

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Kuzmić
0035193134

Zagreb, 2016. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragan Žeželj, dipl. ing.

Student:

Nikola Kuzmić
0035193134

Zagreb, 2016. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Draganu Žeželju, dipl. ing. na strpljenju i svesrdnoj pomoći te dr. sc. Zoranu Domitranu, dipl. ing. na strpljenju te pruženoj literaturi i pomoći u pisanju ovog rada.

Isto tako, posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, sestri te djedu i baki na bezuvjetnoj podršci tijekom studiranja.

Nikola Kuzmić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Kuzmić**

Mat. br.: 0035193134

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design concept of a testing device for composite shafts**

Opis zadatka:

Primjena polimernih kompozita razvojem materijala i unapređivanjem tehnologija prerade otvara nove mogućnosti u izradi strojnih elemenata za prijenos snage i gibanja. Među najvažnijim elementima za prijenos okretnog momenta i snage su vratila. Kod većih dimenzija vratila pokazuju se određene prednosti primjenom kompozitnih materijala u odnosu na čelik te dolaze do izražaja kao vrlo dobra alternativa za pojedine vrste aplikacija. Primjenom određenih kompozitnih polimera i tehnologije prerade istih moguće je dobiti tražena mehanička svojstva vratila koja mogu osigurati pravilan rad sustava, posebice u slučajevima posebnih uvjeta rada, smanjenja mase, te visokih brzina vrtnje. Kompozitna vratila bitno se konstrukcijski razlikuju od čeličnih za istu primjenu i sadrže kompleksniju strukturu, što utječe na cijenu izrade takvih proizvoda.

Potrebno je dati pregled postojećih konstrukcijskih rješenja kompozitnih vratila obzirom na primjenu te ukazati koji problemi se mogu očekivati kod pojedine primjene takvih vratila. Opisati razlike u konstrukcijskim izvedbama te opisati elemente kompozitnog vratila. Navesti koji elementi konstrukcije su važni kod ispitivanja kompozitnih vratila te dati opis parametara važnih kod ispitivanja obzirom na primjenu. Prikazati elemente mjernog lanca kod ispitivanja vratila uz dane skice mogućih rješenja uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila. Prilikom prikaza mogućih rješenja koristiti elemente i sklopove koje je moguće nabavit na tržištu.

Računalni model odabranog idejnog rješenja uređaja izraditi u 3D CAD sustavu.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

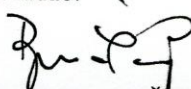
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.


2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:


doc. dr. sc. Dragan Žeželj

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

Sadržaj

Sadržaj.....	I
Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis oznaka.....	VI
Sažetak	VII
1. Uvod	1
1.1 Kompozitni materijali	1
1.2 Vlasknima ojačani kompozitni materijali.....	1
1.3 Općenito o kompozitnim vratilima	2
1.4 Primjena kompozitnih vratila.....	5
1.5 Vrste spojeva kompozit – metal.....	6
2. Konstrukcijska rješenja spojeva kompozit – metal	8
3. Konstruiranje kompozitnog vratila	10
3.1 Odabir vrste materijala	10
3.1.1 Staklena vlakna	10
3.1.2 Ugljična vlakna	12
3.1.3 Aramidna vlakna	13
3.2 Smole.....	14
3.3 Tehnologija namatanja	16
3.4 Odabir vrste spoja kompozit – metal.....	17
3.4.1 Kriteriji za odabir vrste spoja kompozit – metal	17
3.4.2 Mehanički spojevi	18
3.4.3 Adhezijski spojevi.....	20
3.4.4 Mehaničko – adhezijski spojevi	22
3.5 Vrste opterećenja.....	23
3.5.1 Opterećenje na vratilo	23
3.5.2 Opterećenje u spoju.....	25
3.6 Odabir ljepila.....	28
4. Prikaz konstrukcijskih značajki važnih kod ispitivanja vratila – Lista zahtjeva	31
5. Pregled dostupnih uređaja za ispitivanje vratila	32
6. Sigurnosni aspekti koje je potrebno ostvarit kod uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila	37
7. Elementi mjernog lanca	39
8. Funkcijska dekompozicija	42
9. Morfološka matrica.....	43
10. Shematski prikaz koncepata	46
10.1 Koncept 1	46

10.2 Koncept 2	48
10.3 Koncept 3	49
10.4 Prikaz odabranih rješenja iz morfološke matrice	51
11. Vrednovanje koncepata	54
12. Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila	55
13. Zaključak	58
14. Literatura.....	59
15. Prilozi.....	60

Popis slika

<i>Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita:</i>	1
<i>Slika 2. Ilustracija vlaknima ojačanog kompozita</i>	2
<i>Slika 3. Primjer kompozitnog vratila</i>	3
<i>Slika 4. Dijagram ovisnosti duljine i brzine okretanja vratila o torzijskoj kritičnoj brzini vrtnje [3]</i>	3
<i>Slika 5. Položaj vratila prilikom frontalnog sudara [5]</i>	5
<i>Slika 6. Primjena kompozitnih vratila:</i>	6
<i>Slika 7. Ilustracija spojeva polimer – metal:</i>	6
<i>Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva [7]</i>	9
<i>Slika 9. Shematski prikaz osnovnog tipa kompozitnog vratila</i>	10
<i>Slika 10. Staklena vlakna</i>	11
<i>Slika 11. Struktura i vanjski izgled ugljičnih vlakana</i>	13
<i>Slika 12. Aramid</i>	13
<i>Slika 13. Utjecaj vremena absorpcije vode poliesterske i epoksidne smole na</i>	16
<i>Slika 14. Postupak namatanja (engl. Filament winding)</i>	16
<i>Slika 15. Ilustracija namatanja trake na model</i>	17
<i>Slika 16. Delaminacija</i>	19
<i>Slika 17. Primjer mehaničkog spoja</i>	19
<i>Slika 18. Presjek mehaničkog spoja [8]</i>	20
<i>Slika 19. Primjer adhezijskog spoja</i>	20
<i>Slika 20. Presjek adhezijskog spoja [8]</i>	21
<i>Slika 21. Rovašena glavina s prirubnicom</i>	22
<i>Slika 22. Primjer mehaničko - adhezijskog spoja</i>	23
<i>Slika 23. Vratilo sa kardanskim spojevima</i>	25
<i>Slika 24. Vratilo sa kardanskim spojevima u protu fazi</i>	26
<i>Slika 25. Prikaz raspodjele smičnog naprezanja na mjestu spoja [13]</i>	27
<i>Slika 26. Opterećenje na spoju metala i kompozita</i>	28
<i>Slika 27. Uređaj za statičko ispitivanje vratila</i>	32
<i>Slika 28. Jedinica za savijanje i uvijanje vratila</i>	32
<i>Slika 29. Dinamička kidalica tvrtke Blum - Novotest</i>	33
<i>Slika 30. Ispitni uređaj tvrtke Strama – MPS</i>	34
<i>Slika 31. Ispitni uređaj tvrtke MTS</i>	35
<i>Slika 32. Primjer zaštitne ograde uređaja</i>	37
<i>Slika 33. Primjer senzora i prekidača za brzo isključivanje uređaja</i>	38
<i>Slika 34. Ponašanje materijala vratila pri opterećenju momentom torzije</i>	39
<i>Slika 35. Primjer laserskog tahometra</i>	40
<i>Slika 36. Infracrveni senzor temperature</i>	40
<i>Slika 37. Osjetnik vibracija</i>	41
<i>Slika 38. Shematski prikaz ispitnog uređaja s zatvorenim tokom snage, Koncept 1:</i>	46
<i>Slika 39. Shematski prikaz mjerenja progiba:</i>	47
<i>Slika 40. Shematski prikaz ispitnog uređaja s otvorenim tokom snage, Koncept 2:</i>	48
<i>Slika 41. Shematski prikaz ispitnog uređaja s otvorenim tokom snage, Koncept 3</i>	49
<i>Slika 42. Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila</i>	55
<i>Slika 43. Izometrijski prikaz idejnog rješenja uređaja za ispitivanje vratila</i>	56
<i>Slika 44. Detalj pogonskog dijela uređaja</i>	57

Slika 45. Detalj gonjenog dijela uređaja 57

Popis tablica

<i>Tablica 1. Svojstva staklenih vlakana [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 2. Usporedba relativnih svojstava vlakana od različitih materijala [9].....</i>	<i>14</i>
<i>Tablica 3. Relativna svojstva poliesterskih i epoksidnih smola [9]</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 4. Popis dostupnih ljepila.....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 5. Lista automobila sa specifikacijom okretnog momenta [16].....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 6. Morfološka matrica.....</i>	<i>45</i>
<i>Tablica 7. Morfološka matrica s elementima korištenim u konstruiranju koncepata:</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 8. Vrednovanje koncepata.....</i>	<i>54</i>

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/m^2	Modul elastičnosti
E_x	N/m^2	Prosječni modul elastičnosti u aksijalnom smjeru vratila
E_h	N/m^2	Prosječni modul elastičnosti u smjeru namotavanja kompozita
f_0	Hz	Prirodna frekvencija vratila
G	GPa	Modul smičnosti
I_y	m^4	Moment tromosti oko osi y
I_z	m^4	Moment tromosti oko osi z
L	m	Duljina vratila
n	min^{-1}	Broj okretaja vratila
N_K	min^{-1}	Kritična brzina vrtnje vratila
p	Hz	Prva prirodna frekvencija vratila
P	kW	Snaga dovođena na kardanski spoj
r_m	m	Radijus vratila
r_u	m	Unutarnji polumjer vratila
r_v	m	Vanjski polumjer vratila
t	m	Debljina stjenke vratila
T	Nm	Okretni moment na kardanskom spoju
$T_{f,max}$	Nm	Okretni moment uslijed kojeg dolazi do izvijanja vratila
$T_{t,max}$	Nm	Okretni moment uslijed kojeg dolazi do pucanja vratila
τ_{xy}	N/m^2	Dopušteno smično naprezanje među slojevima vratila
ρ	kg/m^3	Gustoća materijala
ω	rad/s	Kutna brzina

Sažetak

Primjena polimernih kompozita razvojem materijala i unapređivanjem tehnologija prerade otvorila je nove mogućnosti u izradi strojnih elemenata za prijenos snage i gibanja. Među najvažnijim elementima za prijenos snage i okretnog momenta su vratila. U ovom radu dan je opis i podjela kompozitnih materijala. Navedene su karakteristike kompozitnih vratila, njihova primjena i postojeća rješenja spojeva kompozit – metal.

Nadalje, ovim radom dan je pregled u pojedinosti konstruiranja kompozitnog vratila kao što su odabir vrste materijala vratila, odabir smole, tehnologija namatanja, odabir vrste spoja kompozit – metal s obzirom na vrstu opterećenja vratila, odnosno primjenu, pregled postojećih konstrukcijskih rješenja kompozitnih vratila obzirom na primjenu te problemi koji se mogu očekivati kod pojedine primjene takvih vratila.

U ovom radu dan je prikaz konstrukcijskih značajki važnih kod ispitivanja vratila, opis i kinematska struktura ispitnih postolja te sigurnosni aspekti koje je potrebno ostvariti kod uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila. Na temelju prikaza konstrukcijskih značajki važnih kod ispitivanja vratila određeni su elementi mjernog lanca uređaja za ispitivanje vratila. Nadalje, daljnjim proučavanjem postojećih ispitnih uređaja uočeno je da ne postoje rješenja ispitnih uređaja koja bi mogla potkrijepiti sve varijante opterećenja te su ispitni uređaji rađeni prema namjeni i ispitnom području.

Ključne riječi: kompozitna vratila, spoj kompozit – metal, uređaj za ispitivanje vratila

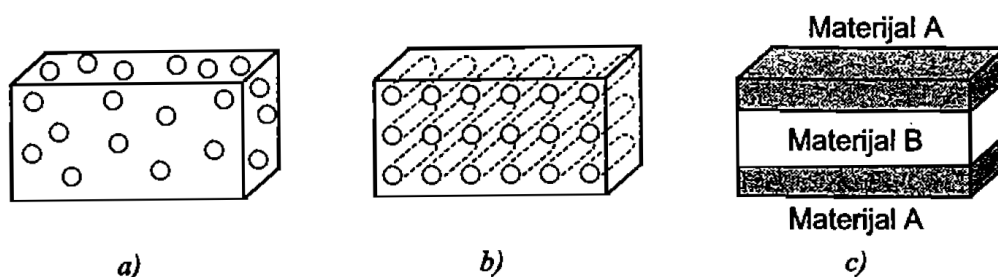
1. Uvod

1.1 Kompozitni materijali

Kompozitni materijali su materijali dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Time se mogu postići neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, mala težina, otpornost visokim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska). [1]

Osnovna podjela kompozitnih materijala svodi se prema tipu baznog materijala (matrice) kompozita, a dijeli se na metalne, keramičke i polimerne. Kompoziti isto tako mogu biti metalno – metalni, metalno – keramički, metalno – polimerni, keramičko – polimerni, keramičko – keramički, polimerno – polimerni i polimerni – metalni.

Nadalje, prema strukturi kompozitni materijali mogu se podijeliti na kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite, slojevite kompozite i sendvič konstrukcije. U ovom radu detaljnije se razrađuju vlaknima ojačani kompoziti zbog najčešće primjene u strojnim dijelovima za prijenos okretnog momenta.



Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita:

(a) kompoziti s česticama, (b) kompoziti s vlaknima, (c) slojeviti kompoziti [1]

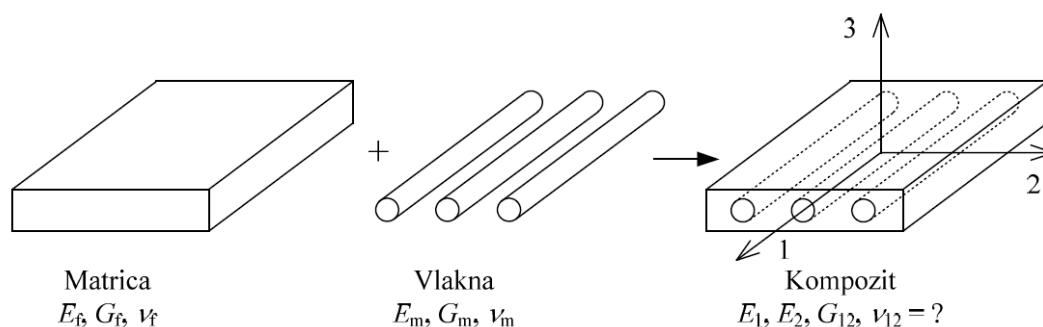
Svojstva kompozita ovise o:

1. svojstvima matrice i ojačala
2. veličini i rasporedu konstituenata
3. volumnom udjelu konstituenata
4. obliku konstituenata
5. prirodi i jakosti veze među konstituentima

1.2 Vlaknima ojačani kompozitni materijali

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja povećanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja omjera čvrstoće i gustoće uslijed ugradnje (armiranja) vlakana s visokom vlačnom čvrstoćom u mekaniju, duktilnu matricu (Slika 2.). Materijal matrice ima namjenu da prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, gdje je uloga vlakana da nose veći dio opterećenja.

