima turbulentni tok će pospješiti iznošenje krhotina iz horizontalnog dijela. Ipak stanje turbulentnog toka u mnogim slučajevima nije moguće postići zbog ograničenja savitljivog tubinga u vidu dobave i tlaka ili unutarnjeg promjera proizvodnog niza. Kako bi se takva ograničenja kompenzirala najčešće se pristupa modificiranju reoloških svojstava korištenog fluida. U konvencionalnim operacijama čišćenja kanala brzina toka fluida dostatna za iznošenje krhotina može se postići utiskivanjem čepova dušika zajedno s radnim fluidom. U takvim slučajevima fluid mora biti u mogućnosti dostići turbulentni režim protjecanja za relativno male dobave (Schlumberger Dowell, 1995).



**Slika 5-3.** Ponašanje čvrstih čestica u horizontalnom dijelu kanala bušotine (Schlumberger Dowell, 1995)

Kako bi se unaprijedila učinkovitost čišćenja kanala bušotine od nataloženih čestica moraju biti poznata njihova fizikalna svojstva. Najčešće se to postiže analiziranjem uzorkovanih čvrstih čestica iz konkretne bušotine. Pošto su krhotine u uzorku različite veličine za proračune se uzima ona najvećih uočenih dimenzija. Ako ipak nije mogući uzeti uzorak iz nekog razloga onda se uzimaju pretpostavke i saznanja s neke od obližnjih bušotina ako postoje. Najbitnije je poznavanje veličine čvrstih čestica i njihove gustoće. Kao što je već spomenuto brzina taloženja čestica mora biti manja od brzine toka fluida.

Brzina taloženja čvrstih čestica ovisi o veličini, obliku i gustoći čvrstih čestica zajedno sa svojstvima fluida. Determiniraju se još i mjesto taloženja čvrstih čestica, topivost, konsolidacija te se procjenjuje njihov ukupan volumen.

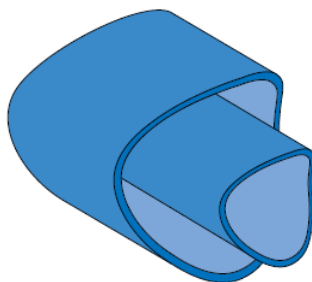
### 5.1.2. Reverzna cirkulacija

Zbog relativno male površine protjecanja unutar savitljivog tubinga i velikog pada tlaka uslijed trenja u nizu, kontrola količine čvrstih čestica koje se iznose u određenom vremenskom periodu kritičan je faktor. Malo povećanje udjela čvrstih čestica u struji fluida u određenom trenutku imaju veliki utjecaj na pad tlaka uslijed trenja što se posljedično odražava i na tlak pumpe. Stoga je potrebno obratiti posebnu pozornost na viskoznost radnog fluida jer on u konačnici može odrediti radne uvjete pumpe. Kada pumpa ostvari maksimalno dozvoljenu dobavu te se uzme u obzir pad tlaka uslijed trenja u prstenastom prostoru između savitljivog tubinga i zaštitnih cijevi te pad tlaka unutar savitljivog tubinga, dobit će se uvjeti maksimalne brzine protjecanja fluida. Kako reverzna cirkulacija znači da se krhotine iznose kroz niz savitljivog tubinga na površinu uvijek postoji opasnost od čepljenja niza. Brzina strujanja fluida mora biti dostatna kako ne bi dolazilo do taloženja krhotina u namotajima savitljivog tubinga na bubnju (CTES, 2005)

### 5.1.3. Koncentrični savitljivi tubing

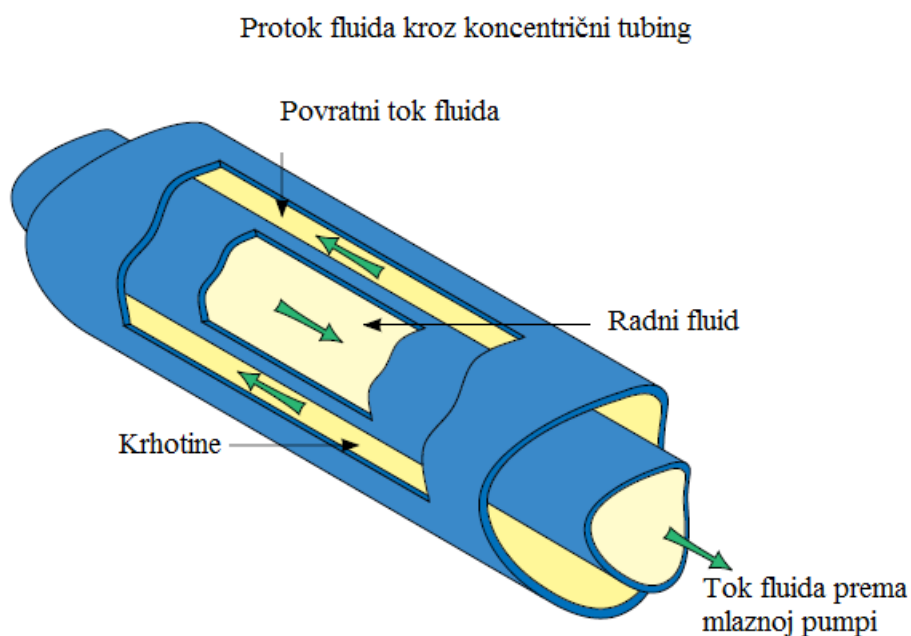
Primjena ovakve izvedbe tubinga najčešće je kod uklanjanja nataloženih čvrstih čestica iz horizontalnog dijela kanala bušotine. Koncentrični savitljivi tubing sastoji se od dva tubinga različitoga promjera kao što je prikazano na slici 5-4.

Koncentrični savitljivi tubing



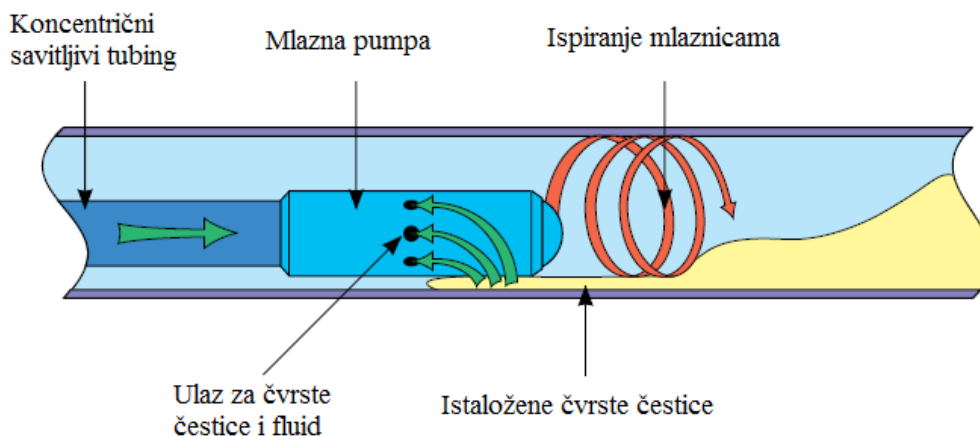
**Slika 5-4.** Presjek koncentričnog savitljivog tubinga (CTES, 2005)

U sastavu alata uvijek se nalazi mlazna pumpa koju pokreće radni fluid koji protječe kroz unutarnji niz prema dnu bušotine. Radni fluid, ležišni fluid i čvrste čestice vraćaju se na površinu kroz prstenasti prostor između dviju stijenki savitljivog tubinga (slika5-5). Postoji mnogo fluida primjerenih za pogon mlazne pumpe. Slojna voda iz ležišta najprimjerenija je za uporabu iz više razloga: niski troškovi, ne oštećuje ležišnu stijenu, niska viskoznost, jednostavnosti postizanja turbulentnog režima protjecanja te zbog brzina taloženja čvrstih čestica u površinskoj opremi.



**Slika 5-5.** Tok fluida kroz koncentrični savitljivi tubing (CTES, 2005)

Pumpa je kreirana na način da optimira usisni volumen fluida i tlak, na temelju količine fluida koji se nalazi u nizu savitljivog tubinga. Prednja mlaznica zajedno s bočnim mlaznicama osigurava turbulentni protok za pokretanje istaloženih čvrstih čestica prije njihovog ulaska u usisne otvore (slika5-6). Sama pumpa nema unutarnjih pokretnih dijelova. U prstenastom prostoru brzina protjecanja fluida dostatna je kako ne bi došlo do ponovnog taloženja čestica unutar niza. Uporaba koncentričnog savitljivog tubinga omogućava da se čišćenje kanala odvija prilikom spuštanja alata na dno i tijekom njegovog vađenja (CTES, 2005).



**Slika 5-6.** Djelovanje mlazne pumpe s mlaznicama (CTES, 2005)

#### 5.1.4. Ispiranje pomoću mlaznice

Ova metoda (*engl. jetting*) na jednostavan i učinkovit način pomaže uklanjanju nataloženih čvrstih čestica u kanalu. Ovaj način pročišćavanja kanala bušotine u velikom broju slučajeva koristi ispiranje pri malom padu tlaku kroz mlaznice ili prijelaze za ispiranje. Ispiranje pri malom padu tlaka kroz mlaznicu ima minimalan učinak na brzinu fluida u prstenastom prostoru. U nekim slučajevima primjenjuje se i visoki pad tlaka, a on je pogodan za čišćenje zbijenih naslaga čvrstih čestica. Mora se uzeti u obzir da veliki pad tlaka nakon izlaska fluida iz mlaznice uzrokuje i smanjenje brzine fluida u prstenastom prostoru što dovodi do mogućnosti ponovnog taloženja čestica. Prijelaz za ispiranje mora biti dizajniran na način da osigura kvalitetno ispiranje i dostatan obuhvat stijenki zaštitnih cijevi ili kanala bušotine. Upotrebnom rotirajućih mlaznica moguće je poboljšati obuhvat i optimirati proces uklanjanja čvrstih čestica. Ova metoda čišćenja kanala bušotine od nataloženih čvrstih čestica ima jedan nedostatak, a on se odnosi na postojanje većih čestica koje posljedično brzina strujanja fluida ne može pokrenuti s dna.

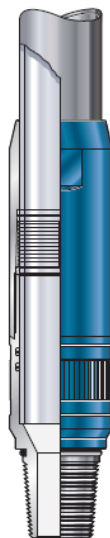
##### 5.1.4.1. Sastav alata

Sklop dubinskih alatki koji se koristi za čišćenje kanala bušotine od nataloženih čvrstih čestica treba sadržavati slijedeće dijelove:

- a) spojnicu savitljivog tubinga,

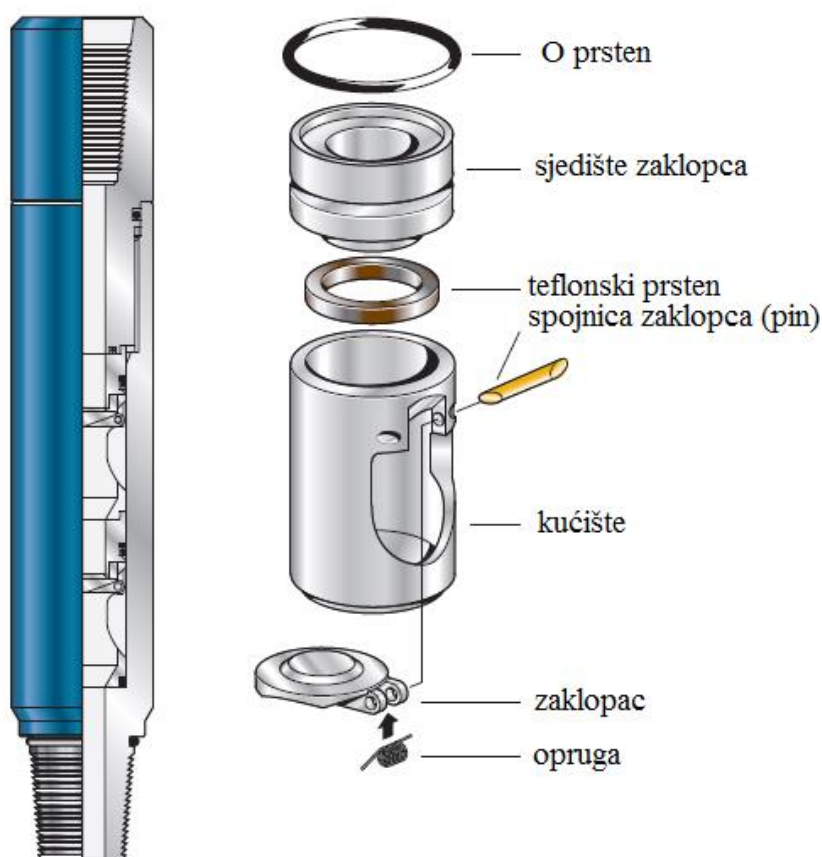
- b) dvostruki sigurnosni ventil,
- c) ravnu šipku,
- d) prijelaz za ispiranje s mlaznicama.

Postoje razni proizvođači opreme koji nude niz različitih rješenja kroz različiti sastav dubinske opreme na savitljivom tubingom, te će ovdje biti ponuđena neka od njih s preporukom sastava alata i njihovim karakteristikama. Prvi sastav alata dolazi od tvrtke *NOV coiled tubing tools* koja je specijalizirana za izradu alatki specijalnih dubinskih alatki koje se koriste u kombinaciji sa savitljivim tubingom prilikom operacija bušenja, te opremanja i održavanja bušotina. Početak dubinskog sklopa niza savitljivog tubinga započeo bi se primjenom spojnice malog promjera s vanjskim klinovima (*engl. Slimconnect External Slip Connector*) koja služi kao kruta veza koja spaja niz savitljivog tubinga s ostatkom sklopa dubinskih alatki (slika 5-7). U ženski dio spojnice spaja se niz savitljivog tubinga preko posebno dizajniranih klinova dok se ostale alatke spajaju na muški navojni spoj na dnu alatke. Ovakva vrsta spojnice ima vanjski promjer manji od standardnih spojnica te time omogućava njenu primjenu u operacijama gdje postoje ograničenja za prolazak standardne opreme koja se koristi u radu sa savitljivim tubingom. Spajanje s nizom savitljivog tubinga ostvaruje se primjenom spiralnih klinova koji se nalaze unutar ženskog dijela spojnice i priliježu uz vanjsku površinu savitljivog tubinga, pri čemu veća vlačna sila povećava uklinjenje. Hermetičnost spoja spojnice i savitljivog tubinga osigurana je primjenom „O“ prstenova



**Slika 5-7.** Spojnica savitljivog tubinga s vanjskim klinovima (National Oilwell Varco, 2016)

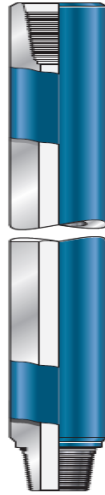
Sljedeća alatka u nizu bila bi dvostruki sigurnosni (protupovratni) ventil koja je standardna u bilo kojem sastavu alata kada je riječ o savitljivom tubing. Kao što mu samo ime kaže u jednoj alatki nalaze se dva ventila koji sprječavaju povratni tok fluida u savitljivi tubing (slika 5-8). Ventil se sastoji od O prstena, zaklopca te njegovog sjedišta. Tijekom cirkuliranja fluida prema dnu niza tlak djeluje na zaklopac i oprugu koja ga drži u zatvorenom položaju te se zaklopac otvara i omogućava nesmetan protok fluida. U slučaju da se fluid počne kretati kroz alatke prema vrhu niza on svojim protokom pomiče zaklopac prema gore te ga automatski zatvara. Prostor za protjecanje u ventilima omogućava prolazak kuglica i čepova u slučaju da je potrebno aktivirati neke od dijelova opreme koji se nalaze niže u nizu dubinske opreme. Prednosti ove alatke su: neometan protok kroz alatku prema dnu bušotine, dvostruka barijera zaštite uslijed djelovanja 2 protupovratna ventila, omogućava prolazak kuglica i čepova, a sklop jednog i drugog ventila lako se može zamijeniti (National Oilwell Varco, 2016).



**Slika 5-8.** Dvostruki protupovratni ventil (National Oilwell Varco, 2016)

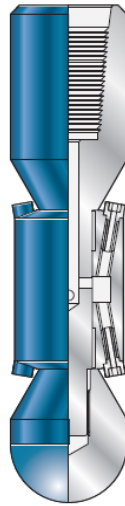


Nakon sigurnosnog ventila u niz dolazi ravna cijev (*engl. Sraight bar*) koja je prikazana na slici 5-9. Ona omogućava produljenje sklopa alatki na željenu duljinu te na taj način osigurava dovoljni prostora unutar dubinskog sklopa za smještanje različite opreme koja se ugrađuje u sami dubinski sklop bez bojazni od utjecaja na protok i alatke koje se aktiviraju hidraulički. (National Oilwell Varco, 2016).



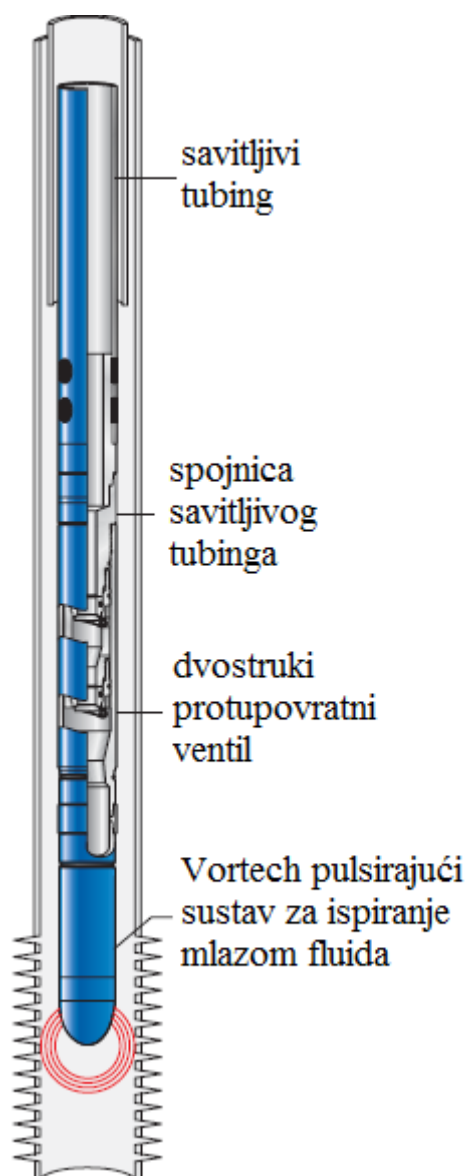
**Slika 5-9.** Ravna cijev (National Oilwell Varco, 2016)

Glavna i zadnja komponenta niza dubinskih alatki bila bi jedna od izvedbi alatka za ispiranje s mlaznicama prikazana na slici 5-10 (*engl. Rotary jet wash tool*). Ova alatka je dizajnirana za ispiranje kanala i ostvarivanje cirkulacije unutar zacijevljenog dijela kanala bušotine. Zbog smještaja mlaznica može uvelike olakšati kretanje čitavog niza u ili iz bušotine. Dizajn same alatke omogućava rotaciju mlaznica oko osi za 360<sup>0</sup> što omogućava direktno usmjeravanje mlaza po čitavoj površini kanala bušotine i uklanjanje svih nataloženih čvrstih čestica. Različito postavljenim mlaznicama omogućeno je i ispiranje kanala u oba smjera što omogućava pročišćavanje kanala od nataloženih čestica i tijekomspuštanja i tijekom podizanja niza (National Oilwell Varco, 2016).



**Slika 5-10.** Alatka za ispiranje s mlaznicama (National Oilwell Varco, 2016)

Tvrtka Baker Hughes nudi slična rješenja za čišćenje kanala no i drugačije pristupe u rješavanju istih. Kao primjer uzet je njihov Vortech pulsirajući sustav za ispiranje mlazom fluida (*engl. Vortech pulsating jetting tool*) prikazan na slici 5-11. Ova izvedba alatke za ispiranje i čišćenje kanala bušotine od nataloženih čvrstih čestica čisti kanal bušotine na principu oscilacija (pulsacije) u cirkulaciji radnog fluida. Unutar same alatke nastaje vrtlog koji stvara oscilirajuće impulse. Ovakvi impulsi stvaraju zvučne valove koji imaju daleko veći efektivni doseg od običnih mlaznica. Alatka omogućava čišćenje zahtjevnih dijelova kanala bušotine i opreme kao što su sita za sprječavanje dotoka pijeska, vretena plinskog lifta i klizni rukavci i to sve zahvaljujući velikom radijusu djelovanja ranije spomenutog vrtložnog protjecanja radnog fluida. Glavne prednosti ove alatke su to što nema pokretnih dijelova, može pulsirati bilo koji fluid, plin ili mješavinu oba, a rasprostiranje zvučnih valova nije ograničeno geometrijom korištenih alatki.



**Slika 5-11.** Pulsirajući niz za ispiranje kanala bušotine (Baker Hughes, 2003)

Ovaj sastav alata koristio se na području Teksasa za uklanjanje taloga barijevog sulfata iz proizvodnog niza i perforiranih intervala plinskih bušotina gdje su ostali pokušaji čišćenja kanala bili neuspješni. Davanje bušotine postepeno se smanjivalo do 3 970 m<sup>3</sup>/dan dok je tlak na ušću iznosio 41 bar. Za rješavanje ovog problema odabrana je Vortech alatka vanjskog promjera 0,032 m (1-1/4 in.) te savitljivi tubing jednakog vanjskog promjera. Kao radni fluid korištena je mješavina vode i dušika kako bi se osiguralo sigurno iznošenje čestica i istovremeno smanjio hidrostatski tlak na dno bušotine. Valovi dobiveni djelovanjem alatke za ispiranje uspješno su djelovali na dezintegraciju stvorenog taloga barijevog sulfata. Talog je uspješno uklonjen i davanje bušotine je povećano na 141 260 m<sup>3</sup>/dan uz tlak nana ušću od 180 bara.