Vlakna kod vlaknima ojačanih kompozita se oblikuju u niti, viskere i žice. Neke od najraširenijih vrsta vlakana su tekstilna staklena vlakna, ugljična (karbonska) vlakna, aramidna vlakna te borna vlakna.



Slika 2. Ilustracija vlaknima ojačanog kompozita

Vlaknima ojačani kompoziti koriste se u zrakoplovnoj, svemirskoj, automobilskoj, medicinskoj, rekreacijskoj i infrastrukturnoj industriji. Sve vrste kompozitnih vratila izrađuju se upravo iz vlaknima ojačanih kompozita posebnim tehnikama namotavanja o kojima će se govoriti kasnije.

1.3 Općenito o kompozitnim vratilima

Kompozitni materijali pronašli su široku primjenu u suvremenim konstrukcijama visoko opterećenih i laganih strojnih dijelova. Sve češće se upotrebljavaju u izradi vratila za sportske i automobile visokih performansi ponajviše zbog svoje čvrstoće na uvijanje i vlak, ali i male mase koja omogućava izradu dužih vratila s većom torzijskom kritičnom brzinom vrtnje.

Kompozitni materijali koriste se u:

- automobilskoj industriji: vratila, lamele spojki, blokovi motora, podvozje, kočnice, rezervoari goriva, ležajevi za upravljački sustav, odbojnici, karoserija, vrata, itd.
- svemirskoj industriji: daljinski upravljane robotske ruke, antene visokog pojačanja, rebra i potpornji antene, itd.
- pomorskoj industriji: lopatice elise (propelera), ventilatori i puhala, kućišta reduktora, ventili i cjedila, itd.
- kemijskoj industriji: kompozitni spremnici za tekući plin i kemikalije, podzemni spremnici, itd.
- avioindustriji: vratila, zakrilca, ležajevi, vrata kotača za slijetanje, podovi i ploče zrakoplova, itd.
- sportskoj opremi: teniski reketi, palice za golf, udice, rame bicikala, itd. [2]

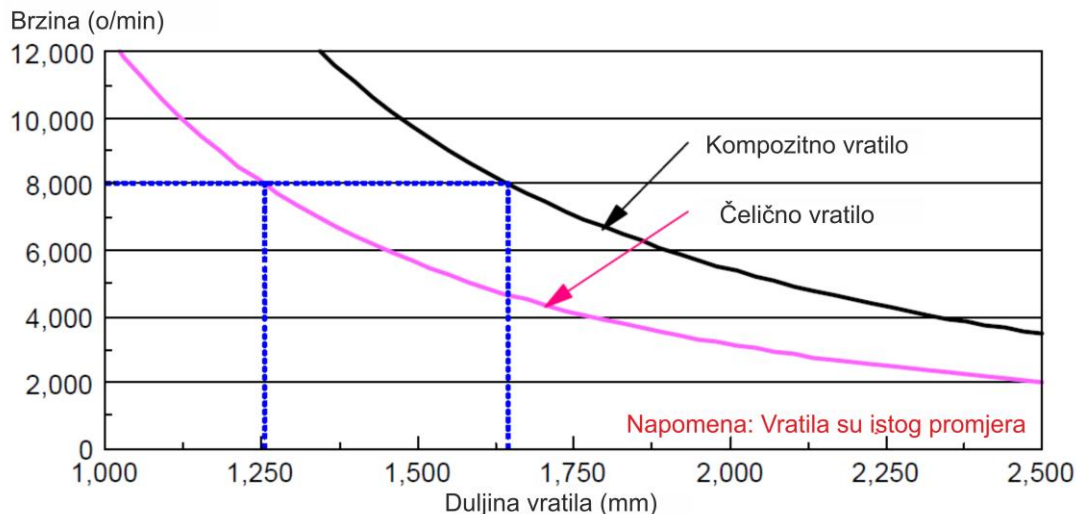
Općenito, kompozitno vratilo je strojni element kojim se prenosi rotacijskog gibanje i zakretni moment, odnosno snaga s pogonskog na gonjeni dio stroja. Vratila se koriste za spajanje

komponenti pogonskog sustava koje ne mogu biti spojene direktno zbog prevelike udaljenosti ili zbog potrebnog osiguravanja relativnog pomaka među njima. Cilindrično tijelo vratila izrađeno je od kompozitnog materijala, dok je prirubnica (spoj vratila s pogonskim ili gonjenim dijelom stroja) napravljena od metala. Spoj kompozitnog i metalnog dijela vratila detaljnije će se razraditi u nastavku ovog rada.



Slika 3. Primjer kompozitnog vratila

Kompozitna vratila mogu biti punog poprečnog presjeka ili šuplja. Puna vratila omogućavaju prijenos većih okretnih momenata, no istovremeno zbog povećane mase dolazi do spuštanja torzijske kritične brzine vrtnje. Vanjski plašt vratila prenosi najveći udio opterećenja, dok unutarnji slojevi prenose manji dio, pa je stoga upotreba šupljih vratila najbolji odabir. [3]



Slika 4. Dijagram ovisnosti duljine i brzine okretanja vratila o torzijskoj kritičnoj brzini vrtnje [3]

Uz to što imaju visoku torzijsku čvrstoću i malu masu, kompozitna vratila pokazala su dobra svojstva kod prenošenja udarnih opterećenja. Naime, tijekom eksploatacije kompozitnog vratila u području udarnog opterećenja dolazi do kutnog zakreta (elastične deformacije) vratila što ima za posljedicu apsorpciju udarnog opterećenja na vratilo, a time se smanjuje i udarno opterećenje na cijeli pogonski sustav što rezultira ujednačenijim naprezanjima koja su povoljnija na radni vijek pogonskog sustava od skokovitih naprezanja. [4]

Prednosti kompozitnih vratila u odnosu na metalna vratila [4]:

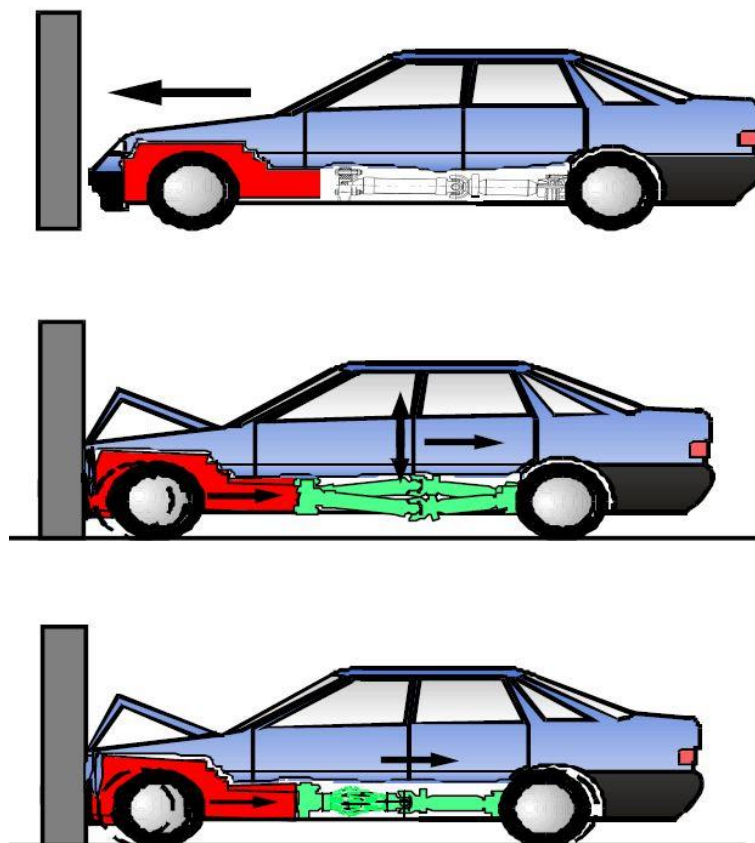
- manja težina
- veća čvrstoća
- progresivan mehanizam zaribavanja (pruža upozorenje prije pucanja)
- manja potrošnja snage (manje snage je potrebno za okretanje vratila zbog manje težine vratila)

Nedostaci kompozitnih vratila u odnosu na metalna vratila [2]:

- matematički opis mehaničke strukture je složeniji
- konstruiranje je složenije (zbog ovisnosti svojstava o orijentaciji vlakana)
- proizvodnja je skupa
- popravak je složen i skup

Važno je naglasiti kako kompozitna vratila imaju vrlo dobru otpornost na koroziju, što smanjuje troškove održavanja i produžuje radni vijek. [4]

Rastući interes javnosti za sigurna vozila potaknuo je automobilsku industriju i dobavljače dijelova u automobilskoj industriji na konstruiranje komponenti koje će biti sigurne prilikom sudara. Pod time se smatra kako niti jedna komponenta automobila tijekom sudara ne smije predstavljati opasnost za putnike u vozilu. Dobar primjer je pogonsko vratilo kod automobila s zadnjim ili sva četiri pogona prikazano zelenom bojom na *Slici 5*.



Slika 5. Položaj vratila prilikom frontalnog sudara [5]

Pri frontalnom sudaru pogonsko vratilo prenosi sile s bloka motora na zadnju osovinu. Mnoga današnja vozila koriste dvodijelno pogonsko vratilo koje se može na svojem središnjem spoju izvinuti u bilo kojem smjeru, ovisno o položaju spoja prilikom sudara. To predstavlja opasnost za putnike u vozilu jer vratilo može prodrijeti u kabinu vozila i ozlijediti putnike.

Kako bi se povećala sigurnost putnika pogonska vratila konstruiraju se s ciljem postizanja definiranog ponašanja aksijalnih sila i pomaka prilikom sudara, a samim time i kontrolirane apsorpcije energije. Kompozitna vratila pokazala su se kroz ispitivanja kao nova mogućnost za postizanje željene apsorpcije energije u automobilske industriji. [5]

1.4 Primjena kompozitnih vratila

Kompozitna vratila koriste se za prenošenje širokog spektra opterećenja nastalih uslijed prenošenja torzijskog momenta. Upravo iz tog razloga pronašla su i svoju široku primjenu koju prikazuju sljedeće slike.

Kompozitna vratila koriste za prenošenje relativno malih dinamičkih momenata uvijanja kod automobila pa sve do vrlo velikih momenata kod željezničkih vozila i brodova.

a)



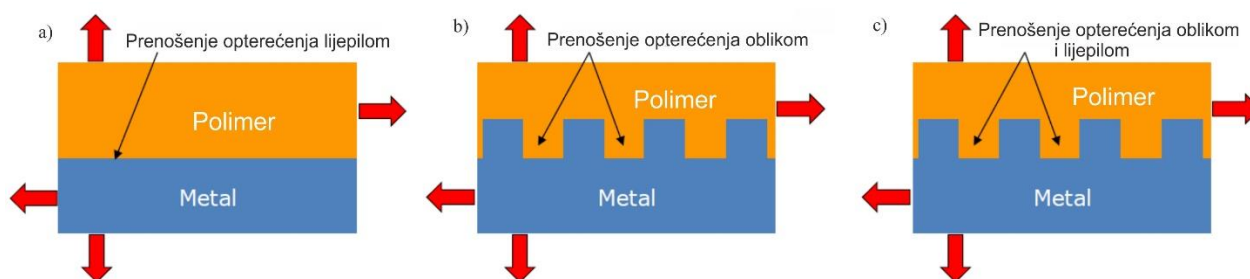
Slika 6. Primjena kompozitnih vratila:

a) Pomorska industrija, b) automobilska industrija, c) željeznička industrija

1.5 Vrste spojeva kompozit – metal

Spoj kompozitnog vratila sa radnim strojem najčešće se izrađuje od čelika ili od nekog metala, ovisno o primjeni. Samim spajanjem dvaju materijala, kompozita i metala, nastaje kritično mjesto na vratilu. Kod visoko opterećenih vratila dolazi do nejednake raspodjele opterećenja po svim slojevima kompozita. Uz to, različita mehanička svojstva kompozita i metala stvaraju dodatna kritična mjesta. [6]

Spojevi kompozitnih materijala mogu se podijeliti u dvije glavne skupine: mehaničke i adhezivne spojeve. Mehanički spojevi prenose opterećenja oblikom, a adhezivni spojevi koriste razne vrste lijepila kako bi spojili dva dijela. Uz mehaničke i adhezivne spojeve često se koristi i kombinacija mehaničko – adhezivnih spojeva (Slika 7.).



Slika 7. Ilustracija spojeva polimer – metal:

a) adhezivni spoj, b) mehanički spoj, c) mehaničko – adhezivni spoj

Mehanički spojevi mogu se podijeliti na vijčane i križne spojeve. Kod vijčanih spojeva spoj se ostvaruje vijcima i maticama, no mogu se koristiti i razne vrste zatika dok križni spojevi koriste principe prenošenja opterećenja oblikom.

Adhezivno spajanje postaje sve raširenije u praktičnoj upotrebi za spajanje dva različita materijala u automobilskoj, zrakoplovnoj, elektroničkoj i medicinskoj industriji zamjenjujući time konvencionalne metode spajanja poput zavarivanja, vijčanih spojeva ili zakovanih spojeva. Razlog tome je što adhezivno spajanje, uz uvjet da je spoj pravilno konstruiran, pruža brojne konstrukcijske, ali i ekonomske prednosti.

Prilikom konstruiranja adhezivnih spojeva potrebno je posebnu pažnju posvetiti vrsti opterećenja spoja, pošto adhezivni spoj izvrsno podnosi smično opterećenje, no loše podnosi normalno vlačno opterećenje. Neke od prednosti adhezivnog spoja, uz uvjet da je povoljno opterećen (smično opterećenje), su jednolikija raspodjela naprezanja po površini spoja, nema potrebe za bušenjem rupa te ušteda materijala.

No, adhezivni spojevi imaju i svoje mane, kao što su negativne posljedice na čvrstoću spoja pri radu u okolini sa povišenom temperaturom i vlagom, posebice prilikom konstantnog dugotrajnog naprezanja. Usto, u obzir se mora uzeti i puzanje materijala, odnosno postepeno rastezanje spoja u uvjetima dugotrajnog statičkog opterećenja pri povišenim temperaturama. [4]

2. Konstrukcijska rješenja spojeva kompozit – metal

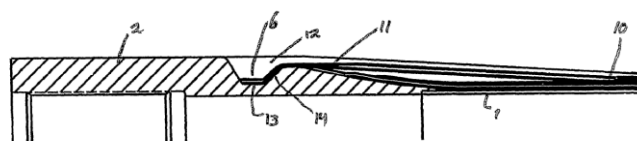
U ovom poglavlju govoriti će se o postojećim konstrukcijskim rješenjima kod spajanja kompozitnog materijala i metala s naglaskom na primjenu spoja kod kompozitnih vratila. Kao primjeri će se prikazati neka rješenja zaštićena patentima.