## 5.2. Instrumentacija

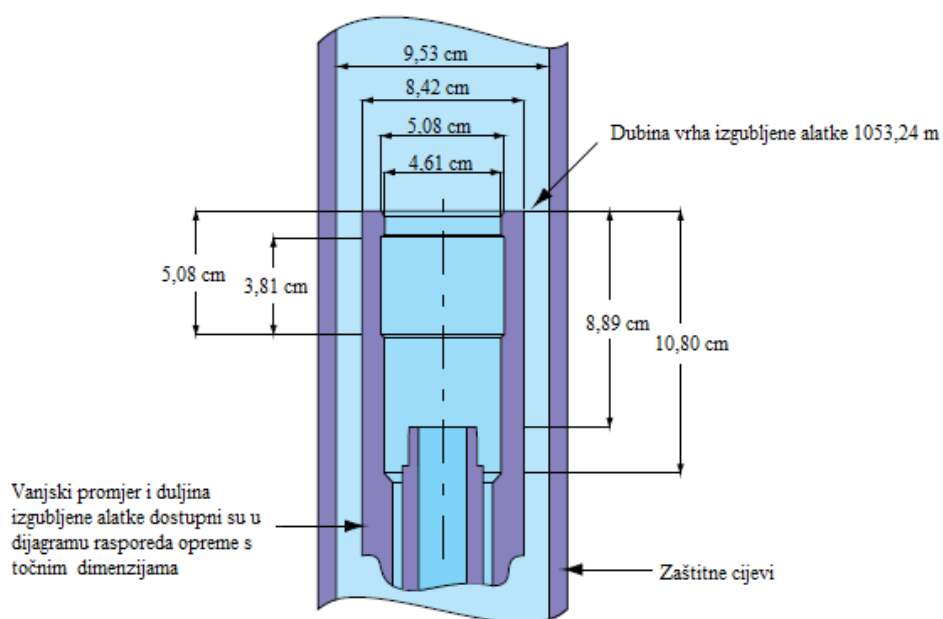
Instrumentacija je proces ukljanjanja oštećene, odbačene ili zaglavljene opreme i alatki iz kanala bušotine (ova operacija u engleskom jeziku poznata je pod nazivom „fishing“). Najčešće zahtjeva brzu reakciju na bušotini te tako spada u hitne operacije. Postoji čitavi niz opreme i odgovarajućih tehnika koje se koriste ovisno o: vrsti i veličini alatke koju se želi instrumentirati, geometriji kanala bušotine, dubinskog i površinskoj opremi. Svaka situacija koja zahtjeva instrumentaciju jedinstvena je te stoga zahtjeva posebnu pažnju i pristup prilikom njenog rješavanja. Uporaba savitljivog tubinga u operacijama instrumentacije ima nekoliko bitnih prednosti ispred konvencionalnog postupka instrumentacije upotrebno standardnog niza tubinga ili npr. opreme na žici: savitljivi tubing može izdržati veća vlačna naprezanja od čeličnog kabla (*engl. slickline*), krutost savitljivog tubinga omogućava mu kretanje kroz jako zakrivljene ili horizontalne dijelove kanala bušotine, cirkulacija fluida kroz savitljivi tubing može olakšati pristup određenoj opremi te se uz pomoć fluida mogu aktivirati određene hidrauličke alatke.

Alatke svojom izvedbom prilikom instrumentacije mora osiguravati mogućnost hvatanja alatki zaostalih u kanalu bušotine, dovoljnu nosivost kako bi izdržale dodatnu težinu alatki zaostalih u bušotini te mogućnost otpajanja i ostavljanja alatke koja se instrumentira u slučaju da ju nije moguće nikako izvaditi. U aktivnim bušotinama potrebna je odgovarajuća duljina lubrikatora kako bi se omogućilo vađenje dubinske ipreme i instrumentiranog alata iznad glavnog zasuna erupcijskog uređaja. Drugim riječima samo postupkom instrumentacije uz primjenu niza savitljivog tubinga moguće je vađenje kompletnog niza, dubinskog sklopa alatki i zahvaćene zaostale opreme u bušotine dok je bušotina pod tlakom.. Za svaku operaciju koja se provodi primjenom niza savitljivog tubinga potrebno je napisati detaljan plan operacije i popis opreme koja se planira koristiti. Plan bi trebao sadržavati i precizni opis dubinskog bušačeg sklopa sa dimenzijama svih dijelova opreme koja bi potencijalno mogla biti izložena instrumentaciji. Instrumentacija uz pomoću savitljivog tubinga koristi se u raznim situacijama no najčešće služi za povrat alatki velike težine u aktivnim bušotinama dok se instrumentiranje opremom na žici koristi se za povrat lakših komada opreme. Oprema na žici je „osjetljivija“ (koristi se za instrumentaciju manjih i lakših alatki uz mogućnost veće brzine izvlačenja izgubljenih alatki) te se pomoću nje jednostavnije manipulira

alatka/opremom koju se instrumentira. Ukupno gledajući brzina instrumentacije savitljivim tubingom u odnosu na opremu na žici je dosta manja stoga se može zaključiti da je takva varijanta instrumentacije i mnogo skuplja.

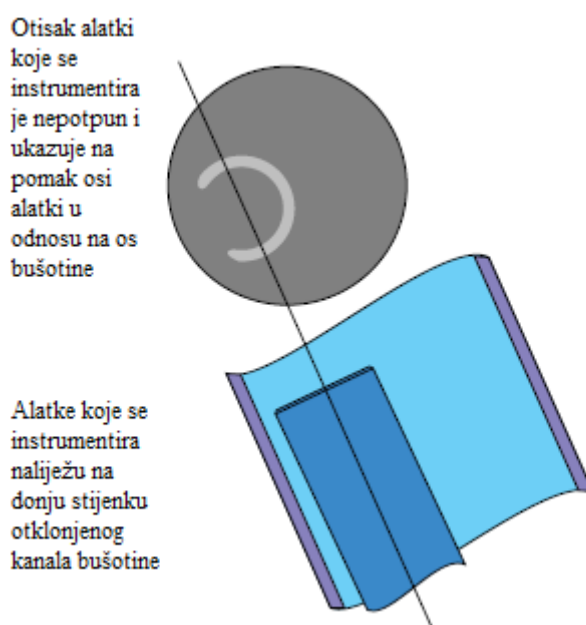
### 5.2.1. Projektiranje instrumentacije

Da bi se operacija izvela što uspješnije potrebno je prikupiti što je više moguće podataka koji uključuju: geometrijske karakteristike bušotine i zaostalih alatki, karakteristike ležišnog fluida, dubinu prihvat alatki (ukoliko je prihvat uzork zaostajanja alatki u bušotini), stanje oštećene alatke, tlak i temperaturu na mjestu prihvat te stanje površinske opreme. Može se lako zaključiti da su informacije vezane uz izgubljenu alatku/e najvažnije prilikom projektiranja. Dimenzije i ostali detalji vezani uz zaostalu alatku/e nerijetko su dostupni operateru koji radi s postrojenjem sa savitljivim tubingom, no u slučajevima kada je to moguće potrebo je unaprijed pripremiti točan dijagram rasporeda opreme s točnim dimenzijama. U samom opisu opreme koja se koristila kod operacije koja je prethodila instrumentaciji vrlo je bitno navesti sve poznate podatke o zaostalim alatkama uz napomene o mogućem postojanju ograničenja ili suženja (slika 5-12).



**Slika 5-12.** Primjer detaljnog opisa stanja stanja alatki zaostalih u bušotini neposredno prije provođenja operacije instrumentacije (CTES, 2005)

Najveći izazov predstavlja utvrđivanje točnog stanja i orijentacije alatke u bušotini upravo iz razloga što o tome ovisi odabir odgovarajuće alatke za instrumentaciju. Najlakši način za utvrđivanja točne pozicije i stanja alatke u bušotini je primjenom alatke s olovnim otiskom (slika 5-13). Problem u ovom pristupu je točno tumačenje i interpretacija otiska koja zahtjeva veliko iskustvo operatera u sličnim ili istim slučajevima u prošlosti detaljno poznavanje opreme. U odgovarajućim uvjetima moguća je i uporaba kamera spojenih na alatke za instrumentaciju koje šalju sliku u realnom vremenu na površinu pomoću kabela. Ovakva opcija primjenjuje se kada primjenjuje relativno bistar fluid i kada postoji financijska opravdanost za to (CTES, 2005).

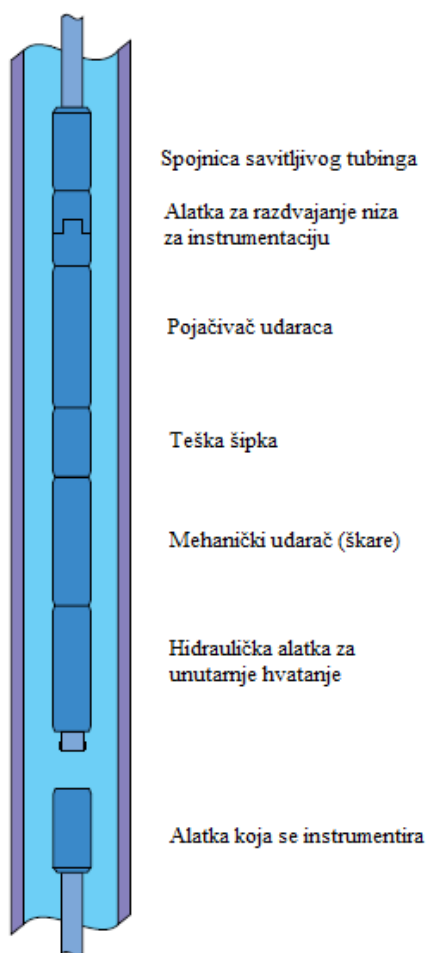


**Slika 5-13.** Mogući položaj alatki u otklonjenom kanalu bušotine neposredno prije instrumentacije (CTES, 2005)

Instrumentacija je ponajprije mehanička operacija no aktivacija alatki za hvatanje najčešće se pokreće hidraulički. Niz savitljivog tubinga se tijekom operacije kreće velikom brzinom u/iz kanala bušotine što dovodi do pojave značajnih naprezanja unutar niza savitljivog tubinga. Svaki niz savitljivog tubinga koji može izdržati uzdužna naprezanja prilikom standardnih operacija može se koristiti i za instrumentaciju. U slučaju da se tijekom instrumentacija zahtjeva više hidrauličke snage moguće je koristiti neki drugi niz, a ne nužno onaj tijekom čijeg korištenja je došlo do zaostajanja alatki u bušotini.

Sastav dubinskog niza alati prikazan je na slici 5-14, a ovisi o specifičnosti operacije, ali se za ove potrebe može pojednostaviti na sljedeće komponente:

- spojnica savitljivog tubinga,
- dvostruki protupovratni ventil,
- alatka za razdvajanje niza za instrumentaciju i niza koji se instrumentira,
- pojačivač udaraca,
- teške šipke (po potrebi),
- mehanički udarač (škare),
- hidraulička alatka za unutarnje hvatanje (*engl. spear*)s mogućnošću odvajanja od niza koji se instrumentira.



**Slika 5-14.** Uobičajeni dubinski sklop alata za instrumentaciju (CTES, 2005)

Dubinski sklop alatki započinje spojnicom savitljivog tubinga koja mora biti dovoljne čvrstoće kako bi izdržala moguća povećana vlačna naprezanja prilikom izvlačenja alatki na površinu. Standardna praksa je da se nakon nekoliko operacija instrumentacije spojnica zamijeni, a zadnji metar savitljivog tubinga odreže zbog sigurnosti jer je upravo spoj između savitljivog tubinga i spojnice najviše izložen spomenutim naprezanjima. U nizu se uvijek nalazi dvostruki protupovratni ventil osim ako se instrumentacija planira izvesti uz primjenu reverzne cirkulacije. Alatka za razdvajanje niza tubinga od ostatka alatki dubinskog sklopa mora uvijek biti u sustavu dubinskog sklopa zbog mogućnosti. Takve alatke za razdvajanje aktiviraju se na različite načine (dodatnom uzdužnom silom, nasjedanjem ili hidraulički. Za hvatanje zaostalog alata u kanalu bušotine postoje i jednokratne alatke koje se mogu samo jednom aktivirati i deaktivirati, nakon toga alatka se mora izvaditi na površinu i ponovno složiti mehanizam za korištenje. Takve izvedbe se ipak najčešće ne koriste zbog gubitka potrebnog vremena za izvlačenje i spuštanje niza savitljivog tubinga te ponovnog slaganja mehanizma. Vanjski hvatač cijevi (zvono s čeljustima), unutarnji hvatač cijevi neki su od najčešće korištenih alatki za instrumentaciju. Mogu se još koristiti i posebne alatke kao što su magneti, košare, glodači ili hvatači žice (*engl. wireline catcher*).

### 5.2.2. Sastav alata

Prema uputama kompanije *NOV coiled tubing tools* niz alatki za instrumentaciju načelno bi trebao biti sastavljen na sljedeći način. Za spoj savitljivog tubinga s dubinskim nizom alatki trebalo bi koristiti spojnicu malog promjera s vanjskim klinovima i vijcima za dotezanje (*engl. Slim Line Dimple* ili *Slip Connector*) (slika5-15). Spajanje se vrši preko ulegnuća/rupice u spojnici s pomoću kojih se dotezanjem vijaka spojnica steže oko cijevi savitljivog tubinga i urezuje se u nju nakon što je ona umetnuta unutar tijela alatke. Ovakva izvedba izvrsna je za korištenje u operacijama gdje alatka mora izdrati velika vlačna i torzijska naprezanja (npr. tijekom operacija instrumentacije i bušenja) (National Oilwell Varco, 2016).





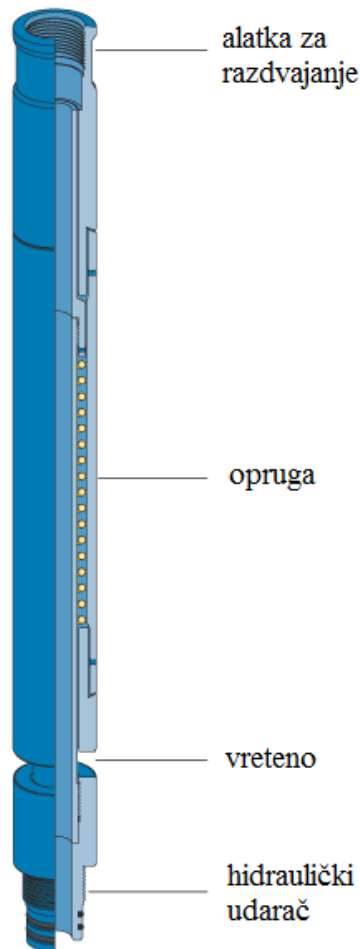
**Slika 5-15.** Sponica savitljivog tubinga s vanjskim klinovima u vijscima za dotezanje (National Oilwell Varco, 2016)

U nastavak niza dolazi dvostruki protupovratni ventil koji je u prethodnom poglavlju detaljno objašnjen. Sljedeća bitna alatka u nizu za instrumentaciju je alatka za razdvajanje niza savitljivog tubinga od ostatka dubinskog sklopa (*engl. Heavy Duty Hydraulic Disconnect*) (slika 5-16). Ova alatka omogućava razdvajanje savitljivog tubinga od dubinskih alatki ubacivanjem kuglice s površine kroz savitljivi tubing. Kuglica putuje sve do svog sjedišta na klip unutar alatke za razdvajanje te svojim nasjedanjem onemogućava protok fluida. U tom trenutku dolazi do porasta tlaka fluida na klip te se on pomiče prema dolje, a u svojem kretanju reže odrezne vijke. U trenutku kada dođe do odvajanja donjeg dijela niza cirkulacije se ponovno uspostavlja te je ona jasan pokazatelj uspješnog razdvajanja. Klip se zajedno s kuglicom vraća na površinu što znači da u kanalu ostaje alatka osposobljena za unutarnje hvatanje i vađenje na površinu. Klip mora biti dizajniran tako da izdrži sva moguća naprezanja prilikom aktivacije udarača kako ne bi došlo do neželjene aktivacije ove alatke i odvajanja donjeg dijela niza. Odrezni vijci su najčešće izrađeni od mesinga ili čelika kako bi osigurali kako bi se sila odreza mogla prilagoditi uvjetima u bušotini i operaciji koja se izvodi (National Oilwell Varco, 2016).



**Slika 5-16.** Alatka za razdvajanje savitljivog tubinga i dubinskog sklopa (National Oilwell Varco, 2016)

Na donji dio alatke za razdvajanje spaja se mehanički udarač (*engl. accelerator*) (slika 5-17). To je alatka koja se koristi zajedno s hidrauličkim udaračem za pohranjivanje energije koja se iznenada oslobađa kada se udarač aktivira. Pohranjena energija osigurava dodatnu udarnu silu koja može osloboditi alatke ukoliko su one u zaglavi. Ovisno o načinu rada samog pojačivača energija se može pohraniti tlačenjem mehaničke opruge ili komprimiranjem kompresibilnog fluida (npr. dušik). Pojačivači bi trebali biti odabrani na temelju njihove kompatibilnosti s izvedbom škara koje će se koristiti. (National Oilwell Varco, 2016).



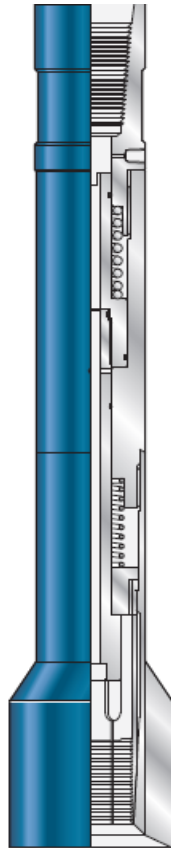
**Slika 5-17.** Mehanički udarač (škare) (Schlumberger Oilfield Glossary, 2018c)

Često se u niz zbog ostavrivanja dodatne sile ugrađuju tešku šipke ovisno o potrebnoj sili prilikom oslobođanja zaostalih alatki u bušotini ukoliko su one u zaglavi. Zatim u niz dolazi mehanički udarač (škare). Na slici 5-18 prikazan je hidraulički udarač koji se koristi u nizu savitljivog tubinga za instrumentaciju (*engl. Bowen™ TerraForce™ Coiled Tubing (CT) Jar*) Bowen™ TerraForce™ je hidraulički udarač dvosmjernog djelovanja konstruiran za rad u kombinaciji s akceleratorom. Jedinstveni dizajn ovog udarača omogućava jednostavne i pouzdane operacije primjene snažnih udara bez potrebe prethodnog namještanja alatke na površini. Ovaj udarač omogućava operateru jednostavnu kontrolu intenziteta udara djelovanjem određenom težinom alatki (teških šipki). (Petrowiki, 2012b)



**Slika 5-18.** Hidraulički udarač kompanije NOV (National Oilwell Varco, 2016)

Kao posljednji dio u niz dolaze alatke za vanjsko hvatanje (*engl. Overshot*) ili alatka za unutarnje hvatanje (*engl. Spear*) ovisno o promjeru alatke koja se pokušava zahvatiti. Za primjer se može uzeti alatka za vanjsko hvatanje kompanije NOV prikazana na slici 5-19 s pripadajućim čeljustima na slici 5-20, koja se aktivira hidraulički i koja ima mogućnost odpajanja (*engl. Flow Activated Releasable Overshot Tool*). To je alatka koja se koristi za prihvat cilindričnih alatki koje su zaostale tijekom različitih alatki u kanalu bušotine. Spušta se u kanal bušotine sve dok ne nasjedne na željenu alatku te se polaganim te se djelovanjem tarnih segmentata spaja na istu. Nategom se osigurava urezivanje navoja na tijelo zahvaćene alatke. U slučaju da se niz ne može osloboditi i vratiti na površinu uspostavlja se protok kroz savitljivi tubing pod određenim tlakom pri čemu dolazi do razdvajanja alatke za vanjsko hvatanje i zahvaćenih alatki. Cirkulacija do vrijednosti tlaka od 6,9 bara (100 psi) može se održavati tijekom postupka instrumentacije. Najčešća primjena je za prihvat dijela niza savitljivog tubinga ili nekih od dijelova opreme dubinskog sklopa alatki.



**Slika 5-19.** Alatka za vanjsko hvatanje (National Oilwell Varco, 2016)



**Slika 5-20.** Čeljusti za vanjsko hvatanje (National Oilwell Varco, 2016)

Jedna od alatki za unutarnje hvatanje kompanije Nov (engl. Flow Activated Releasable Fishing/Bulldog Spear) prikazana je na slici 5-21. Ova alatka služi za prihvat alatki različitog promjera zaostalog u kanalu bušotine. Jednostavno se odabere vrsta i promjer čeljusti za odgovarajući unutarnji promjer alatke (slika 5-22). Princip rada je veoma jednostavan, alatka se spusti unutar alatke koju s instrumentira te se rotacijom i nategom uspostavi čvrsta veza. Razdvajanje alatke za unutarnje hvatanje od

instrumentiranog niza vrši se na način da se poveća tlak unutar niza savitljivog tubinga što za posljedicu ima samo razdvajanje alatki (National Oilwell Varco, 2016).



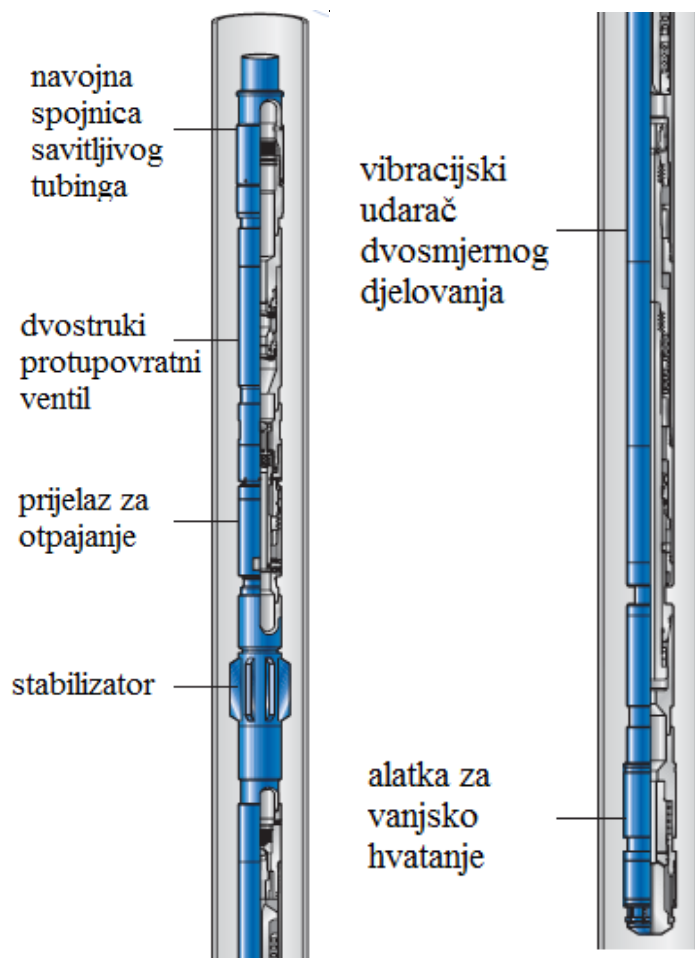
**Slika 5-21.** Alatka za unutarnje hvatanje (National Oilwell Varco, 2016)



**Slika 5-22.** Čeljusti za unutarnje hvatanje (National Oilwell Varco, 2016)

Tvrtka Baker Hughes ima poseban pristup instrumentaciji u kojoj koriste vibracijsku tehnologiju. Za razliku od konvencionalnih hidrauličkih udarača kompanije NOV, a Bakerove vibracijski udarač dvosmjernog djelovanja usmjeravaju energiju udara neposredno iznad zaglavljene alatke (slika 5-23). Njegovom aktivacijom omogućava se do 1000 udarača prema gore i dolje u jednoj minuti. Ova visoka frekvencija udarača koristi se

u kombinaciji s konstantnim nategom ostvarenim na niz savitljivog tubinga. Ovaj tip udarača izrazito je koristan pri ugradnji i uklanjanju opreme u veoma zakrivljenim i horizontalnim kanalima bušotine. Budući da se alatka resetira i aktivira pomoću radnog fluida, uklonjena je potreba za konstantnim kretanjem (spuštanjem i podizanjem) savitljivog tubinga radi aktiviranja udarača što mu uvelike produžuje radni vijek. Ovakva alatka može se koristiti još i za pomicanje kliznih rukavaca i povrat opreme na žici zaglavljene u otklonjenim dijelovima kanala bušotine.