Bjørn Paulshus daje spoj kompozita i metala koji se temelji na korištenju mehaničkog principa prenošenja opterećenja, odnosno spoj se sastoji od sustava utora na kraju kompozitnog vratila koji se uklješte s metalom i time postižu mehanički spoj. (Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva (a))

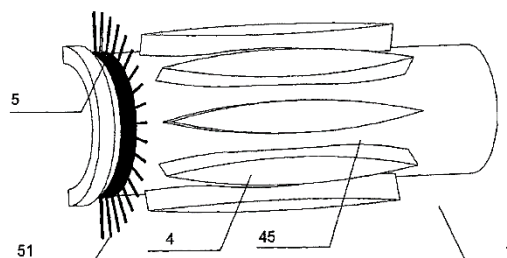
Gustafson i Vedvik predložili su spoj kompozita i metala kod kojeg se kompozitni materijal namata oko metalnih peraja na glavini i time postižući uklještenje. Ovo je vrlo napredan spoj jer koristi kompliciranu geometriju i posebne tehnike namatanja kompozita kako bi se izradio. (Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva (b))

Fahey i Mueller konstruirali su spoj kompozita i metala kod kojeg su aksijalna vlakna namotana na dugu cilindričnu jezgru (11) zajedno s metalnom glavinom (12). Slojevi aksijalnih vlakna su privezani obručom od vlakana namatanih pod kutom od 90° u utoru na krajevima vratila (7). Aksijalna vlakna se zatim odrežu na kraju modela osovine koja služi za namatanje vlakana i preklope nazad na vratilo gdje se zalijepe i na kraju očvrstu. Ovaj spoj osigurava visoka aksijalna opterećenja. Metalna glavina (12) ima narezan navoj što omogućava prihvat raznovrsnih spojnih elemenata. (Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva (c))

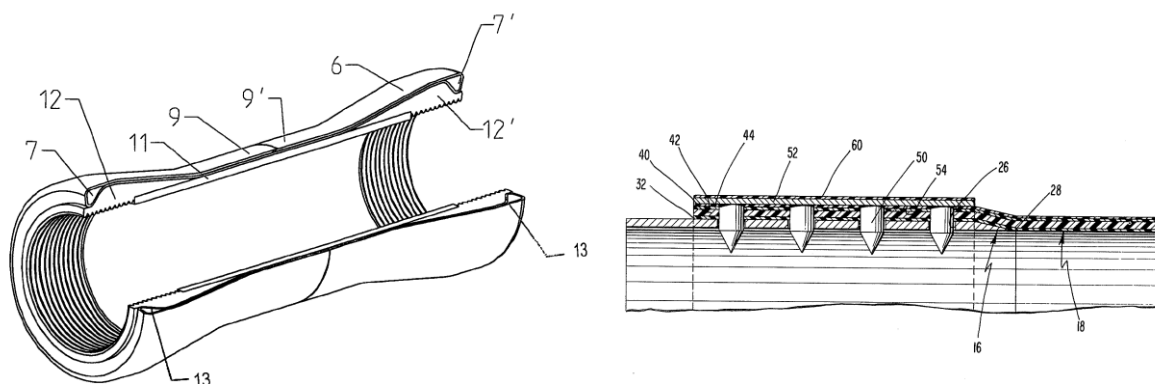
Yates i Presta daju rješenja spoj kod kojeg se prilikom namatanja kompozitnih vratila u provrte na glavini umeću zatici odmah po namatanju dok je vratilo u procesu izrade (polimerizacije). Zatim se druga cijev namata sa vanjske strane preko zatika koji su time osigurani od ispadanja. Vratilo se po završetku namatanja suši i time se ostvaruje nerastavljivi spoj zaticima u materijalu. (Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva (d))



a) Paulshus-ov patent



b) Gustafson i Vedvik



c) Fahey i Mueller

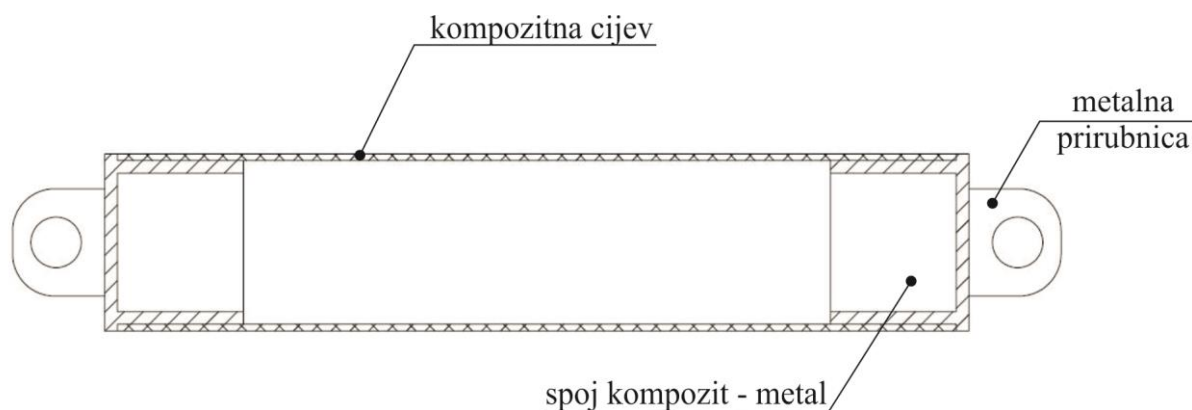
d) Yates i Presta

Slika 8. Patentirana konstrukcijska rješenja spojeva [7]

3. Konstruiranje kompozitnog vratila

Prilikom konstruiranja različitih strojnih dijelova nameću se određeni zahtjevi koje konstruktor mora ispuniti kako bi strojni dio bio funkcionalan. Ti zahtjevi se najčešće odnose na vrste opterećenja strojnog dijela, gabaritne mjere i budžet kojim raspolažemo. Kako bi vratilo bilo funkcionalno ono mora ispunjavati sljedeće zahtjeve:

- mora prenositi okretni moment s mjenjačke kutije na diferencijal
- mora izdržati brzinu vrtnje koju zahtjeva vozilo
- mora biti u pogonu pri konstantnom mijenjanju kuta između mjenjačke kutije, diferencijala i poluosovina
- duljina vratila mora se prilagođavati prilikom prijenosa okretnog momenta [3]



Slika 9. Shematski prikaz osnovnog tipa kompozitnog vratila

3.1 Odabir vrste materijala

U proizvodnji kompozitnih vratila koristi se nekoliko vrsta vlakana. Najčešće upotrebljavana su staklena, ugljična ili aramidna (kevlarska) vlakna. Najbolja se vlakna za određenu primjenu odabiru na temelju zahtjeva u čvrstoći, krutosti, otpornosti na koroziju i budžetu.

3.1.1 Staklena vlakna

Staklena vlakna (engl. Fiber glass) su najstarija i najčešće korištena te najjeftinija vrsta vlakana. Napravljena su od vrlo finih staklenih niti, a odlikuju se malom težinom, dobrom vlačnom i tlačnom čvrstoćom, otpornošću na oštećenja i dinamička periodička naprezanja. Iako im je čvrstoća i krutost nešto manja od ugljičnih i aramidnih vlakana, staklena su vlakna manje krhka i znatno jeftinija. [8]



Slika 10. Staklena vlakna

Postoji nekoliko vrsta staklenih vlakana koja se koriste za izradu kompozitnih vratila, a to su slijedeća: A – glass, AR – glass, C – glass, D – glass, E – glass, ECR – glass, R – glass, S – glass, S-2 – glass.

Najčešće korištena staklena vlakna su E – glass i S – glass. E – glass staklena vlakna odlikuju se niskom cijenom, visokom čvrstoćom i krutošću, relativno niskom gustoćom, nezapaljivošću, otpornošću na povišenu temperaturu i utjecaj kemikalija, relativno neosjetljivošću na vlagu te su dobar električni izolator. No, E – glass staklena vlakna imaju i svoje nedostatke, kao što su nizak modul elastičnosti, relativno mala otpornost na umor materijala, veća gustoća u odnosu na karbonska i aramidna vlakna te samoabrazivnost koja dovodi do smanjene čvrstoće.

S – glass staklena vlakna su nastala dodavanjem silicijevog dioksida (SiO_2) E – glass materijalu kako bi se postigla bolja svojstva. Ona se sastoje od 65% silicijevog dioksida (SiO_2), 25% aluminijskog oksida (Al_2O_3) te 10% magnezijevog oksida (MgO). Staklena vlakna od S – glass materijala pružaju najbolja svojstva od svih vrsta staklenih vlakana, odnosno vrlo visoku vlačnu i tlačnu čvrstoću, odličnu otpornost na visoke temperature te visoku otpornost na udare i udarna opterećenja. [8]

Prikazane su vrijednosti gustoće, vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i produljenja u postotcima različitih materijala korištenih za izradu staklenih vlakana (Tablica 1.).

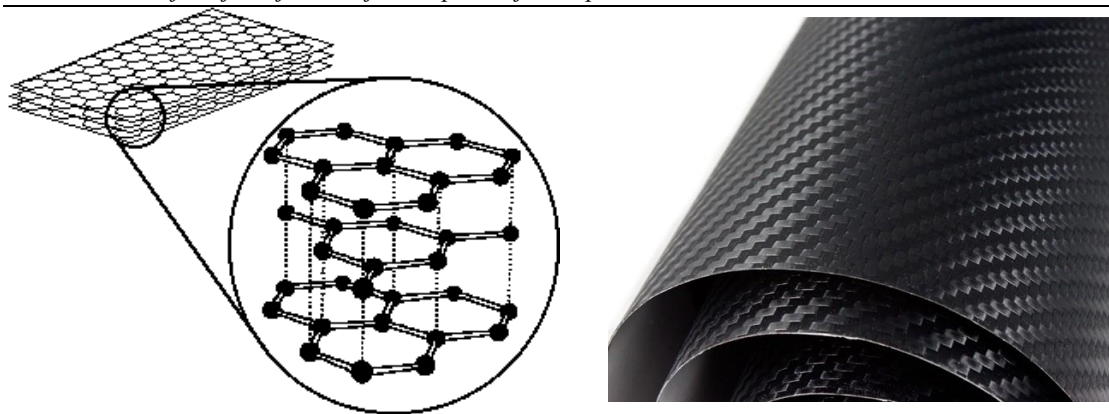
Vrsta vlakna	Gustoća (g/cm ³)	Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Modul elastičnosti (kN/mm ²)	Postotak produljenja (%)
A – glass	2,44	3300	72	4,8
AR – glass	2,7	1400	72	2,3
C – glass	2,56	3300	69	4,8
D – glass	2,11	2500	55	4,5
E – glass	2,54	3400	72	4,7
ECR – glass	2,72	3400	80	4,3
R – glass	2,52	4400	86	5,1
S – glass	2,53	4600	89	5,2

Tablica 1. Svojstva staklenih vlakana [8]

3.1.2 Ugljična vlakna

Ugljična vlakna (engl. Carbon fiber) su napravljena od ugljikovih kristala poredanih pravilno uzduž osi. Prema udjelu ugljika te molekulskoj i nad molekulskoj strukturi razlikuju se anizotropna i izotropna ugljična vlakna. Poznatija su i zastupljenija u uporabi *anizotropna ugljična vlakna* (zvana još i *grafitna vlakna*) s grafitnom strukturom ugljika, a udjelom ugljika većim od 95% (u pravilu većim od 99%).

Grafitni slojevi oblikuju kristalite heksagonalnog (saćastog) oblika, koji su usmjereni usporedno s uzdužnom osi vlakna, zbog čega se svojstva vlakana u smjeru osi i smjeru okomitom na os vlakna razlikuju (anizotropija). Grafitna vlakna proizvode se u obliku gotove neuvijene više vlaknaste pređe, koja sadrži od stotinjak do nekoliko tisuća vrlo finih vlakana (promjera nekoliko mikrometara). Ta se pređa koristi za ojačavanje kompozita, bilo u izvornom obliku ili se za istu namjenu prerađuje u različite dvodimenzionalne i trodimenzionalne strukture.



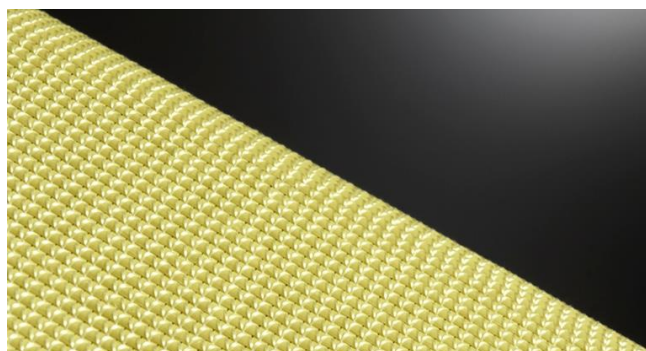
Slika 11. Struktura i vanjski izgled ugljičnih vlakana

Ugljična vlakna odlikuju se mnogim svojstvima, a neka od njih su vrlo visok omjer čvrstoće i težine, visoka krutost, otpornost na koroziju, električna vodljivost, otpornost na umor materijala, dobra vlačna čvrstoća, nezapaljivost, samopodmazivost, odlična izolacija od elektromagnetskog polja te biološka inertnost. Unatoč prije nabrojenim kvalitetama, ugljična vlakna imaju i svoje nedostatke, kao što su krhkost, zahtijevaju posebnu opremu i veliko iskustvo kod korištenja i najskuplji su materijal od prije spomenutih staklenih i aramidnih vlakana. [8]

3.1.3 Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su visoko učinkovita vlakna, s molekulama građenima od relativno krutih polimernih lanaca. Te molekule su povezane snažnom vodikovom vezom koja vrlo efikasno prenosi mehaničko opterećenje, pa time omogućuje korištenje lanaca relativno male molekularne mase.

Najčešće korišteno aramidno vlakno jest kevlar. Cijenom smješten između staklenih i ugljičnih vlakana, kevlar nudi kompromis kod odabira materijala vlakana. Kevlar se odlikuje visokom vlačnom čvrstoćom u odnosu na svoju težinu, ali i visokom otpornošću na udare i abraziju. Loše svojstvo kevlar jest što se teško reže i nije pogodan za upotrebu kod tlačnih opterećenja.[8]



Slika 12. Aramid

Prikazana je usporedba relativnih svojstava staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakana (Tablica 2.).

Legenda: L = loše, D = dobro, O = Odlično, I - izvrsno

SVOJSTVO	Staklena vlakna	Ugljična vlakna	Aramidna vlakna
Gustoća	L	I	I
Vlačna čvrstoća	D	I	O
Tlačna čvrstoća	O	I	L
Krutost	D	I	O
Otpornost umoru materijala	O-I	O	I
Otpornost na abraziju	D	L	I
Pjeskarenje/Strojna obrada	I	I	L
Vodljivost	L	I	L
Otpornost na visoke temperature	I	I	D
Otpornost na vlagu	O	O	D
Kompatibilnost sa smolom	I	I	D
Cijena	O	L	D

Tablica 2. Usporedba relativnih svojstava vlakana od različitih materijala [9]

3.2 Smole

Smole kod kompozita napravljenih namatanjem vlakana imaju istu namjenu kao i kod ostalih kompozitnih konstrukcija napravljenih drugim postupcima. Smole kod kompozitnih materijala osiguravaju pravilan položaj niti, pomažu u prenošenju opterećenja, štite niti od abrazije (uslijed namatanja), reguliraju električna i kemijska svojstva te omogućavaju prenošenje smičnog naprezanja između slojeva kompozita.