**Slika 5-23.** Dubinski sklop za instrumentaciju s vibrirajućim udaračem dvosmjernog djelovanja (Baker Hughes, 2003)

Ovakav sastav alatki kao što je prikazan na slici 5-22 korišten u Meksičkom zaljevu za ukljanjanje čepa iznad šljunčanog zasipa. Alat se do tada već pokušavao izvaditi nekoliko puta uz pomoć opreme na žici i savitljivog tubinga. Za ponovni postupak instrumentacije korišten je vibrirajući udarač promjera 0,053 mm (2 1/8"), a rezultat je bio oslobađanje čepa 18 minuta nakon aktivacije alata.

### 5.3. Karotažna mjerenja

Savitljivi tubing može se koristiti kao noseći niz alatki za karotažna mjerenja. Električni kabel smješten unutar niza savitljivog tubinga služi kao mediji za prijenos struje i podataka od površine do alatke za mjerenje. Na površini se kabel ugrađuje u savitljivi tubing tako kroz poseban ulaz na bubnju (*engl. slip ring collector*), dok se na dnu niza savitljivog tubinga ugrađeni kabel spajaju na alatku za mjerenje preko posebnog adaptera (glave) (*engl. coiled tubing head adapter - CTHA*). Karotažna mjerenja uz pomoć savitljivog tubinga podijeljena su u tri skupine:

- a) snimanje otvorenog dijela kanala bušotine (*engl. openhole logging*) - ova vrsta mjerenja koristi se za procjenu stanja formacije prije ugradnje zaštitnih cijevi. U većini slučajeva niz se sastoji od nekoliko alatki za provedbu više vrsta mjerenja istovremeno. Najčešća mjerenja koja se izvode su: gama zračenje (*engl. gamma ray*), mjerenje otpornosti stijena (*engl. dual induction*), akustična mjerenja (*engl. sonic measurement*), stratigrafska mjerenja i dr;
- b) snimanje zacijevljenog dijela kanala bušotine (*engl. cased hole logging*) - služi za ocjenu karakteristika ležišta i uspješnosti cementacije. U ovu vrstu mjerenja spadaju najčešće mjerenja: proizvodnosti, korozije, ocjena kvalitete cementnog kamena, mjerenje putanje kanala bušotine pomoću žiroskopa i dr.
- c) posebna mjerenja - u kanal bušotine može se spustiti video kamera koja može prikazati sliku stvarnog stanja kanala bušotine. Kada se spuštaju takve kamere opremom na žici njihova primjena ima smisla jedino u bistrim fluidima ili plinovima kako bi operater imao jasan prikaz na svom zaslonu. Zahvaljujući savitljivom tubingu problem s vidljivošću može se riješiti smještanjem razdjelnice dušika ili drugog plina odnosno bistrih fluida kroz koje će kamera davati potpuno jasnu sliku. Za posebne primjene mogu se koristiti još i elektromagnetske alatke za instrumentaciju metalnih krhotina u horizontalnim kanalima bušotina.

Mnoge su prednosti uporabe savitljivog tubinga za karotažna mjerenja, a neka od njih su:

- potrebna krutost niza za ugradnju alatki za mjerenje na velike udaljenosti u otklonjenim i horizontalnim kanalima bušotina;
- kontinuirano prostorno snimanje (gore ili dolje) s kvalitetnom kontrolom željene brzine kretanja i dubine do koje će se vršiti mjerenje;



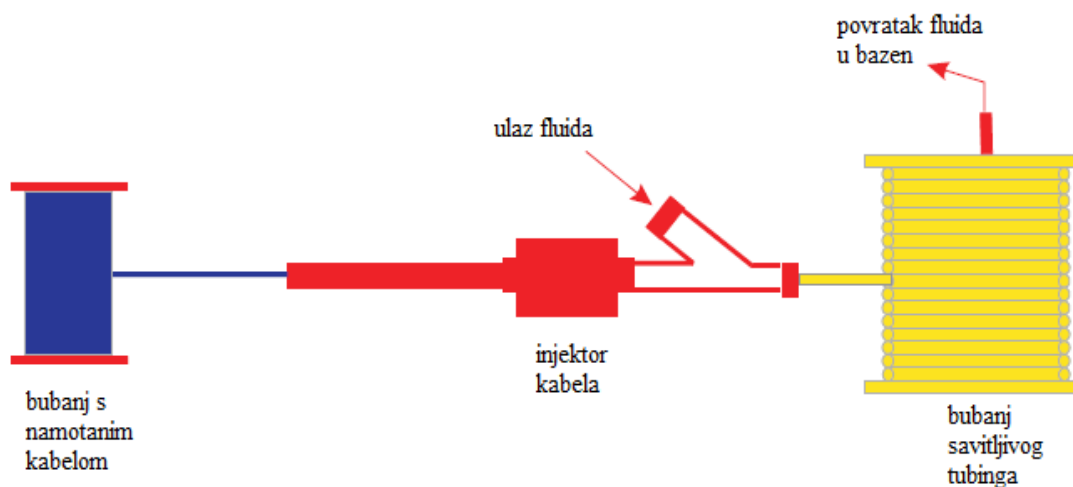
- zaštita kabela unutar niza savitljivog tubinga;
- konstatna cirkulaciju fluida;
- konstantna kontrola tlaka u aktivnim bušotinama;
- mjerenja u realnom vremenu uz istovremenu obradu sloja.

Prilikom karotažnih mjerenja koriste se dugi nizovi alatki kojima može biti teško manipulirati osobito u aktivnim bušotinama. Na lokacijama s odgovarajućim slobodnim radnim prostorom pristupa se ugradnji alatki za mjerenje u lubrikatore. Duljina lubrikatora određena je duljinom niza alatki koje je potrebno spustiti na savitljivom tubingu u kanal, a onda posljedično utječe i na odabir dizalice potrebne za manipulaciju alatom. U slučajevima kada nemamo dovoljno slobodnog prostora za ugradnju lubrikatora primjenjuje se daljinski sustav za implemetaciju koji ugrađuje manje nizove u kanal bušotine. Sustav omogućava ugradnju dubinskog sklopa alatki u bušotinu kada je njihova duljina veća od maksimalne duljine lubrikatora. Drugim riječima u lubrikator i bušotinu pod tlakom pomoću tog sustava ugrađuju se pojedine alatke u niz. Prilikom same ugradnje savitljivog tubinga mora se uzeti u obzir da je težina niza s kabelom teža od praznog nizasavitljivog tubinga. Ta dodatna težina može biti problem u odobalnim operacijama gdje je kapacitet dizalice ograničen. Pošto postoji mogućnost da dizalica ne može podići bubanj savitljivog tubinga s ugrađenim kabelom na platformu se prvo ukrcava bubanj sa savitljivim tubingom a zatim bubanj s kabelom. Nakon što su oba bubnja smještena na platformu koristi se injektor za instaliranje kabela unutar niza savitljivog tubinga. Kablovi koji se najčešće koriste kao vodič za prijenos električne struje su: hepta kabel (snop od 7 kabela), mono kabel i koaksijalni kabel (oba vodiča leže na istoj osi). Hepta kabel je uobičajeno prvi izbor za korištenje s alatkama za mjerenje u otvorenom dijela kanala dok se za mjerenje u zacijevljenom dijela kanala koriste mono ili koaksijalni kablovi. Bitno je napomenuti da se za zahtjevnija mjerenja koristi koaksijalni kabel zbog toga što ima najveću brzinu prijenosa podataka (Techtarget, 2000). Za prijenos video podataka uvijek se koriste kablovi s optičkim vlaknima. Odabir kabela u konačnici uvijek ovisi u vrsti opreme koja se koristi. Postoje četiri metode ugradnje električnog kabela u savitljivi tubing:

- ugradanja savitljivog tubing u vertikalnu bušotinu te naknadno spuštanje kabela u savitljivi tubing;

- razmatanje niz savitljivog tubinga na površini, te postavljanje čep na kraj kabla koji se zatim protiskuje kroz niz savitljivog tubinga;
- proizvodnja savitljivog tubing s kablom za uvlačenje;
- upotreba injekcijskog sustava za ugradnju

Injekcijski sustav je najsvestraniji i najisplativiji od nabrojanih metoda. Pogodan je za lokacije u kojima je prostor ograničen poput platformi. Sustav može bilo koji savitljivi tubing pretvoriti u niz za karotažna mjerenja. Injektor može djelovati i kao sustav za uklanjanje kabla iz savitljivog tubinga nakon mjerenja u bušotini.



**Slika 5-24.** Injekcijski sustav za uvlačenje električnog kabla u niz savitljivog tubinga (CTES, 2005)

Osnovni princip rada injektora relativno je jednostavan. Kabel se razmotava sa bubnja te se preko koloture ugrađuje u cijev malog promjera (eng. accelerator) koja uvodi kabel unutar savitljivog tubinga. Kroz akcelerator se utiskuje voda pod visokim tlakom uz pomoć koje se kabel ugrađuje u niz savitljivog tubinga. Visoki tlak utiskivanja ima dvije funkcije: stvara turbulentni tok koji omogućava da kabel ne dodiruje stijenke tubinga čime se smanjuje trenje u postupku njegovog ugrađivanja, a druga je da osigurava aksijalnu silu koja drži kabel pod nategom u smjeru utiskivanja fluida. Ovakav način ugradnje moguće je ugraditi do 8 000 m (26 000 ft) kabla u savitljivi tubing. Na obrnut način kabel se može izvući iz tubinga i namotati natrag na bubanj.

Ključni parametar prilikom ugradnje kabela je nateg. Radijus zakrivljenosti svakog namotaja savitljivog tubinga na bubnju od prilike je 1% veći od radijusa zakrivljenosti ugrađenog kabela. Zbog toga kabel mora biti minimalno 1% dulji od niza savitljivog tubinga. Nakon nekoliko spuštanja i podizanja tubinga u i iz kanala bušotine, kabel može popusiti (olabaviti) u nekim dijelovima te može postojati mogućnost njegovog pucanja.

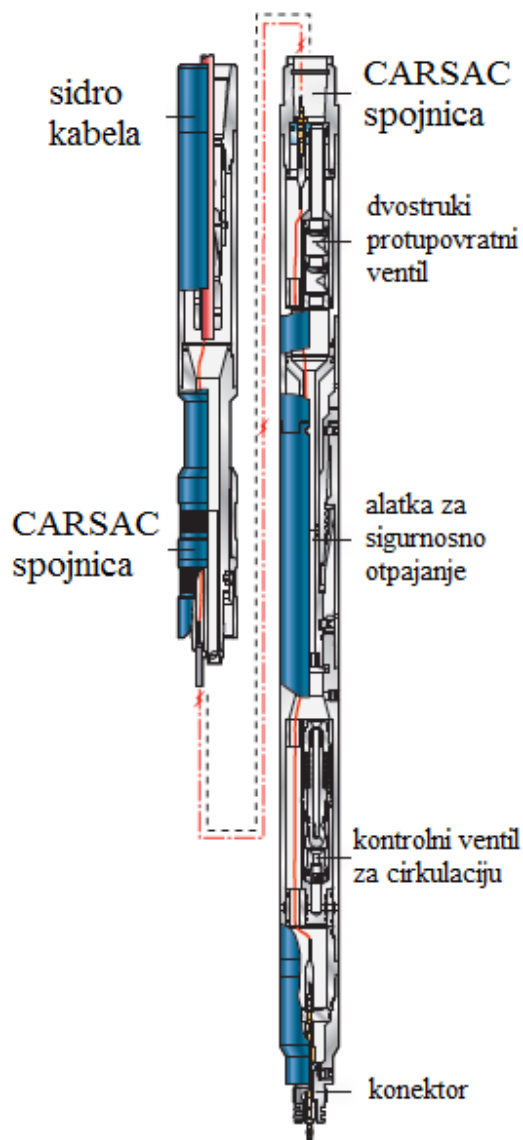
### 5.3.1. Sastav alatki za obavljanje karotažnih mjerenja uz korištenje niza savitljivog tubinga

Svaki niz savitljivog tubinga koji ima ugrađen adekvatan kabel i može izdržati uzdužna naprezanja može se koristiti za provođenje karotažnih mjerenja. Za provođenje karotažnih mjerenja kritični parametar je dubina. Oprema za mjerenje mora biti kalibrirana i potpuno operativna. Bujanj savitljivog tubinga mora imati tlačnu pregradu i kolektor za rad sa električnim kabelom. Tlačna pregrada nalazi se na kraju niza savitljivog tubinga i omogućava vezu između kabela ugrađenog u tubing i vanjskog dijela kabela. Kolektor ostvaruje električnu vezu između bubnja i stacionarne električne opreme. Sastav dubinskog sklopa za mjerenje prvenstveno ovisi o vrsti mjerenja koje se želi provesti u kanalu bušotine. U aktivnim bušotinama može postojati potreba za posebnim konektorima za alatke za mjerenje koje se nalaze u dubinskom sklopu alatki. Neki dubinski sklopovi imaju na svome vrhu opremu za mjerenje naprezanja u nizu alatki. Uobičajen sklop dubinski alatki za provođenje karotažnih mjerenja čine:

- spojnica savitljivog tubinga,
- dvostruki protupovratni ventil,
- prijelaz (alatke) za razdvajanje,
- adapter (glava) elektrokabela,
- alatka za mjerenje naprezanja (nije obavezna),
- različite alatke (sonde) za mjerenja u kanalu bušotine.

Tvrtka *NOV coiled tubing tools* kao i većina suvremenih servisnih kompanija u svojoj ponudi ima gotove dubinske sklopove koji su namijenjeni za provođenje točno određenih karotažnih mjerenja. Za primjer je uzet sklop dubinskih alatki za karotažna mjerenja originalnog naziva *CT Logging Cable Head (Mono Conductor)* prikazan na slici 5-25. U svom sastavu uključuje 6 alatki koje tvore jednu cjelinu. Prva alatka u nizu je sidro

električnog kabela (*engl. cable anchor sub*). Nalazi se na vrhu dubinskog sklopa i ima nekoliko funkcija, a spaja se na spojnicu savitljivog tubinga. Kabel se sidri pomoću kliznih prstena. Klizni prsten je elektromehanički uređaj koji omogućuje prijenos snage i električnih signala s nepomičnog na rotirajuću strukturu. Klizni prsten se može koristiti u bilo kojem elektromehaničkom sustavu koji zahtijeva rotaciju dok odašilje energiju ili signale. Sljedeća u nizu je CARSAC spojnica (*engl. Combination Anti-Rotation Self Aligning Connector*). Spojnica omogućuje brzo i jednostavno spajanje dubinskog sklopa alatki na savitljivi tubing. Dizajnirana je na način da dubinski sklop zapravo podijeli na dvije manje cjeline. Gornji dio povezan je s tubingom preko donjeg dijela sidra kabela, dok je donji dio povezan na ostatak dubinskog sklopa. CARSAC najviše pridonosi uštedi vremena u pogledu sastavljanja alata na površini. Na njega se nadovezuje dvostruki protupovratni ventil s električnim premoštenjem. To je sigurnosna alatka koja sprječava povrtani tok fluida u savitljivi tubing. Gornji dio sastoji se od električne pregrade kroz koju se provlači kabel od sidra kabela. Ispod pregrade kabel i tok fluida su razdvojeni u posebne sekcije. Sekcija kroz koju protječe fluid osigurava neometani protok fluida i ostvarivanje tlaka dok sekcija s kabelom zaobilazi protupovratne ventile ne narušavajući integritet njihovog djelovanja. Sljedeća u nizu je alatka za sigurnosno razdvajanje dijela dubinskog sklopa ispod i iznad nje (*engl. The heavy duty over-pressure release joint*). Dizajnirana je na način da izdrži velike vibracije i osigurava prolaz električnom kabeu. Aktivira se povećanjem tlaka unutar tubinga nakon čega klizni mehanizam reže odrezne zatike. Nakon otpajanja ostavlja profil alatke pogodan za instrumentaciju. Alatka ima dvije osnovne zadaće. Prva je regulacija protoka i protutlaka na cirkulacijski fluid pomoću prigušnice kada se radi u uvjetima gdje je slojni tlak veći od hidrostatskog (*engl. underbalanced well operations*). Druga je omogućiti pravilan rad alatke za sigurnosno razdvajanje. U slučaju da slojni fluid počne pritjecati u niz sve većim intezitetom, dolazi do porasta tlaka uslijed čega dolazi do pomicanja se klip alatke za razdvajanje prema gore sve dok ona ne zatvori prolaz za fluid između alatke za sigurnosno razdvajanje i kontrolnog ventila. Električni kabel izoliran je i prolazi pokraj ventila. Zadnja alatka u ovom nizu je konektor za spajanje na sondu. Postoji više različitih vrsta konektora te se on naručuje ovisno o sondi koja bi se trebala na njega priključiti (National Oilwell Varco, 2016).



**Slika 5-25.** Dubinski sklop alatki savitljivog tubinga za provođenje karotažnih ispitivanja tvrtke NOV Coiled Tubing Tools (National Oilwell Varco, 2016)

#### 5.4. Hidrauličko frakturiranje

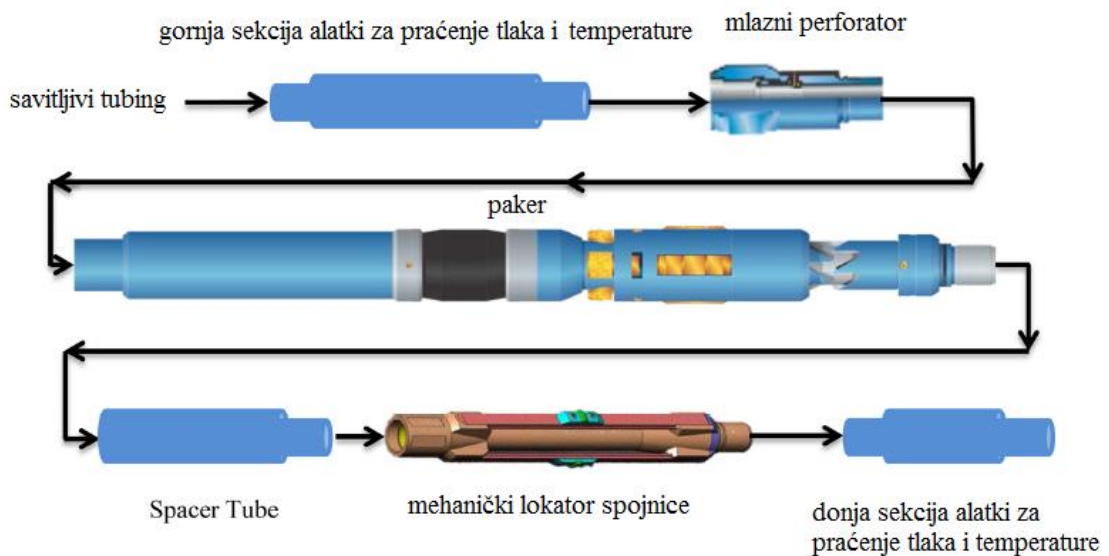
Otkrivanjem velikog broja nekonvencionalnih ležišta u svijetu (osobito u SAD-u) došlo je do naglog povećanja ukupnih rezervi nafte i plina. Takva su ležišta često kompleksna te drastično variraju u litologiji, lateralnim duljinama rasprostiranja pa zahtijevaju inovativnu tehnologiju i tehnike kako bi se mogla što ekonomičnije eksploatirati. Za provođenje hidrauličkog frakturiranja u horizontalnim bušotinama danas

se koriste dva različite metode: rukavac za dosjedanje kuglice tijekom hidrauličkog frakturiranja (*engl. drop ball activated frac sleeves*) i rukavac za provođenje hidrauličkog frakturiranja pomoću savitljivog tubinga (*engl. coiled tubing activated frac sleeves*). Rukavac za dosjedanje kuglice ugrađuje se u kanal bušotine zajedno s proizvodnim linerom nakon cementacije proizvodne kolone. Aktivacija pojedine sekcije ostvaruje se puštanjem kuglice u sustav zajedno sa radnim fluidom u kojemu ona dolazi do svog sjedišta. Zbog dugotrajnog neproduktivnog vremena rada bušotine i visokih troškova uobičajenih metoda frakturiranja razvijena je najnovija tehnologija hidrauličkog frakturiranja uz pomoć savitljivog tubinga. Ova nova metoda omogućava višestupanjsko frakturiranje, te ne uključuje korištenje opreme na žici niti primjenu kuglica u nizu alata kako bi se izolirale posebne sekcije za frakturiranje. sustav za hidrauličko frakturiranje uz primjenu savitljivog tubinga uključuje rukavce za frakturiranje koji se aktiviraju hidraulički pomoću posebno dizajniranog dubinskog sklopa alatki spojenog na savitljivi tubing. Rukavci se ugrađuju u bušotinu u sklopu zaštitnih cijevi te se cementiraju ili spajaju na lajner s pakerima za operacije u otvorenom dijelu kanala bušotine. Savitljivi tubing s dubinskim sklopom alatki ugrađuje se u bušotinu neposredno prije početka frakturiranja (Castro et al., 2013). Uobičajeni dubinski sklop alatki tvrtke Baker Hughes sastoji se od:

- mehaničkog lokatora spojnice,
- odjelne cijevi
- pakera,
- mlaznog perforatora,
- alatki za praćenje tlaka i temperature.

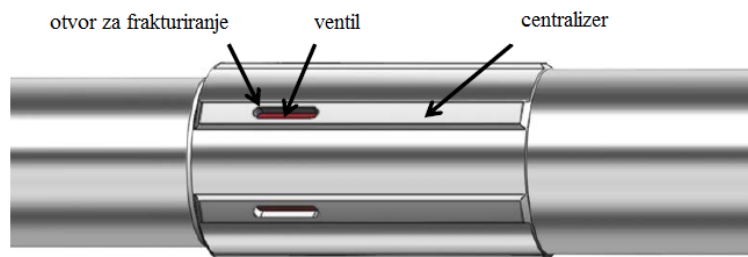
Mehanički lokator spojnice koristi se za precizno pronalaženje rukavaca za frakturiranje i postavljanje dubinskog sklopa na odgovarajuću poziciju. Odjelna cijev služi za osiguravanje potrebnog razmaka lokatorske spojnice od pakera kako bi osigurala pravilno postavljanje pakera. Paker služi za otvaranje rukavaca za frakturiranje i osiguravanje izolacije prethodnog stupnja frakturiranja. Mlazni perforator koristi se u slučajevima kada treba ostvariti izraditi dodatan broj perforacija na mjestima gdje rukavci nisu ugrađeni. Može služiti i kao prijelaz za ostvarivanje cirkulacije kroz savitljivi tubing u slučajevima kada dođe do zasipavanja i nakupljanja veće količine čvrstih čestica. Kao dodatak dubinski sklop sadrži alatke za mjerenje tlaka i temperature. Spojene su na vrh pakera kako bi se mjerila temperatura i tlak tijekom frakturiranja, te registrirao tlak ispod

pakera ne bi li se uočila komunikacija između pojedinih stupnjeva frakturiranja ili propuštanje pakera (slika 5-26).