Postoji više vrsta smola koje se odabiru, a to su epoksidne i poliesterske smole. Obje vrste mogu se koristiti za pravljenje kalupa, kalupljenje, laminiranje i lijevanje. Uz epoksidne i poliesterske smole postoje i vinil-esterske smole.

Epoksidne smole su visoko učinkovite i skupe smole. Koriste se kod izrade strojnih dijelova koji zahtijevaju malu težinu, visoku čvrstoću i geometrijski preciznu izradu. Prednosti koje pružaju epoksidne smole su:

- ne nastaju nusprodukti tijekom stvrdnjavanja
- ne skupljaju se tijekom stvrdnjavanja
- kemijska otpornost i otpornost na otapala
- otpornost na puzanje i zamor
- dobra električna svojstva
- dostupne u krutom ili tekućem stanju prije stvrdnjavanja
- mogu biti nezapaljive

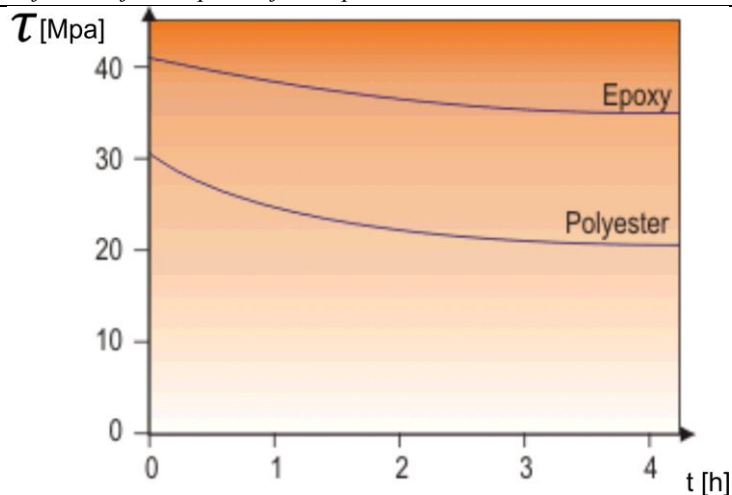
Upravo iz tih razloga su epoksidne smole jedne od najšire primjenjivanih smola. [8]

Poliesterske smole odlikuju se nizom dobrih svojstava koja su im omogućila vrlo brzi razvoj u razmjerno kratkom vremenu. Kako spadaju u duroplaste samim tim odlikuju se postojanošću na višim temperaturama te su dimenzionalno stabilne za razliku od termoplasta. Poliesterske smole su jeftinije od epoksidne smole, pružaju bolju zaštitu od korozije i zahtijevaju manje iskustva u rukovanju. [9]

Vinil-esterske smole nude treću opciju kod odabira smole, često opisivane kao mješavina epoksidnih i poliesterskih smola pošto cijenom i svojstvima spadaju u grupu između epoksidnih i poliesterskih smola. Vinil-esterske smole pružaju odlična svojstva u zaštiti od korozije i abrazije te se stoga vrlo često koriste za izradu spremnika za pohranu raznih kemikalija.

SVOJSTVO	Poliesterska smola	Epoksidna smola	Vinil-esterska smola
Savojna čvrstoća	131 N/mm ²	175 N/mm ²	145 N/mm ²
Vlačna čvrstoća	50 N/mm ²	75 N/mm ²	73 N/mm ²
Produljenje (%)	4 %	3 %	3 %
Apsorpcija vode (24 sata na 23°C)	57 mg (0,4 %) DIN 53495	5-10 mg (0.06-0.068%) ISO 62 (1980)	-
Vrijeme stvrdnjavanja	6 – 8 sati	5 – 7 dana	~30 minuta

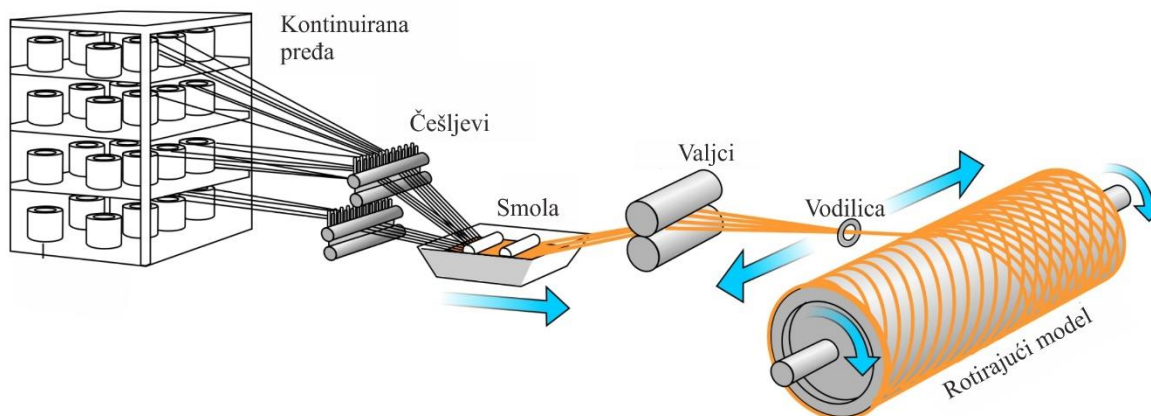
Tablica 3. Relativna svojstva poliesterskih i epoksidnih smola [9]



Slika 13. Utjecaj vremena absorpcije vode poliesterske i epoksidne smole na međulamelarnu smičnu čvrstoću [10]

3.3 Tehnologija namatanja

Smole služe kao vezivo (lijepilo) između slojeva vlakana pa se tako prilikom postupka namatanja vlakna premazuju smolom koja se nakon namatanja stvrdnjava u peći ili na sobnoj temperaturi i time stvara čvrstu vezu između namotanih vlakana. Odabir smole se zasniva na kompatibilnosti smole i vlakana, uvjetima eksploatacije i na željenim svojstvima gotovog dijela. Prikazan je postupak namatanja (Slika 14.).



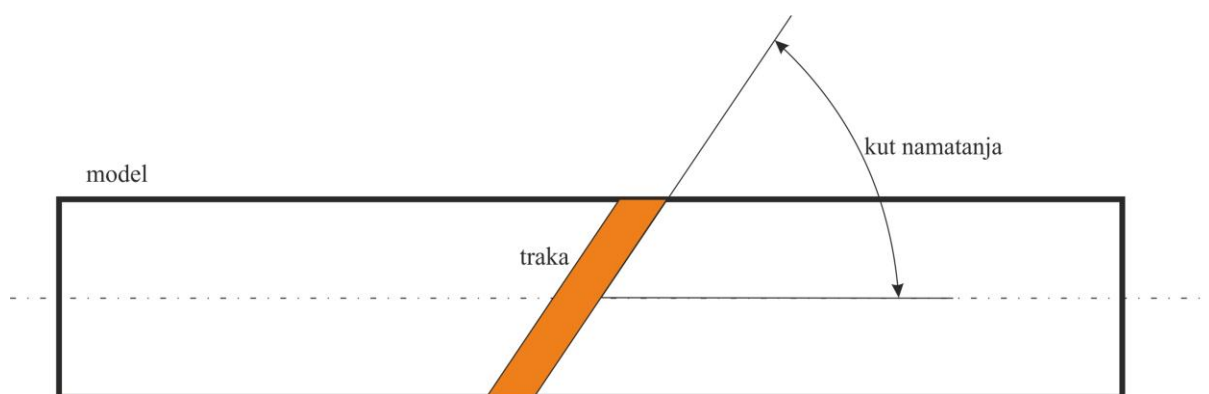
Slika 14. Postupak namatanja (engl. Filament winding)

Kako bi se dobila određena svojstva izratka, odnosno vratila, vlakna se mogu namatati na model pod različitim kutovima. Kombiniranjem raznih kutova namatanja po slojevima vratila omogućeno je prenošenje različitih opterećenja, bilo unutarnjih ili vanjskih. Vratila rađena tehnikom namatanja rijetko su načinjena samo namatanjem niti pod 0° ili 90° jer bi se lako moglo dogoditi da dođe do delaminacije.

Postoje tri osnovna kuta namatanja vlakana na model, a oni iznose 0° , $\pm 45^\circ$ i 90° . Namatanjem vlakana pod kutom od 0° povećava se aksijalna vlačna i tlačna čvrstoća te

otpornost na uzdužno savijanje vratila. Namatanjem vlakana na model pod $\pm 45^\circ$ dobiva se idealan kut za prenošenje čistog torzijskog opterećenja, dok se namatanjem vlakana pod kutom od 90° dobiva otpornost vratila na unutarnji ili vanjski pritisak te osigurava okrugli oblik izratka. Između ostalog, namatanjem niti pod kutom od 90° dobiva se zaštitni sloj na vratilu, a ujedno se povećava udio sloja vlakana na presjeku vratila time što se istiskuje višak smole prilikom namatanja prema krajevima vratila.

Vratila su vrlo rijetko opterećena samo jednom vrstom opterećenja, stoga se izrađuju od minimalno dva spomenuta kuta kako bi se osigurala nosivost svih mogućih opterećenja. Većina kombiniranih opterećenja može se prenositi vlaknima namotanim pod srednjim kutom, pa na primjer za unutrašnja tlačna opterećenja koristi se namatanje pod $\pm 55^\circ$. Za vanjski pritisak kako bi se spriječilo izvijanje koriste se namotaji pod kutom od $\pm 65^\circ$. Isto tako za savojno opterećenje u kombinaciji sa torzijskim opterećenjem koriste se kutovi namatanja između $\pm 5^\circ$ i $\pm 25^\circ$. [11]



Slika 15. Ilustracija namatanja trake na model

Slika prikazuje kut namatanja traka načinjenih od vlakana prije spomenutih različitih materijala. Vidljivo je da je kut namatanja od 0° paralelan sa uzdužnom središnjom osi modela na koji se vrši namatanje, dok je kut od 90° okomit na središnju os modela pa tako prilikom namatanja čini uzorak u obliku obruča (engl. Hoop Pattern).

3.4 Odabir vrste spoja kompozit – metal

Čvrstoća kompozitnih vratila je vrlo često određena čvrstoćom i robusnošću spojeva koji se nalaze na tom vratilu. Prije je spomenuto da postoje dvije glavne skupine spojeva koje se dijele na mehaničke i adhezijske, te kombinacija, odnosno mehaničko – adhezijski spojevi. Strukturna čvrstoća mehaničkih spojeva ovisi primarno o lokalnoj nosivosti slojeva kompozitnog materijala, dok kod adhezijskih spojeva ovisi o lokalnoj čvrstoći slojeva kompozita na smična naprezanja.

3.4.1 Kriteriji za odabir vrste spoja kompozit – metal

Prilikom odabira vrste spoja kompozit – metal u obzir se moraju uzeti razni faktori. Neki od faktora su vrsta opterećenja koja spoj mora prenositi, kompatibilnost materijala koji se nalaze

u spoju s ljepilom, vrsta ljepila, odabir principa spajanja, složenost izrade spoja, sigurnosni aspekti te ukupna cijena spoja.

Kod odabira spoja prema vrsti opterećenja posebna se pažnja pridaje prirodi opterećenja koje će djelovati na vratilo tijekom eksploatacije. Vrlo bitno za određivanje vrste spoja je utvrditi da li će vratilo raditi u uvjetima statičkog ili dinamičkog, trajnog ili isprekidanog opterećenja, ili će pak na vratilo djelovati periodička ili ne periodička udarna opterećenja. Između ostalog, bitno je odrediti da li će na vratilo djelovati samo torzijsko naprezanje (uvijanje) uslijed narinutnog momenta, ili će uz torzijsko naprezanje postojati i vlačno, odnosno tlačno naprezanje ili moment savijanja.

Prilikom odabira spoja prema kompatibilnosti materijala potrebno je uskladiti materijale u spoju kako bi spoj bio čvrst, odnosno potrebno je osigurati kompatibilnost materijala kompozitnog vratila i metalnog spoja s ljepilom koje ih povezuje.

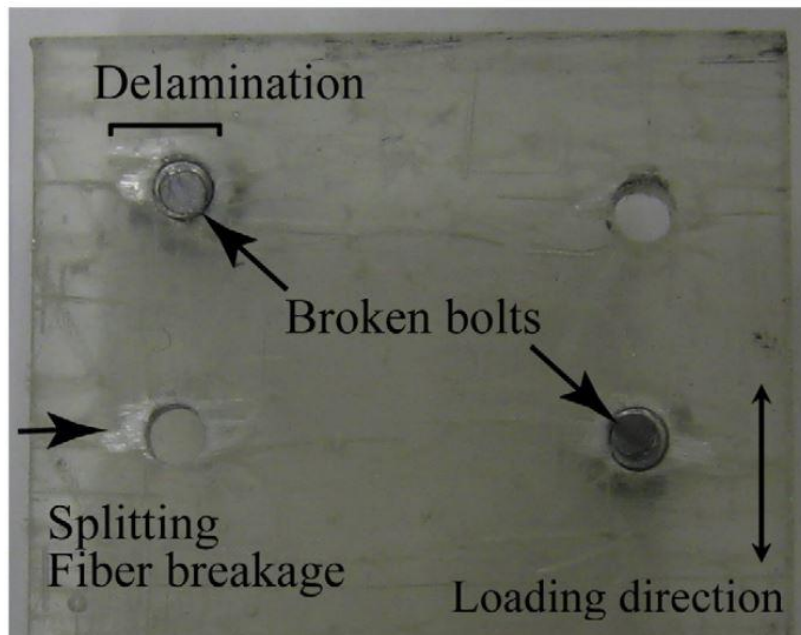
Između ostaloga, prilikom konstruiranja spoja kompozit – metal posebnu je pažnju potrebno obratiti na složenost izrade samog spoja. Previše složen spoj teško je izraditi, a samim time potrebno je mnogo više vremena i novca uložiti u izradu spoja.

Isto tako, sigurnosni aspekt je vrlo važan kod konstruiranja spoja kompozit – metal. Kod velikih brzina vrtnje vratila prilikom zaribavanja spoja postoji velika mogućnost za nastanak krhotina koje lete velikom brzinom uslijed rotacije. Iz toga se razloga spojevi na vratilima, ovisno o pogonskoj grupi i vrsti opterećenja, izrađuju s određenim faktorima sigurnosti.

3.4.2 Mehanički spojevi

Mehanički spojevi konstruirani su tako da se opterećenje sa kompozitnog vratila na metalnu glavinu prenosi vijčanim spojem. Postoji nekoliko faktora koji utječu na čvrstoću i pouzdanost mehaničkog spoja kao što su delaminacija kompozita uslijed lokalnih tlačnih naprezanja uzrokovanih vijcima, klinasti rascjepi kompozita pored vijčanog spoja, zaobilazno opterećenje, opterećenje preneseno trenjem, periodička opterećenja te utjecaj vlage.

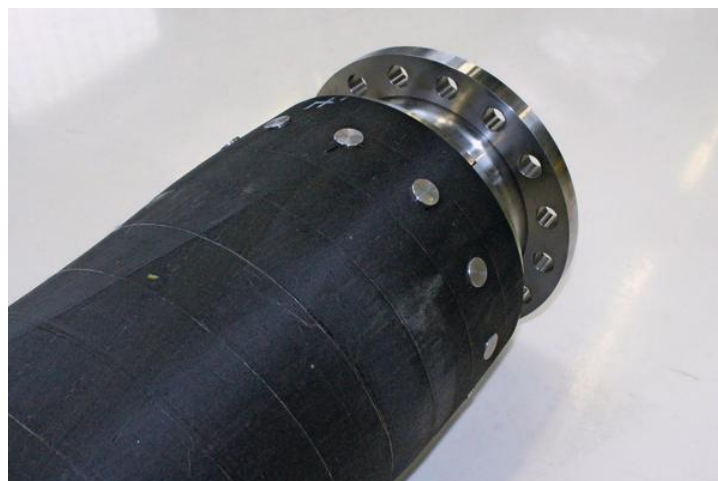
Lokalna koncentrirana tlačna naprezanja uzrokovana tlačenjem vijka mogu lokalno uzrokovati velike tlačne pritiske na kompozitnom materijalu. Klinasti rascjep kod kompozitnih vijčanih spojeva karakteriziran je pucanjem slojeva kompozita koje se naziva delaminacijom (*Slika 16.*), a počinje na mjestu lokalnog koncentriranog naprezanja u blizini vijka i propagira prema slobodnom kraju vratila. Takvi rascjepi uzrokovani su bočnim pritiskom vijaka o slojeve kompozitnog materijala.



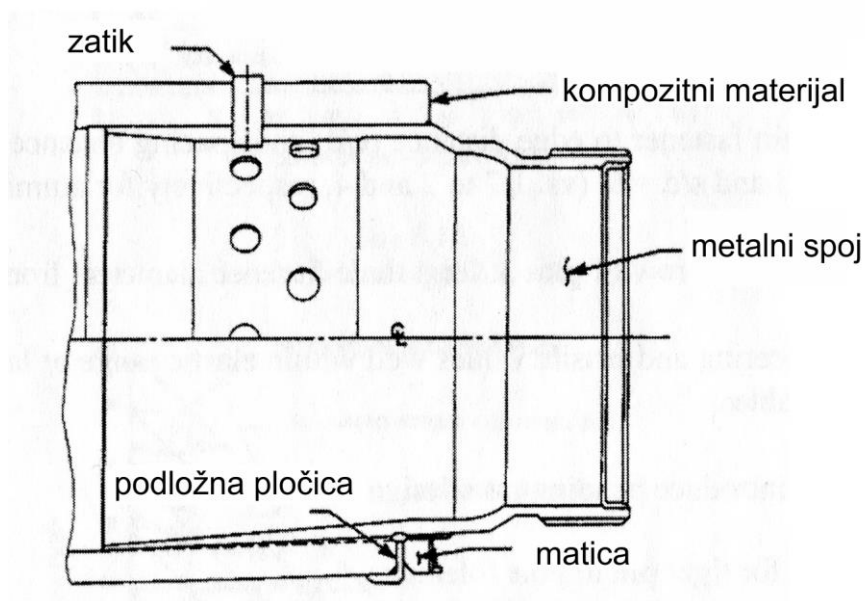
Slika 16. Delaminacija

Mehanički postupci spajanja zahtijevaju upotrebu mehaničkih veza, kao što su vijci i zakovice. Oni zahtijevaju bušenje rupa na vratilu i glavini što poskupljuje izradu vratila. Isto tako, debljina kompozita i metala mora biti povećana po čitavom presjeku kako bi se vratilo dodatno ojačalo zbog javljanja koncentriranih napreznja na mjestima gdje se nalaze vijci ili zakovice te time povećavaju težinu, glavnu prednost kompozitnih vratila naspram vratila od drugih materijala poput čelika ili aluminija.

Na mjestu spajanja, provrta i vijci ili zakovice povećavaju mogućnost pojave korozije zajedno s mogućnošću dodira ugljičnih pojačanja (karbonska vratila) s metalom i time rezultiraju galvanskom korozijom. Kako bi se riješio taj problem, vijci korišteni za spajanje napravljeni su najčešće od titana ili nehrđajućeg čelika. [12]



Slika 17. Primjer mehaničkog spoja



Slika 18. Presjek mehaničkog spoja [8]

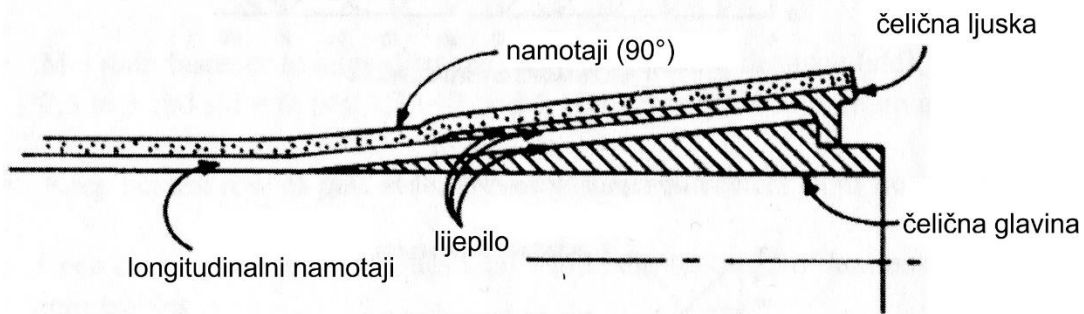
3.4.3 Adhezijski spojevi

Adhezijski spojevi konstruirani su tako da se opterećenje s kompozitnog vratila na metalnu glavinu prenosi lijepljenjem. Kod ovakve vrste spajanja kompozitnog vratila i metalne glavine postoje određeni faktori koji utječu na čvrstoću spoja, kao što su vrsta ljepila koje se koristi, postupak lijepljenja, debljina sloja ljepila, priprema svih površina na koje će se nanositi ljepilo, trajanje sušenja ljepila te površina nalijeganja spoja dva dijela koji se lijepe.

Kod lijepljenih spojeva, za razliku od mehaničkih spojeva, nije potrebno bušiti provrte na spoju pa na taj način ne dolazi do geometrijskog diskontinuiteta na spoju vratila što pridonosi povoljnijoj raspodjeli naprezanja i izbjegnutom nastanku koncentriranih naprezanja koja imaju znatan utjecaj na čvrstoću i pouzdanost spoja.



Slika 19. Primjer adhezijskog spoja



Slika 20. Presjek adhezijskog spoja [8]

Pošto adhezijski spojevi osiguravaju znatno bolju raspodjelu naprezanja od mehaničkih spojeva, debljina, a samim time i težina oba materijala u spoju može se smanjiti. Čvrstoća adhezijskih spojeva najčešće je ograničena samom čvrstoćom kompozita kojeg spajamo.

Kod adhezijskih spojeva postoje razne pripreme površine. Jedna od priprema površine je rovašenje metalne glavine kako bi se povećala kontaktna površina između kompozitnog materijala i metalne glavine. Primjer pripreme površine rovašenjem dan je sljedećom slikom (Slika 21.).



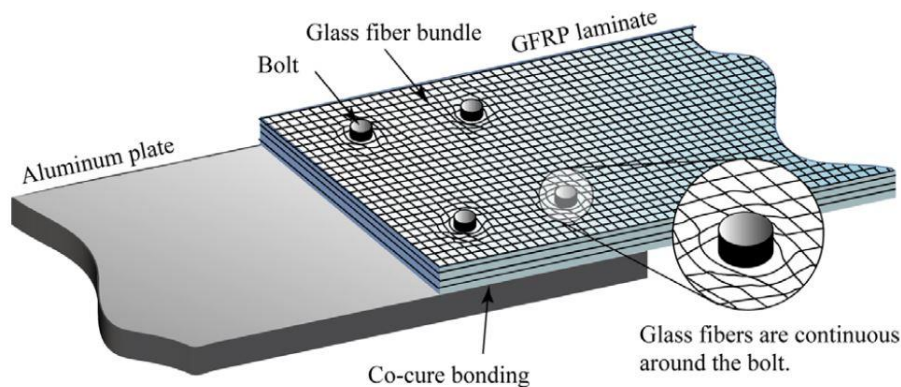
Slika 21. Rovašena glavina s prirubnicom

3.4.4 Mehaničko – adhezijski spojevi

Kao što je već spomenuto u poglavlju 1.5 Vrste spojeva kompozit – metal, mehaničko – adhezijski spoj kombinacija je mehaničkog i adhezijskog spajanja dvaju dijela, odnosno kod mehaničko – adhezijskog spoja opterećenje se prenosi oblikom (ili mehaničkom vezom) te adhezijskim silama (lijepilo).

Prema istraživanju koje su provodili R. Matsuzaki, M. Shibata i A. Todoroki [12] na adhezijskim, mehaničkim i mehaničko – adhezijskim spojevima došao je do zaključka da adhezivna lomna čvrstoća mehaničko – adhezijskih spojeva odgovara adhezivnoj lomnoj čvrstoći adhezijskih spojeva, te da maksimalna smična čvrstoća mehaničko – adhezijskih spojeva odgovara maksimalnoj smičnoj čvrstoći mehaničkih spojeva što ima za posljedicu 1.84 puta veću maksimalnu smičnu čvrstoću kod mehaničko – adhezijskih spojeva.

Uz to, ispitivanjem je utvrđeno da mehaničko – adhezijski spoj ima puno veću čvrstoću na umor materijala nego što ima mehanički spoj, pošto se javljaju slabija koncentrirana naprezanja i dolazi do manjeg oštećenja vlakana kompozita na mjestu mehaničke veze.



Slika 22. Primjer mehaničko - adhezijskog spoja

Nedostaci mehaničko – adhezijskih spojeva su složeno konstruiranje, analiza i izrada takvih spojeva, a samim time i veća cijena. No, velika prednost ove vrste spajanja kompozitnih materijala s metalom jest vrlo veliki izbor materijala korištenih za lijepljenje, odnosno konstruktor pravim odabirom lijepila, materijala koji spaja te vrsti i rasporedu mehaničkih veza može vrlo dobro optimizirati spoj te uz minimalni korišteni materijal osigurati potrebnu čvrstoću i faktor sigurnosti. [12]

3.5 Vrste opterećenja

3.5.1 Opterećenje na vratilo

Prilikom konstruiranja kompozitnog vratila vrlo je bitno pažnju usmjeriti na vrstu opterećenja kojem će vratilo biti izloženo. Kompozitna vratila konstruiraju se kako bi mogla prenositi okretni moment, a da pri tome ne dođe do loma vratila. Torzijska čvrstoća vratila, odnosno okretni moment pod kojim dolazi do loma vratila, izravno je povezana s smičnom čvrstoćom slojeva kompozitnog vratila, a izračunava se preko izraza [4]

$$T_{t,max} = 2\pi r_m^2 t \tau_{xy}, [Nm]$$

gdje je

$T_{t,max}$ – okretni moment uslijed kojeg dolazi do loma vratila, [Nm]

r_m – radijus vratila, [m]

t – debljina stjenke vratila, [m]

τ_{xy} – dopušteno smično naprezanje među slojevima vratila, [N/m^2].

Kompozitna vratila, a posebice kompozitna vratila većih dužina, potrebno je proračunati na izvijanje. Maksimalni dopušteni okretni moment na vratilu s obzirom na izvijanje dobiva se iz sljedećeg izraza [4]

$$T_{f,max} = 0,272(2\pi r_m^2 t)(E_x E_h^3)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{\frac{3}{2}}, [Nm]$$

gdje je

$T_{f,max}$ – okretni moment uslijed kojeg dolazi do izvijanja vratila, [Nm]

r_m – radijus vratila, [m]

t – debljina stijenke vratila, [m]

E_x – prosječni modul elastičnosti u aksijalnom smjeru vratila, [N/m^2]

E_h – prosječni modul elastičnosti u smjeru namotavanja kompozita, [N/m^2].

Kritična brzina vrtnje dobiva se iz sljedećih izraza [4]

$$N_K = 60f_0, [min^{-1}]$$

$$f_0 = K_s \frac{30\pi p^2}{L^2} \sqrt{\frac{Er_m^2}{2\rho}}, [Hz]$$

$$\frac{1}{K_s} = 1 + \frac{p^2 \pi^2 r_m^2}{2L^2} \left[1 + \frac{f_s E}{G} \right]$$

gdje je

N_K – kritična brzina vrtnje vratila, [min^{-1}]

f_0 – prirodna frekvencija vratila, [Hz]

p – prva prirodna frekvencija vratila, [Hz]

G – modul smičnosti, [GPa]

E – modul elastičnosti, [N/m^2]

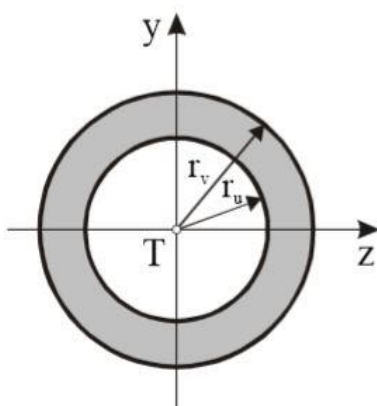
L – duljina vratila, [m]

r_m – radijus vratila, [m]

ρ – gustoća materijala, [kg/m^3]

$f_s = 2$ za šuplje poprečne presjeke

Kompozitna se vratila koriste za prijenos snage pri velikim brzinama vrtnje pa je potrebno izračunati moment tromosti vratila. Moment tromosti za šuplje vratilo izračunava se iz izraza [10]



$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4} (r_v^4 - r_u^4) = \frac{\pi}{64} (d_v^4 - d_u^4)$$

gdje je

$I_z = I_y$ – moment tromosti, [mm^4]

r_v – vanjski polumjer vratila, [mm]

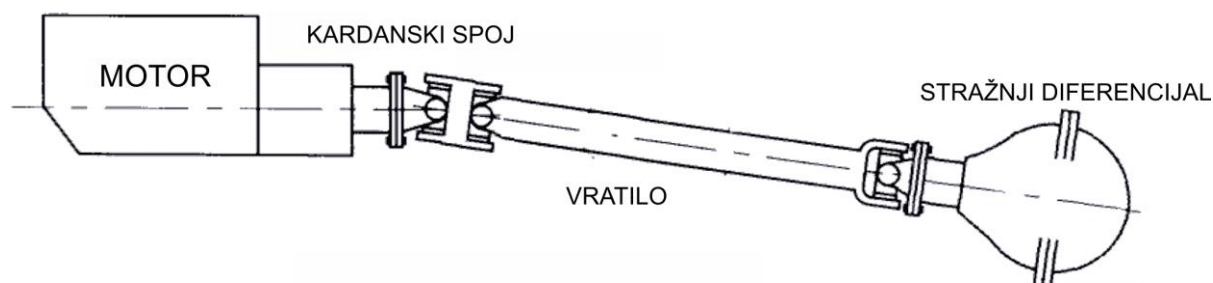
r_u – unutarnji polumjer vratila, [mm]

Iz izraza je vidljivo da moment tromosti ovisi o geometriji vratila, odnosno o dimenzijama vanjskog i unutarnjeg promjera vratila.