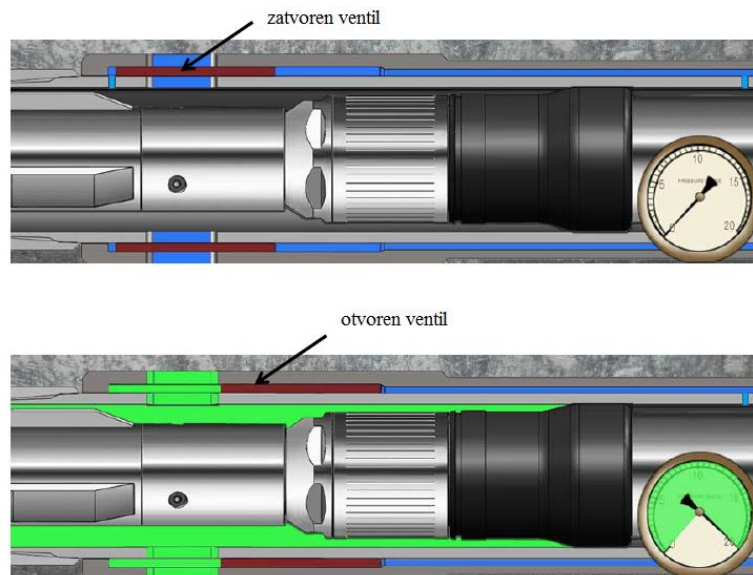
**Slika 5-26.** Dubinski sklop alatki za višestupanjsko frakturiranje uz primjenu niza savitljivog tubinga (Algadi et al., 2014)

Rukavci za frakturiranje aktiviraju se ostvarivanjem tlaka na rukavac. U svom sastavu imaju unutrašnje ventile koji omogućavaju bolju zaštitu od utjecaja uvjeta u bušotini i operacije cementacije. Pogonska komora i otvori ispunjeni su posebnim inhibitorom koji onemogućava bilo kakvo stvrđnjavanje cementne kaše u otvorima za frakturiranje na rukavcu (slika 5-27).



**Slika 5-27.** Klizni rukavac (Castro et al., 2013)

Rukavci se neće otvoriti osim u slučaju smještanja pakera u rukavac neposredno ispod otvora i povećanja tlaka na rukavac. Jednom kada je paker pravilno postavljen i aktiviran (nasjedanjem) ostvaruje se primjena tlaka u prstenastom prostoru između savitljivog tubinga i zaštitnih cijevi. Ostvarivanjem diferencijalni tlak na rukavac odrezni vijci se režu te se rukavac otvara (slika 5-28). Nakon završetka frakturiranja ostvaruje se nateg savitljivog tubinga te dolazi do deaktivacije pakera. Paker se zatim može premjestiti do sljedećeg rukavca i cjelokupan postupak se može ponoviti. (Algadi et al., 2014)



**Slika 5-28.** Postupak otvaranja kliznog rukavca (Castro et al., 2013)



## **6. PRIMJER MODERNE UPORABE DUBINSKOG SKLOPA ALATA SAVITLJIVOG TUBINGA**

Trenutno se u naftnoj industriji kontinuirano traže nova rješenja u optimizaciji strategije razvoja naftnih i plinskih polja uz što veće smanjenje troškova. U mnogim slučajevima izrada bušotina kojima se maksimalno povećava kontaktna površina kanala bušotine i ležišta postaje uobičajena praksa. Zbog kompleksnosti izrade takvog kanala bušotine oštećenje pribušotinske zone nije neuobičajeno te često zahtijeva kiselinske obrade. Jedna od najučinkovitijih metoda za provedbu kiselinske obrade u bušotinama velikog doseg je primjena savitljivog tubinga. Moderne bušotine velikog doseg danas imaju horizontalne dijelove duljine veće od 12 000 m što često premašuje doseg i samog savitljivog tubinga, čak i kada se koristi posebni postupci tijekom njegove ugradnje. Problem koji se najčešće javlja kod protiskivanja savitljivog tubinga kroz duge horizontalne sekcije kanala bušotine spiralno je izvijanje niza. Kako bi se to spriječilo potrebno je bilo razviti sustav s dovoljnom snagom povlačenja, odnosno alatku za povlačenje savitljivog tubinga („traktor“), koji bi uz to zadovoljavao ograničenje vanjskog promjera od 5,397 cm (2 1/8“). Razvoj hidrauličkog traktora vanjskog promjera 5,397 cm počeo je nakon što je studija izvodljivosti predočila tri moguća dizajna koja su bila najprihvatljivija. Prva dva rješenja eliminirana su odmah u prvom mjesecu razvoja, pa je treći odabran kao najbolje rješenje, a radovi na njemu nastavili su se još dva mjeseca. Izrađen je prototip koji je podvrgnut raznim testiranjima te je potvrđen potencijal ove tehnologije. Pozitivni rezultati testiranja prototipa doveli su do izrade nove alatke i njegove primjene u manje od godinu dana.

### **6.1. Alatka za povlačenje savitljivog tubinga malog promjera (traktor)**

Dubinski sklop alatki sastojao se od:

- rasteretnog ventila - RVS (*engl. Relief Valve Sub*),
- prijelaza za izoliranje prostora za protjecanje radnog fluida - BICS (*engl. BHA Isolating Circulation Sub*),
- prijelaz s filter mlaznicom - FNS (*engl. Filter Nozzle Sub*)

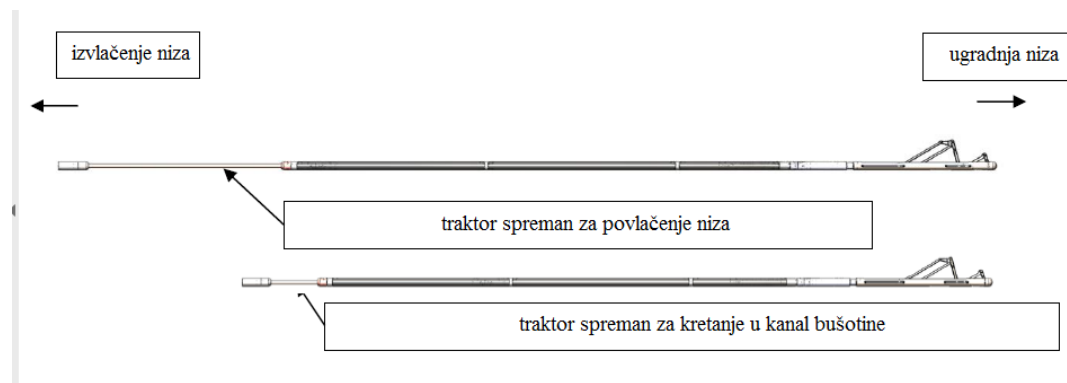
- statičkog gripera (klina s tarnim segmentima)
- traktora i griperskog sklopa

Griper je klin koji na svom vrhu sadrži tarne segmente koji se urezuju u zaštitne cijevi ili stijenke kanala bušotine kako bi ostvarile dovoljnu silu trenja za kretanje traktora. Slika 6-1 prikazuje prvi dio sklopa. Prijelaz s filter mlaznica služi za filtriranje radnog fluida koji pokreće traktor. Rasteretni ventil održava optimalni radni tlak traktora. Prijelaz za izoliranje prostora za protjecanje radnog fluida kroz dubinski sklop alatki izolira traktor za vrijeme kiselinških obrada i omogućava aktivaciju traktora povćanjem tlaka cirkulacije fluida.



**Slika 6-1.** Početni dio dubinskog sklopa alatki (Saeed et al., 2018)

Traktor i griperski sklop pokreću se ostvarivanjem diferencijalnog tlaka. Radni fluid pokreće aktivaciju traktora i griperskog sklopa te se uz pomoć klipa ostvaruje kretanje. Prilikom kretanja traktora fluid izlazi ispred alatki i služi za ispiranje gripera. Nakon ostvarenog pomaka griper se deaktivira i spušta se u alatku te se ostvaruje pomak odnosno utiskivanje traktora i gripera pomoću klipa u horizontalni kanal. Nakon što se klip maksimalno produlji griperska sekcija opet se aktivira i pokreće utiskivanje gripera odnosno klinova u gornji dio kanala bušotine što omogućava sidrenje traktora te njegovo novo povlaćenje niza savitljivog tubinga dublje u kanal (slika 6-2). Griperska sekcija sastoji se od dva gripera različitog doseg a iz razloga što alat mora protiskivati kroz zacijevljeni i otvoreni dio kanala bušotine. Veća duljina drugog gripera omogućava njegovo hvatanje u raznim dijelovima otvorenog kanala s raznim promjerima bušotine.



**Slika 6-2.** Shema kretanja traktora (Saeed et al., 2018)

## 6.2. Primjer ugradnje savitljivog tubinga pomoću alatke za povlačenje tubinga

Primjer traktora korštenog u ovoj operaciji nalazi se na slici 6-3, dok su u nastavku navedene sve tehničke specifikacije vezane uz traktor (tablica 6-1).



**Slika 6-3.** Fotografija traktora smanjenog promjera(Saeed et al., 2018)

**Tablica 6-1.** Tehničke specifikacije „traktor“ alatke (Saeed et al., 2018)

Parametri	Specifikacije
Vanjski promjer	3,397 cm
Unutarnji promjer	nepoznat
Ukupna duljina	790 - 885 cm
Maksimalna sila povlačenja	1590kg pri 150 bar
Maksimalna brzina	305 m/h
Maksimalni nateg	9980 kg
Maksimalna temperatura	150 °C
Otpornost na kiselinu	da
Materijali	inconel (slitina nikla i kroma), čelik, volfram karbid

Cilj operacije bio je kiselinski obraditi otvoreni dio kanala od 4905 m do 6510 m s savitljivim tubingom promjera 5,08 cm (2<sup>“</sup>) s telemetrijskim sustavom i novom alatkom za povlačenje savitljivog tubinga promjera 5,39 cm (2 1/8<sup>“</sup>). Posljedično nakon operacije bušenja površina kanala ostala je prekrivena isplačnim oblogom. Kako bi se pritjecanje fluida u kanal bušotine moglo nesmetano odvijati bilo je potrebno kiselinski ukloniti oblog. Prvi korak operacije bio je sklapanje dubinskog sklopa alata. Nakon što je savitljivi tubing usmjeren u lubrikator i izložen nategu od 11450 kg u trajanju od 15 minuta. Slijedilo je sastavljanje niza alata za planiranu operaciju. Početno je niz opremljen alatkom za ispiranje promjera 4,29 cm te s mjernim instrumentima promjera 5,39 cm kako bi se pročistio kanal bušotine od 2190m do 4910m. Kao rad fluid korišteno je dizel gorivo koje je protiskivano dobavom od 0,16 m<sup>3</sup>/min. Drugi dio planirane operacije sastojao se odugradnje opremu za mjerenje u realnom vremenu promjera 5,39 cm i alatke za povlačenje tubinga („traktor“) jednakog promjera sve do dna bušotine. Na dubini od oko 3048 m provjerena je ispravnost „traktora“, a nakon što je potvrđena ista traktor je ugrađen na petu zadnje kolone zaštitnih cijevi gdje je potom aktiviran (Saeed et al., 2018). Tijek i trajanje operacije uklanjanja isplačnog obloga sa stijenki kanla bušotine prikazan je na slici 6-4.

Rezultati primjene traktora u konačnici bili su uspješni. Bez primjene traktora savitljivi tubing nije bilo moguće ugraditi ni do polovice kanala bušotine. Aktivacijom traktora tubing se ugradio sve do dna dubine bušotine što je omogućilo tretman cjelokupnog kanala bušotine klorovodičnom kiselinom. To je u konačnici donijelo veliko

povećanje proizvodnosti te prikazalo isplativost primjene ovakve tehnologije u veoma kratkom vremenskom periodu.

U dubinu analize kiselinske obrade neće se ulaziti u ovom radu zbog fokusiranja na tehnologiju i tehniku izvedbe same operacije.