3.5.2 Opterećenje u spoju

Kod konstruiranja spoja kompozita i metala potrebno je odrediti vrstu opterećenja kojem će spoj biti izložen. U ovom radu isključivo govori o kompozitnim vratilima i njihovim spojevima s metalnim glavinama, fokus će biti na opterećenjima koja se javljaju upravo u primjeni kompozitnih vratila.

Pretpostavlja se da će vratilo biti opterećeno samo okretnim momentom i da na njega neće djelovati nikakva druga opterećenja, odnosno na vratilo neće djelovati poprečne sile. Takvo opterećenje na vratilu javlja se kada je vratilo spojeno kardanskim zglobovima na ulaz i izlaz snage (Slika 23.).

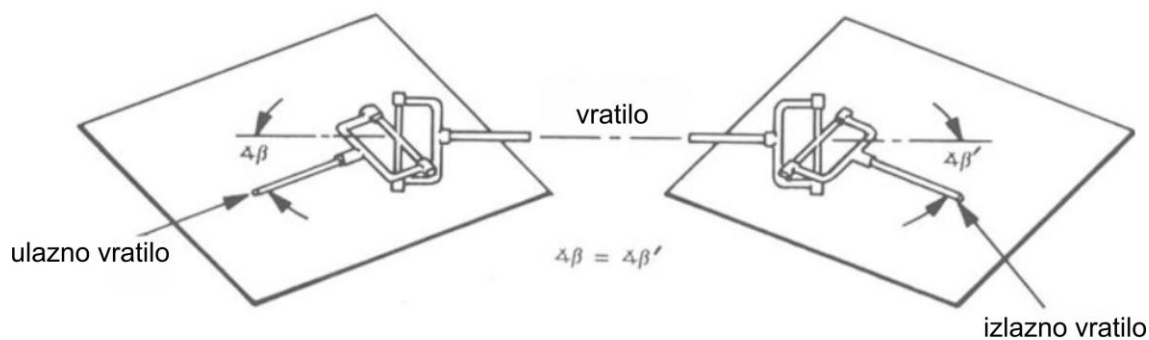


Slika 23. Vratilo sa kardanskim spojevima

Osnovno svojstvo kardanskih (zglobnih) spojeva jest neravnomjerno prenošenje rotacijskog gibanja kroz sam spoj. Omjer kutnih brzina ulaza i izlaza vratila ciklički se mijenja dva puta unutar jednog okretaja vratila. Ta kolebanja kutnih brzina izazivaju kutna ubrzanja koja se moraju uzeti u obzir prilikom konstruiranja vratila s kardanskim spojevima.

Neravnomjerno prenošenje rotacijskog gibanja može se eliminirati korištenjem dva kardanska zgloba koja su u protu fazi. U tom slučaju, kolebanje kutne brzine izazvano na jednom kardanskom spoju (npr. ulazni spoj) može biti poništeno na drugom kardanskom spoju (npr. izlazni spoj) i time prenoseći konstantnu kutnu brzinu sa prijenosnim omjerom 1:1.

Ovdje valja napomenuti kako na vratilu koje spaja dva kardanska zgloba nije moguće izbjeći pojavljivanje kolebanja kutne brzine, stoga će vratilo biti opterećeno cikličkim udarnim opterećenjima.



Slika 24. Vratilo sa kardanskim spojevima u protu fazi

Kako bi se izračunao moment torzije na kardanskom zglobu koristi se sljedeći osnovni izraz

$$P = T\omega$$

koji nakon sređivanja daje

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{9554P}{n}, [Nm]$$

gdje je

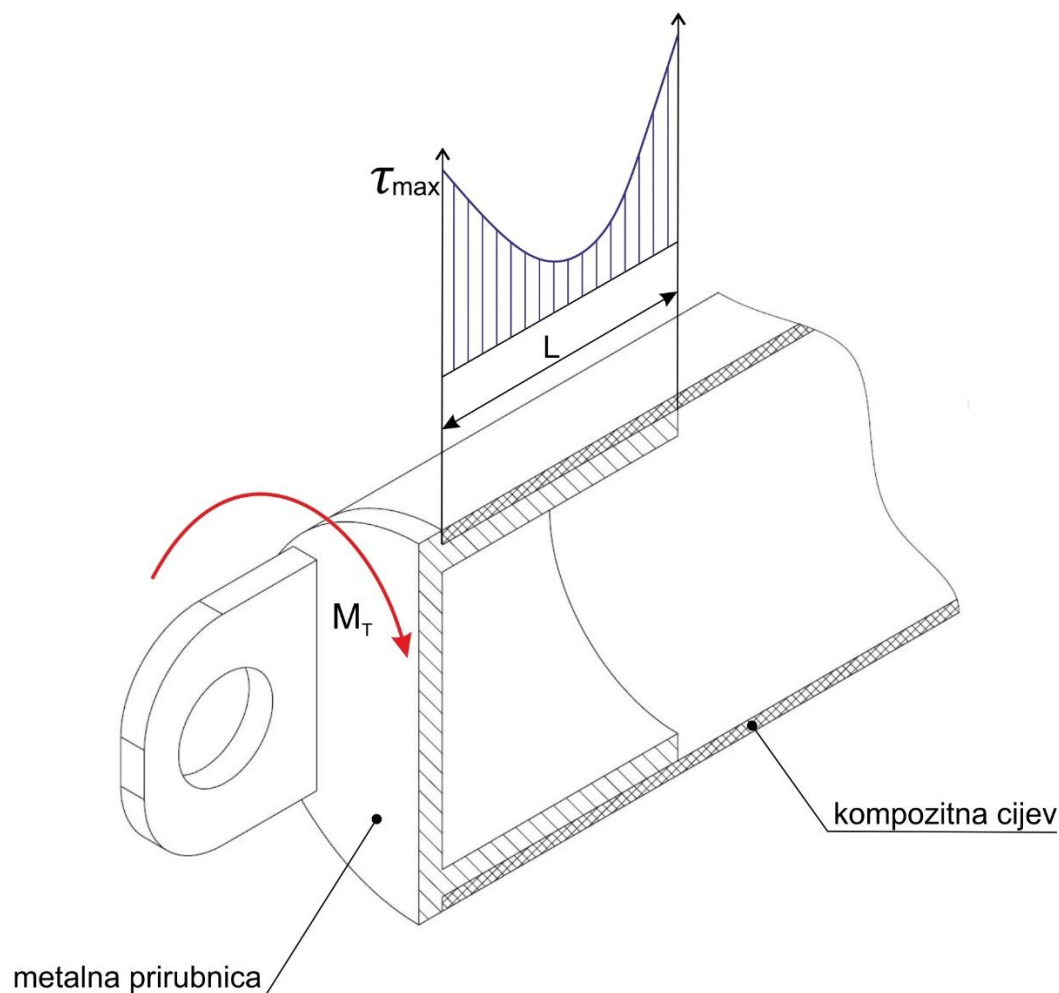
T – okretni moment na kardanskom spoju, $[Nm]$

P – snaga dovođena na kardanski spoj, $[kW]$

ω – kutna brzina, $[rad/s]$

n – broj okretaja, $[min^{-1}]$

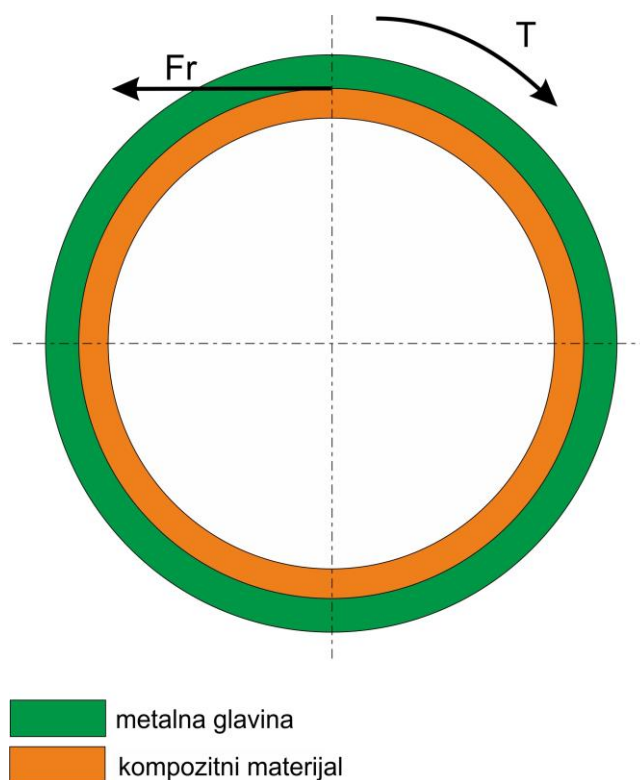
Prikazan je presjek lijepljenog spoja metalne prirubnice i vratila duž aksijalne osi vratila (Slika 25.). Moment torzije naznačen je crvenom strelicom, dok je smično opterećenje spoja označeno krivuljom plave boje.



Slika 25. Prikaz raspodjele smičnog naprezanja na mjestu spoja [13]

Prema raspodjeli naprezanja na spojnom mjestu vidljivo je da krajevi spoja preuzimaju više smičnog naprezanja nego što preuzima sredina spoja što djeluje nepovoljno na čvrstoću spoja. Pravilna raspodjela kod idealnog spoja bila bi u obliku horizontalnog pravca, što bi značilo da svaki dio spoja preuzima približno isto naprezanje s ciljem izbjegavanja koncentracije naprezanja.

Uzevši u obzir krivulju raspodjele smičnog naprezanja (Slika 25.), povećanjem širine spoja poveća se površina na krajevima spoja gdje se nalazi koncentrirano naprezanje, pa se time isto naprezanje prenosi preko veće površine što rezultira manjim opterećenjem spoja, a samim time rezultira i jačim spojem. [14]



Slika 26. Opterećenje na spoju metala i kompozita

3.6 Odabir ljepila

Na današnjem tržištu prisutne su brojne vrste ljepila sa različitim svojstvima, stoga je prilikom konstrukcije potrebno pažljivo odabrati koje će se ljepilo koristiti za spajanje kako bi se osigurala što bolja svojstva i pouzdanost spoja.

Neki od primjera ljepila su: ljepilo stvrdnuto toplinom, privremeno (rastavljivo) ljepilo, vruće taljeno ljepilo, brzo ljepilo, ljepilo osjetljivo na pritisak, brtveća ljepila, ljepila za visoka opterećenja (strukturna ljepila), ljepila koja se stvrdnjavaju pod UV svjetlom te mnoga druga. [15]

Pošto su vratila, odnosno spojevi vratila visoko opterećeni strojni dijelovi najčešće će se koristiti strukturna ljepila za spajanje metalne glavine i kompozitnog vratila.

Strukturna ljepila su grupa ljepila koja ima dobru sposobnost prenošenja opterećenja, odnosno ona daju snagu dijelovima koje povezuju. Strukturna ljepila koriste se za spajanje dijelova kod namještaja, automobila, vlakova, brodova te posebice u avioindustriji. U grupu strukturnih ljepila mogu se svrstati sljedeće vrste ljepila: akrilna, anaerobna, cijanoakrilatna, epoksi, vruće taljena, metakrilatna te poliuretanska ljepila.

Akrilna ljepila imaju visok stupanj tolerancije na pripremljenost površine na koje se nanosi, odnosno ne trebaju posebnu pripremu površine. Vrlo su slična epoksi ljepilu u pogledu smične čvrstoće te pružaju elastične spojeve s dobrom otpornošću na delaminaciju i udare.

Stvrđavanje ovog ljepila može se odvijati na sobnoj temperaturi te obično traje nekoliko minuta, nakon čega spoj poprima konačna svojstva čvrstoće. [15]

Anaerobna ljepila su ljepila koja se vrlo lagano nanose zato što se njihovo stvrđavanje odvija u atmosferi lišenoj kisika što znači da pri normalnoj atmosferi prilikom nanošenja anaerobnog ljepila ne dolazi do stvrđavanja. Iako ova ljepila imaju visoku kohezijsku čvrstoću, zbog slabe adhezijske čvrstoće nisu pogodna za propusne materijale. Usto, ne popunjavaju dobro praznine i vrlo često zahtijevaju upotrebu temeljnog (primer) sloja.

Cijanoakrilatna ljepila pripadaju skupini brzo stežućih ljepila koja se stežu unutar 5 sekundi nakon nanošenja na podlogu. Najveća prednost ovih ljepila jest sposobnost spajanja plastičnih i gumenih dijelova vrlo čvrstom vezom, no s druge strane nisu otporna na udare i podložna su propadanju uslijed pojave vlage. Najčešće se primjenjuju kod manjih dimenzija spojeva.

Epoksi ljepila na tržištu postoje duže od bilo koje vrste ljepila koja se primjenjuje u strojarstvu i najčešće su korištena ljepila. Epoksi ljepila pružaju vrlo visoku smičnu čvrstoću i mogu se lako mijenjati kako bi se prilagodila potrebama raznih spojeva. Generalno, epoksi ljepila su kruta te popunjavaju dobro male praznine. [15]

Vruće taljenja ljepila najčešće se koriste u područjima slabih opterećenja. Mogu tvoriti elastične i krute spojeve, a 80 % svoje čvrstoće ostvare unutar nekoliko sekundi nakon nanošenja. Mogu povezivati propusne i nepropusne materijale te obično zahtijevaju dobru pripremu površine. Nisu osjetljiva na vlagu, no mogu omekšati pri višim temperaturama.

Metakrilatna ljepila pružaju jedinstven kompromis visoke vlačne čvrstoće, smične čvrstoće i otpornosti na ljuštenje s maksimalnom otpornošću na udare i naprezanja kroz veliki raspon temperatura. Metakrilatna ljepila mogu se primjenjivati bez pripreme površine za spajanje plastičnih, metalnih i kompozitnih dijelova. Usto, otporna su na vodu i veliki broj otapala te čine nepropusnu vezu.

Poliuretanska ljepila su poznata po svojoj žilavosti i elastičnosti čak i pri niskim temperaturama. Otporna su na smična naprezanja i imaju odlično svojstvo otpornosti na vodu i vlagu, iako su nestvrđnuta vrlo osjetljiva na vlagu i temperaturu.

PROIZVOĐAČ LJEPILO	TRGOVINA	VRSTA LJEPILO	NAZIV LJEPILO
LOCTITE	Henkel Hrvatska	epoksi	Loctite 9514, Loctite EA 3450, Loctite EA 3421...
LOCTITE	Henkel Hrvatska	akril	Loctite 319/7649, Loctite 330
STALOC	Schachermayer Hrvatska	anaerobno	Industrieschnellreiniger SQ-220
LOCTITE	Raos d.o.o.	cijanoakrilatno	Loctite serija 400 (Loctite 401, Loctite 406, Loctite 454, Loctite 480, Loctite 496)

LOCTITE	Raos d.o.o.	metakrilatno	Loctite serija 300 (Loctite 302, Loctite 322, Loctite 326, Loctite 330)
Murexin, Henkel	ITV d.o.o., Raos d.o.o	poliuretansko	Murexin KK90, Jet-Weld™, Macroplast UK 1351 B25, Teromix 6700

Tablica 4. Popis dostupnih ljepila

4. Prikaz konstrukcijskih značajki važnih kod ispitivanja vratila – Lista zahtjeva

U svrhu što detaljnijeg ispitivanja kompozitnih vratila sastavljena je sljedeća lista zahtjeva bitnih kod ispitivanja vratila.

Lista zahtjeva potrebnih za ispitivanje vratila:

- dinamičko i statičko opterećenje vratila
- mehaničko opterećenje vratila pri varijabilnim brzinama i momentima torzije
- mjerenje kutne deformacije pri statičkom i dinamičkom opterećenju
- mjerenje progiba vratila
- mjerenje vibracija
- mjerenje temperature spojeva vratila
- prikaz i snimanje izmjerenih podataka

Prilikom sastavljanja liste zahtjeva posebna pažnja usmjerena je na moguće uvjete eksploatacije vratila. U obzir su uzete velike brzine vrtnje (do 7000 o/min) pošto se energija pohranjena u rotirajućem vratilu i mogućnost havarije vratila povećavaju eksponencijalno s povećanjem brzine vrtnje vratila pa stoga do pucanja vratila najčešće dolazi kod vrlo velikih brzina vrtnje. [11]

AUTOMOBIL	OKRETNI MOMENT [Nm]	BROJ OKRETAJA [min^{-1}]
Bugatti Veyron	1500	3000
Koenigsegg Agera	1200	4100
Porsche 9FF GT9	965	5970
Audi R8 Quattro	1000	3000
BMW 760 Li	750	1500

Tablica 5. Lista automobila sa specifikacijom okretnog momenta [16]

5. Pregled dostupnih uređaja za ispitivanje vratila

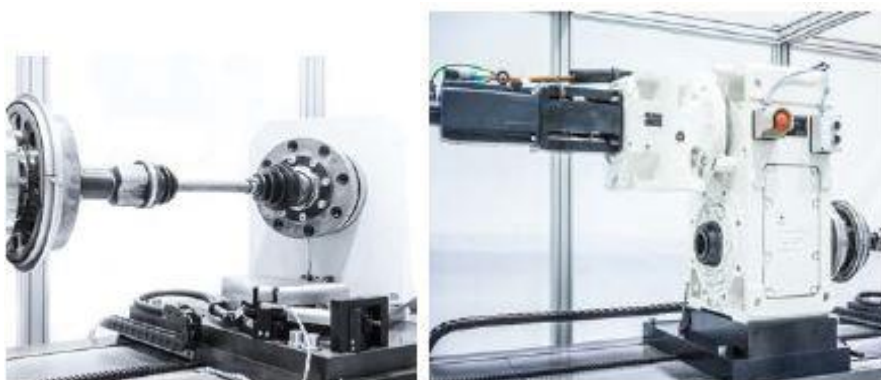
U svrhu što boljeg opisa prikazat će se različite vrste ispitnih postolja već postojeći uređaja za ispitivanje vratila.

Statička kidalica njemačke tvrtke Blum – Novotest [17] ima namjenu kako bi se eksperimentalnim putem utvrdilo pri kojem narinutnom momentu torzije dolazi do pucanja vratila ili spoja vratila sa pogonskim strojem. Ovaj uređaj omogućava kontroliranje i reguliranje narinutog opterećenja na vratilu, automatski otkriva pucanje vratila te na osnovu izmjerenih podataka izračunava krutost ispitivanog vratila.

Prostor za ispitivanje vratila ograđen je sigurnosnim staklom kako ne bi došlo do ozljeđivanja operatera prilikom ispitivanja.



Slika 27. Uređaj za statičko ispitivanje vratila



Slika 28. Jedinica za savijanje i uvijanje vratila

Karakteristike uređaja:

- moment uvijanja : $\pm 10\,000$ Nm
- maksimalni kut savijanja pri statičkom ispitivanju: 0° do 40°
- aksijalni pomak : 300 – 2000 mm
- poprečni pomak: 0 – 250 mm

Sljedeće ispitno postolje tvrtke Blum – Novotest [17] koristi se za određivanje otpornosti vratila na pucanje pri konstantnoj brzini vrtnje. Dva nasuprotno paralelna prijenosnika snage spojena su s ispitivanim vratilom i pomoćnim vratilom (engl. slave shaft). Zatvorenim tokom snage moment torzije narinut je pomoću reduktora s varijabilnom izlaznom brzinom vrtnje. Isto tako, duljina pomoćnog vratila se prilagođava duljini ispitivanog vratila.



Slika 29. Dinamička kidalica tvrtke Blum - Novotest

Karakteristike kidalice:

- reduktor pomičan u aksijalnom smjeru
- reduktor sa mogućnošću okretanja oko vertikalne osi te pomaka u aksijalnom smjeru
- ventilatori za hlađenje zglobova vratila
- bez kontaktno mjerenje temperature spojeva
- mogućnost preciznog reguliranja opterećenja i brzine vrtnje

Ispitno postolje za ispitivanje vratila tvrtke Strama – MPS [18] konstruirano je, kao i u prošlom primjeru, prema principu zatvorenog kruga opterećenja pa se stoga sastoji od dva reduktora koji su povezani međusobno paralelnim vratilima. Opterećenje se na reduktor prenosi preko hidraulične spojke koja spaja pogonski motor sa reduktorom.



Slika 30. Ispitni uređaj tvrtke Strama – MPS

Ovaj ispitni uređaj koristi se za ispitivanje dinamičke izdržljivosti vratila. Kompatibilan je sa vratilima raznovrsnih promjera i duljina. Brzina vrtnje, moment torzije, vibracije, udarna opterećenja i temperatura mogu se mjeriti i kontinuirano snimati pomoću uređaja za kontrolu te prikazivati u grafičkom obliku preko monitora osjetljivog na dodir.

Tehnički podaci uređaja:

- brzina vrtnje: 0 do 6000 o/min
- moment torzije: 0 do 150 000 Nm
- duljina vratila: 300 do 2000 mm

Karakteristike uređaja:

- programibilna platforma za ispitivanje vratila
- varijabilna brzina vrtnje
- varijabilni moment torzije
- varijabilno udarno opterećenje (kretanje udara i brzina udara)
- mogućnost analiziranja dobivenih podataka mjerenjem preko programa LabVIEW

Ispitno postolje američke tvrtke MTS konstruirano je za ispitivanje i potvrdu dinamičke izdržljivosti vratila korištenih u automobilskoj industriji simulirajući dinamička opterećenja koja nastaju u realnoj eksploataciji vratila. Ispitno postolje se sastoji od temeljne ploče sa pomičnim zaštitnim pregradama, hidrauličnog rotacijskog pokretača sa servo ventilima, FlexTest® servo upravljača, SilentFlo™ hidraulične pogonske jedinice i sustava za brzo isključivanje uređaja u slučaju opasnosti.



Slika 31. Ispitni uređaj tvrtke MTS

Karakteristike uređaja:

- maksimalni pomak vratila: $\pm 45^\circ$
- maksimalno opterećenje: ± 11 kNm
- brzina vrtnje: 0 – 2000 o/min
- programski paket za pohranu i analizu izmjerenih podataka

Iz danih primjera može se vidjeti da je za izradu uređaja za ispitivanje vratila potrebno robusno dimenzionirana temeljna ploča na koju su pričvršćeni elementi za prijenos snage i okretnog momenta. Zbog vrlo velikih brzina vrtnje i momenata torzije, zaštitna pregrada je nužna kako bi se prilikom ispitivanja osiguralo da ne dođe do veće materijalne štete, ali i do ozljeda operatera ili u najgorem slučaju do ljudskih žrtava.

Ovisno o načinu opterećivanja vratila, temeljna ploča može imati vodilice koje omogućava aksijalno, poprečno i kutno pomicanje elemenata za prijenos snage kako bi se mogla napraviti potrebna ispitivanja. Isto tako, postoje rješenja kod kojih se koriste dva reduktora u zatvorenom krugu opterećenja te isto tako moguće je rješenje pomoću jednog reduktora i kočnice na drugom kraju vratila (otvoreni tok snage).

Uočeno je da ne postoje rješenja ispitnih uređaja koja bi mogla potkrijepiti sve varijante opterećenja te su ispitni uređaji rađeni prema namjeni i ispitnom području.

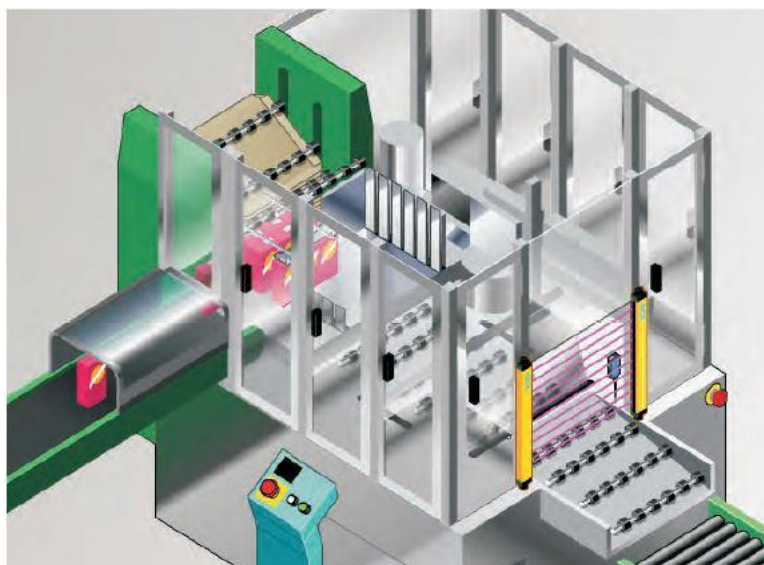
6. Sigurnosni aspekti koje je potrebno ostvariti kod uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila

Prilikom konstruiranja uređaja koji koriste velike brzine vrtnje ili velike snage u svojem radu posebnu pažnju potrebno je usmjeriti na sigurnosne aspekte uređaja kako prilikom rukovanja uređajem ne bi došlo do ozljeđivanja operatera ili ljudskih žrtava i materijalne štete.

Definiranje koje sigurnosne funkcije su potrebne za siguran rad uređaja:

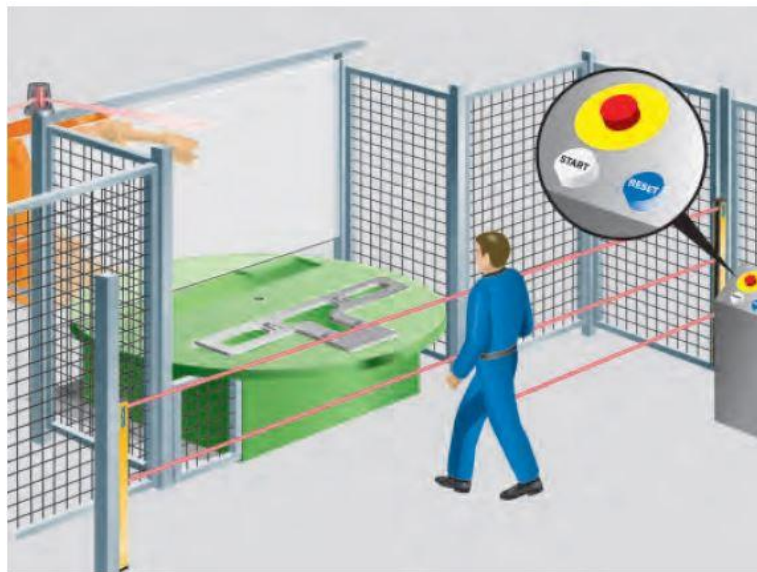
- privremeno spriječeni pristup ispitnom dijelu uređaja
- zadržavanje dijelova unutar ispitnog dijela uređaja (krhotina)
- mogućnost brzog isključivanja
- izbjegavanje neočekivanog pokretanja uređaja

Iako je mogućnost pojave šrapnela kod kompozitnih vratila pri velikim brzinama vrtnje znatno manje nego kod čeličnih i sličnih vratila, zaštitna pregrada se mora postaviti. Uz to, postoji mogućnost da prilikom ispitivanja vratila komad odjeće operatera zapne u dio stroja koji rotira te ozbiljno ozlijedi operatera.



Slika 32. Primjer zaštitne ograde uređaja

Također, uređaj bi trebao imati nekoliko lako dostupnih prekidača i senzora za brzo isključivanje uređaja kako bi se uređaj mogao sigurno zaustaviti u slučaju nepredviđenih situacija kojima bi se ugrozio ljudski život.



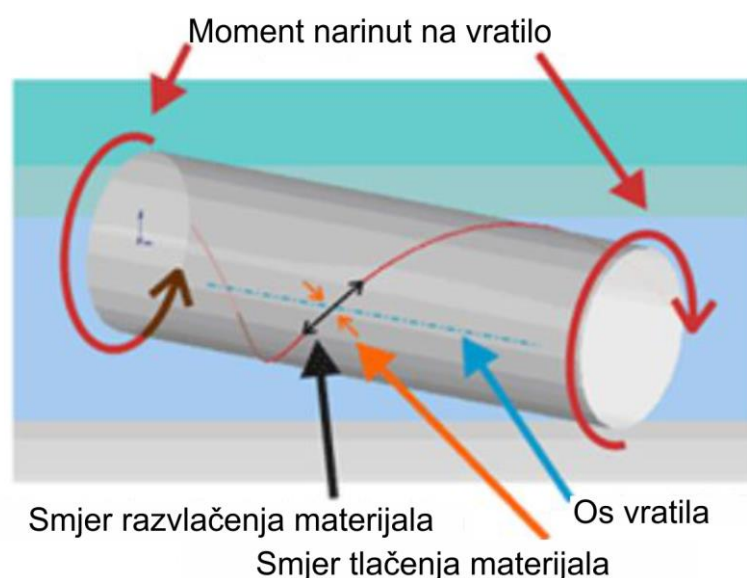
Slika 33. Primjer senzora i prekidača za brzo isključivanje uređaja

Kontrolna ploča mora biti na dovoljnoj udaljenosti od dijela uređaja na kojem se vrši ispitivanje vratila kako ne bi postojala mogućnost da operater bude u blizini rotirajućih dijelova uređaja kako ne bi došlo do slučajnog kontakta i potencijalnih ozljeda. [19]

7. Elementi mjernog lanca

Kako bi se prilikom ispitivanja vratila mogli dobiti što preciznije izmjereni podaci, uređaj za ispitivanje vratila mora biti opremljen određenim osjetnicima u mjernom lancu.

Prvi i najvažniji element mjernog lanca jest osjetnik (senzor) momenta torzije. Osnovi princip rada senzora momenta torzije je baziran na vrlo jednostavnom mehaničkom principu, odnosno temelji se na mjerenju sile koja se koristi za okretanje vratila. Kada se vratilu narine moment torzije ono se uvija. To uvijanje prouzrokuje rastezanje materijala vratila u smjeru pod kutom od 45° u odnosu na aksijalnu os vratila. Na materijal vratila isto tako djeluje tlačno naprezanje pod kutom od 45° , ali u drugom smjeru. Sljedeća slika prikazuje djelovanje momenta torzije na materijal vratila.