## 7. ZAKLJUČAK

Dok se u praksi uobičajeno uz pojam savitljivog tubinga vežu samo operacije frakturiranja ovaj rad pokazuje da je njegova uporaba mnogo šira od samo jedne operacije. Postrojenje za rad sa savitljivim tubingom svojom jednostavnošću omogućava smještaj opreme na svim kopnenim te svim odobalnim postrojenjima uz povremene potrebe modifikacije prostora. Za razliku od konvencionalnog niza tubinga savitljivi tubing se vrlo brzo ugrađuje i izvlači iz kanala bušotine što ima veliki utjecaj na ekonomsku stranu njegove primjene. Dubinski sklop alatki savitljivog tubinga s odgovarajućim sastavom alata omogućava mu primjenu u gotovo bilo kojoj operaciji na bušotini što ističe njegovu svestranost. Brzo se sklapa i omogućava čak podjelu sklopa na manje segmente kako bi se različite operacije obavile u što kraćem roku. Danas na tržištu postoji mnoštvo kompanija koje se bave servisnim operacijama na bušotinama ali i proizvodnjom opreme za rad sa savitljivim tubingom što omogućava pomno planiranje i odabir odgovarajućeg sklopa i niza alatki. Iz posljednjeg primjera u ovome radu može se zaključiti da puni potencijal savitljivog tubinga još uvijek nije iskorišten. Od svoje pojave 1950.-ih godina pa sve do danas nastavlja se kontinuirano unaprjeđivati. Uslijed stjecanja novih znanja i spoznaja primjena savitljivog tubinga postaje sve dostupnija širom svijeta. U sve se više dijelova svijeta počinje primjenjivati ova tehnologija pa se tako povećava broj jedinica za rad u Južnoj Americi i Srednjem istoku.

Ukoliko na tržištu ponovno ne dođe do nekontroliranog kolapsa cijena nafte i plina može se očekivati daljnji razvoj savitljivog tubinga i njegove opreme te bi svakako trebalo pratiti nove izazove i rješenja u području ove tehnologije.

Ovaj diplomski rad služi kao preglednik te određena vrsta kataloga koja daje preporuke na koji način je sve moguće izvršiti operacije te kako i koje je alatke moguće odabrati kako bi se složio odgovarajući dubinski sklop alata za provođenje specifičnih operacija.

## 8. LITERATURA

1. ALGADI O., FILYUKOV R., LUNA D., 2014. Multistage Hydraulic Fracturing Using Coiled Tubing-Activated Frac Sleeves: Case Study From The Permian Basin, SPE-170821-MS, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 27–29 October 2014.
2. Baker Hughes, 2003. Coiled Tubing Solutions, Houston, Texas
3. BJ Services Tomball, 2005. EDC TCC210 Coiled Tubing Equipment Correspondence Course, Tomball, Texas 77375., str. 7-28.
4. CASTRO L.A., JOHNSON C.C., THACKER W.C., 2013. Targeted Annular Hydraulic Fracturing Using CT-Enabled Frac Sleeves: A Case History from Montana's Bakken Formation, SPE 166511, SPE Annual Technical Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 30 September–2 October 2013.
5. CTES, 2005. Coiled Tubing Manual, Conroe, Texas 77303, str. 27-469.
6. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011. Opremanje i održavanje bušotina. Zagreb: AREA d.o.o.
7. National Oilwell Varco, 2016. Coiled Tubing Tools, Houston, Texas 77036
8. PERIĆ, M., 2007. Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina, Zagreb.
9. SAEED A., SAIOOD H., ARSLAN M., MOORE B., 2018. Case Study: Innovative World's Slimmest Coiled Tubing Tractor for Stimulation of Extended Reach Wells, SPE-192301-MS, SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia, 23–26 Travanj 2018.
10. Schlumberger Dowell, 1995. Coiled Tubing Client School Manual, str. 2-65.

Internet izvori:

11. Blogs from DNV GL, 2018. Pipeline History: Operation PLUTO, URL: [https://blogs.dnvgl.com/software/wp-content/uploads/2016/12/PLUTO\\_Conumdrum\\_AOGHS.jpg](https://blogs.dnvgl.com/software/wp-content/uploads/2016/12/PLUTO_Conumdrum_AOGHS.jpg) (24.04.2018.)
12. Coil Solutions, 2007. History of the Coil Tubing Injector, URL: <http://www.coilsolutions.com/blog/history-of-the-coil-tubing-injector/> (24.04.2018.)
13. Coiled Tubing Industry Statistics Worldwide, 2016. Coiled Tubing Rig Count, URL: <http://www.icota.com/ctrigcount.htm> (22.8.2018.)
14. Consolidated Rig Works, LP, 2018. Control Cabins, URL: <http://crwlp.com/WordPress/wp-content/uploads/2014/02/Coiled-Tubing-Equipment-Crane-Trailer-Unit-Electric-Over-Hydraulic-Controls-Cabin-Console.jpg> (02.05.2018.)
15. D Day Overlord, 2018. URL: [http://www.dday-overlord.com/wp-content/uploads/2016/02/pluto\\_mep-1.jpg](http://www.dday-overlord.com/wp-content/uploads/2016/02/pluto_mep-1.jpg) (24.04.2018.)
16. Drilling Contractor, 2018. Real-time capabilities, inspection systems fine-tune coiled tubing, URL: <http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2013/03/web-Argus-1.jpg> (02.05.2018.)
17. EFD Induction, 2018. Welding with induction heating, URL: <http://www.efd-induction.com/~media/Images/Applications/Welding4.ashx> (24.04.2018.)
18. Georg, 2018. Slitting lines, URL: <https://www.georg.com/fileadmin/images/products/finishing-lines/slitting-lines-components/slitting-shear/slitting-shear-1-half.jpg> (24.04.2018.)
19. GOES, 2015.a. Coiled Tubing Reels, URL: [http://www.goes-well.com/wp-content/uploads/2015/05/Reel\\_2.jpg](http://www.goes-well.com/wp-content/uploads/2015/05/Reel_2.jpg) (01.05.2018.)



20. GOES, 2015.b. Coiled Tubing Units, URL: [http://www.goes-well.com/wp-content/uploads/2015/04/Coiled\\_Tubing6\\_832\\_468.jpg](http://www.goes-well.com/wp-content/uploads/2015/04/Coiled_Tubing6_832_468.jpg) (01.05.2018.)
21. Halliburton, 2015. V45K HP Coiled Tubing Injector, URL: [http://www.halliburton.com/public/bc/contents/Data\\_Sheets/H06603.pdf](http://www.halliburton.com/public/bc/contents/Data_Sheets/H06603.pdf) (02.05.2018.)
22. HKM, 2018. Steel Slabs URL: [https://www.hkm.de/fileadmin/003\\_Leistungen/Brammen/IMG\\_1046\\_RAW\\_PSE.jpg](https://www.hkm.de/fileadmin/003_Leistungen/Brammen/IMG_1046_RAW_PSE.jpg) (24.04.2018.)
23. Imperial War Museums, 2018. Pluto (Pipe Line Under The Ocean), URL: <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/205195436> (24.04.2018.)
24. Jason Oil & Gas Equipment LLC, 2018. Coiled Tubing Manufacturing, URL: [https://i.ytimg.com/vi/6BzG\\_L2aVdo/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/6BzG_L2aVdo/maxresdefault.jpg) (24.04.2018.)
25. Keen Ovens, 2018. How Steel is Made: a Brief Summary of a Blast Furnace, URL: <https://i.ytimg.com/vi/UNmeQXM6DEU/hqdefault.jpg> (02.06.2018.)
26. National Oilwell Varco, 2018.a. Raw Materials, URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/Quality\\_Tubing/Our\\_Product\\_Difference/Manufacturing\\_Process/SteelMill3\(1\).jpg](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/Quality_Tubing/Our_Product_Difference/Manufacturing_Process/SteelMill3(1).jpg) (01.05.2018.)
27. National Oilwell Varco, 2018.b. Bias Weld URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/Quality\\_Tubing/Our\\_Product\\_Difference/Manufacturing\\_Process/bias-weld-coiled-tubing-1.jpg](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/Quality_Tubing/Our_Product_Difference/Manufacturing_Process/bias-weld-coiled-tubing-1.jpg) (01.05.2018.)
28. National Oilwell Varco, 2018.c. Hydra Rig, URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/Hydra\\_Rig/Coiled\\_Tubing\\_Equipment/Coiled\\_Tubing\\_Injectors/CT-Injector-Hydra-Rig-660.jpg](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/Hydra_Rig/Coiled_Tubing_Equipment/Coiled_Tubing_Injectors/CT-Injector-Hydra-Rig-660.jpg) (02.05.2018.)

29. National Oilwell Varco, 2018.d. Depth Measuring System (DMS), URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/CTES/Engineered\\_Products/CT-Depth-Measuring-System.jpg?n=7055](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/CTES/Engineered_Products/CT-Depth-Measuring-System.jpg?n=7055) (18.06.2018.)
30. National Oilwell Varco, 2018.e. Side Door Stripper Packer, URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/TOT/Coiled\\_Tubing\\_Pressure\\_Control/DSA6SideDoor%20\(2\).jpg?n=6181](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/TOT/Coiled_Tubing_Pressure_Control/DSA6SideDoor%20(2).jpg?n=6181) (16.06.2018.)
31. National Oilwell Varco, 2018.f. Compact Coiled Tubing Unit, URL: [https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion\\_and\\_Production\\_Solutions/Intervention\\_and\\_Stimulation\\_Equipment/Coiled\\_Tubing/Hydra\\_Rig/Coiled\\_Tubing\\_Equipment/Coiled\\_Tubing\\_Units/ISE\\_Hydra\\_Rig\\_Compact\\_CT\\_Unit.jpg](https://www.nov.com/uploadedImages/Content/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Intervention_and_Stimulation_Equipment/Coiled_Tubing/Hydra_Rig/Coiled_Tubing_Equipment/Coiled_Tubing_Units/ISE_Hydra_Rig_Compact_CT_Unit.jpg) (18.06.2018.)
32. OCTG Pipes Products, 2015.a. Coiled Tubing, Current Advanced Operation Technology In OCTG Tubing URL: <http://www.octgproducts.com/uploads/allimg/coiled-tubing-production.jpg> (02.05.2018.)
33. OCTG Pipes Products, 2015.b. What is coiled tubing, URL: <http://www.octgproducts.com/uploads/allimg/what-is-coiled-tubing.jpg> (02.05.2018.)
34. Petrowiki, 2012.a. History of coiled tubing technology, URL: [https://petrowiki.org/History\\_of\\_coiled\\_tubing\\_technology](https://petrowiki.org/History_of_coiled_tubing_technology) (22.8.2018.)
35. Petrowiki, 2012.b. PEH: Coiled tubing Well Intervention and Drilling Operations, URL: [http://petrowiki.org/PEH:Coiled-Tubing\\_Well\\_Intervention\\_and\\_Drilling\\_Operations](http://petrowiki.org/PEH:Coiled-Tubing_Well_Intervention_and_Drilling_Operations) (03.05.2018.)

36. Power Hydraulics Engineering and Manufacturing, 2018. Tubing Gripper Blocks, URL: <http://power-hydraulics.com/wp-content/uploads/2013/02/PH-versa-blocks-2-416x400.jpg> (15.06.2018.)
37. Schlumberger Oilfield Glossary, 2018.a. Bias weld, URL: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bias\\_weld.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bias_weld.aspx) (15.6.2017.)
38. Schlumberger Oilfield Glossary, 2018.b. Bias weld, URL: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/b/en/~media/PublicMedia/OGLE01001.aspx> (15.06.2018.)
39. Schlumberger Oilfield Glossary, 2018.c. Accelerator, URL: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/a/accelerator.aspx> (31.07.2018.)
40. Stewart and Stevenson, 2018. Trailer mounted coiled tubing units, URL: <http://www.stewartandstevenson.com/assets/galleries/237/tt-100-xc-coiled-tubing-2.png> (16.06.2018.)
41. Tech Target, 2000. Coaxial cable, URL: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/coaxial-cable-illustrated> (20.8.2018.)
42. Webco Industries, 2018. Coiled Tubing, URL: [http://www.webcotube.com/sites/default/files/BasicContent\\_Coiled\\_0.jpg](http://www.webcotube.com/sites/default/files/BasicContent_Coiled_0.jpg) (02.05.2018.)

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

---

Alen Paljušić