Slika 34. Ponašanje materijala vratila pri opterećenju momentom torzije

Elektronički pretvornik unutar senzora momenta torzije koristeći izmjerene vrijednosti uvijanja vratila i na temelju tih vrijednosti izračunava moment torzije narinut na vratilo. Ovaj senzor može se koristiti istovremeno za određivanje kutne deformacije vratila pošto mu se princip rada temelji na mjerenju kutnog pomaka vratila kod uvijanja.

Drugi vrlo bitan osjetnik jest osjetnik brzine vrtnje. Kako bismo što realnije simulirali realne uvjete u kojima se vratilo eksploatira, potrebno je što preciznije namjestiti parametre kao što su moment torzije koji djeluje na vratilo, ali i brzina vrtnje pri određenom momentu torzije.

Osjetnik koji se koristi za mjerenje brzine okretanja vratila naziva se tahometar. Kod mjerenja brzine vrtnje bez kontakta koristi se laserski tahometar. Njegov rad se zasniva na pulsiranju laserske zrake na rotirajući element. Na rotirajućem elementu se nalazi reflektirajuća točka koja odbija laserske zrake nazad u laserski tahometar pa na tom principu prema brzini odbijanja laserske zrake tahometar mjeri brzinu vrtnje rotirajućeg elementa.



Slika 35. Primjer laserskog tahometra

Nadalje, prilikom ispitivanja vratila pri velikim brzinama vrtnje postoji velika mogućnost pregrijavanja zglobnih spojeva na vratilu. Iz tog razloga je potrebno pratiti temperaturu spojeva pomoću bez kontaktnog infracrvenog laserskog mjerača temperature. Primjer jednog takvog mjerača temperature dan je sljedećom slikom.



Slika 36. Infracrveni senzor temperature

Isto tako, kod brzo rotirajućih vratila čak i vrlo mali disbalans može prouzrokovati vibracije i time smanjiti životni vijek vratila ili čak izazvati havariju vratila pri rezonantnoj frekvenciji vibracija. Osim štetnosti na vijek trajanja vratila, vibracije imaju negativan učinak na udobnost vožnje i povećavaju razinu buke prilikom vrtnje. U svrhu smanjenja vibracija vratila potrebno je da uređaj za ispitivanje vratila u mjernom lancu ima osjetnik vibracija kako bi se pravilnim balansiranjem vibracije mogle svesti na minimum.



Slika 37. Osjetnik vibracija

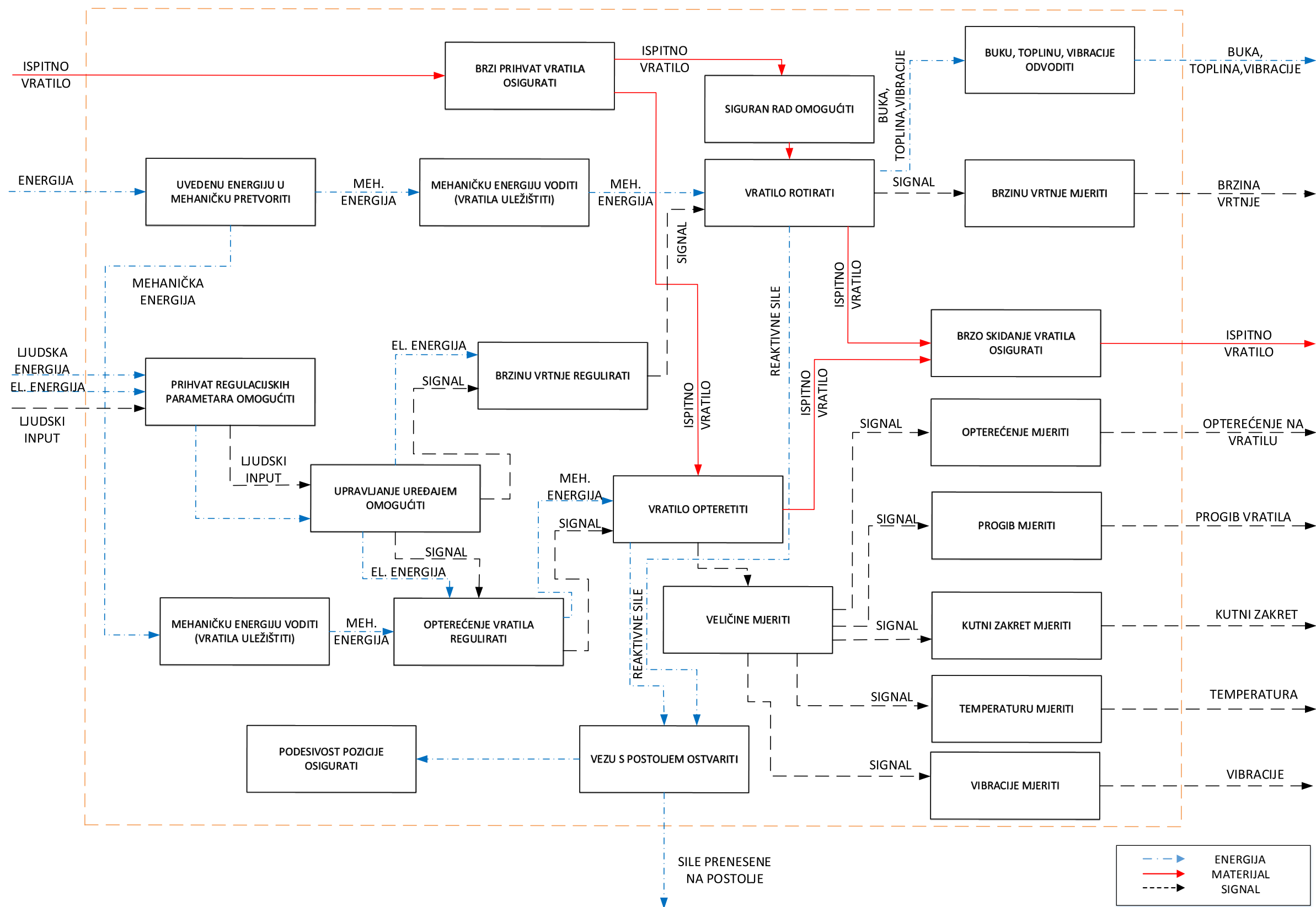
Ova vrsta osjetnika svoj rad zasniva na 2. Newtonovom zakonu gibanja ($F = ma$). Pobuda na bazi osjetnika stvara silu F na piezoelektrični materijal proporcionalnu narinutom ubrzanju a i seizmičkoj masi m (masa rotacijskog elementa). Frekvencijski odziv je određen rezonantnom frekvencijom senzora ω koja se može modelirati jednostavno za sustav s jednim stupnjem slobode (rotacija), a formula glasi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ rad/s}$$










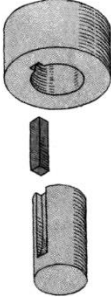



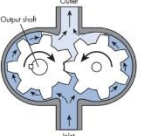



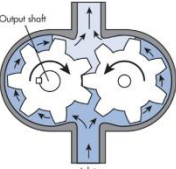

gdje k opisuje krutost piezoelektričnih elemenata unutar senzora, a m masu rotacijskog elementa.

Ovim senzorom moguće je isto tako mjeriti udarna opterećenja i akceleraciju koja djeluju na rotacijski element.

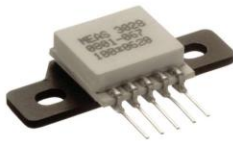






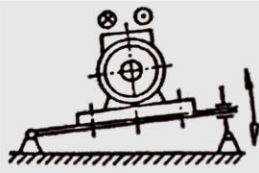




8. Funkcijska dekompozicija



9. Morfološka matrica

<p>PRIHVAT REGULACIJSKIH PARAMETARA PRIHVATITI (UPRAVLJANJE UREĐAJEM OMOGUĆITI)</p>	 KONTROLNA PLOČA	 TOUCH PANEL	 RAČUNALO		
<p>SIGURAN RAD OMOGUĆITI</p>	 SIGURNOSNA SKLOPKA	 SIGURNOSNI SENZORI	 OGRAĐIVANJE OPASNOG DIJELA UREĐAJA		
<p>BRZI PRIHVAT I SKIDANJE VRATILA OSIGURATI</p>	 JARAM SA PRIRUBNICOM	 PRIRUBNICA S OZUBLJENJEM	 STEZNA GLAVA (AMERIKANER)	 	 ZUPČASTA SPOJKA
<p>VRATILO OPTERETITI</p>	 ZAMAŠNJAK	 EL.MOTOR	 HIDRAULIČNI MOTOR	 TORZIJSKI MOTOR	 KOČNICA (Pronijeva, hidraulična, elektrodinamo metar..)
<p>VRATILO ROTIRATI</p>	 ELEKTROMOTOR	 HIDRAULIČNI MOTOR	 TORZIJSKI MOTOR		

BRZINU VRTNJE MJERITI	 TAHOMETAR	 TAHOGENERATOR	 REZOLVER	 ELEKTRO DINAMOMETAR	 INKREMENTALNI ENKODER
OPTEREĆENJE MJERITI	 TENZOMETRIJSKA TRAKA	 SENZOR TORZIJSKOG OPTEREĆENJA	 ELEKTRO DINAMOMETAR	 BEŽIČNI SENZOR TORZIJSKOG OPTEREĆENJA	
PROGIB MJERITI	 SENZOR PROGIBA VRATILA	 OPTIČKI SENZOR	 SENZOR LINEARNOG POMAKA (POSREDNA METODA)		
KUTNI ZAKRET MJERITI	 SENZOR KUTNOG ZAKRETA	 INKREMENTALNI ENKODER	 APSOLUTNI ENKODER	 REZOLVER	
TEMPERATURU MJERITI	 PIROMETAR		 IR SEZNOR TOPLINE		

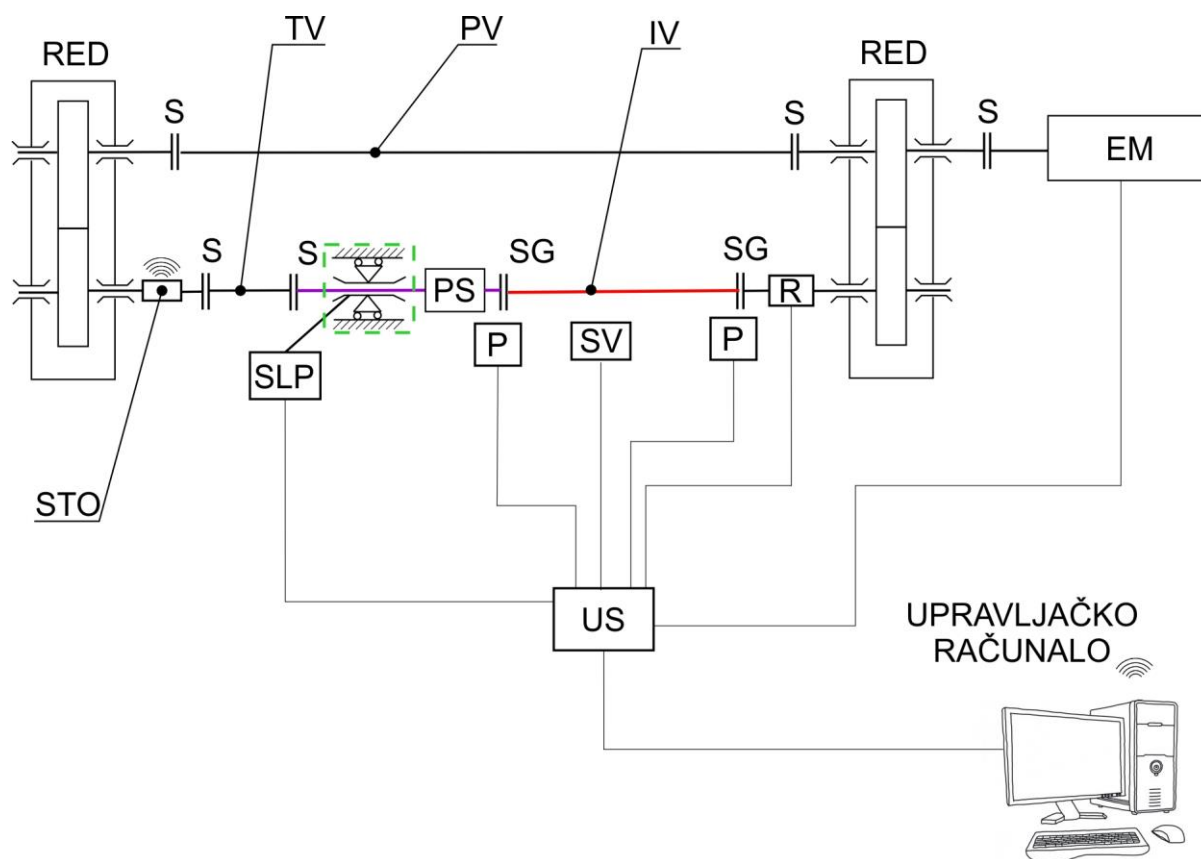
VIBRACIJE MJERITI	 AKCELEROMETAR	 SENZOR VIBRACIJA	 OPTIČKI SENZOR
VEZU S POSTOLJEM OSTVARITI	 VIJČANA VEZA	 LINEARNE VODILICE	 STEZALJKE
PODESIVOST POZICIJE OSIGURATI	 LINEARNE VODILICE	 ZAKRETANJE	 LINEARNE VODILICE S KUTNO PODESIVOM PRIRUBNICOM
MEHANIČKU ENERGIJU VODITI (VRATILA ULEŽIŠTITI)	 KUGLIČNI ILI VALJNI LEŽAJEVI	 LEŽAJ S GLAVINOM	 LINEARNI LEŽAJ

Tablica 6. Morfološka matrica

Na temelju funkcijske dekompozicije kojom je dan shematski pregled uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila te morfološke matrice kojom su dana principijelna rješenja konstrukcijskih zahtjeva određenih funkcijskom dekompozicijom generiraju se shematski prikazi koncepata prikazani u sljedećem poglavlju.

10. Shematski prikaz konceptata

10.1 Koncept 1



Slika 38. Shematski prikaz ispitnog uređaja s zatvorenim tokom snage, Koncept 1:

PS – pogonski stroj (torzijski motor), *S* – spojka, *RED* – reduktor, *TV* – teleskopsko vratilo, *PV* – pomoćno vratilo, *IV* – ispitno vratilo, *EM* – elektromotor, *STO* – bežični senzor torzijskog opterećenja, *SLP* – senzor linearnog pomaka, *P* – pirometar, *SG* – stezna glava (amerikaner), *SV* – senzor vibracija, *R* – rezolver, *US* – upravljačka sabirnica

Ovaj uređaj za ispitivanje vratila zasniva se na mehanički zatvorenom toku (krugu) snage. U ovom krugu, torzijsko opterećenje unosi se u sustav preko torzijskog motora (*PS*) dok elektromotor (*EM*) služi za dovođenje kutne brzine te za pokrivanje gubitaka snage nastalih uslijed otpora (u ležajevima, između bokova zuba, otpora maziva, itd.). Na taj način, primjenom zatvorenog toka snage, snaga elektromotora mnogo je manja od snage koja cirkulira u zatvorenom toku.

Ovaj relativno mali utrošak energije pri ispitivanju jest i glavna prednost uređaja sa zatvorenim tokom snage.

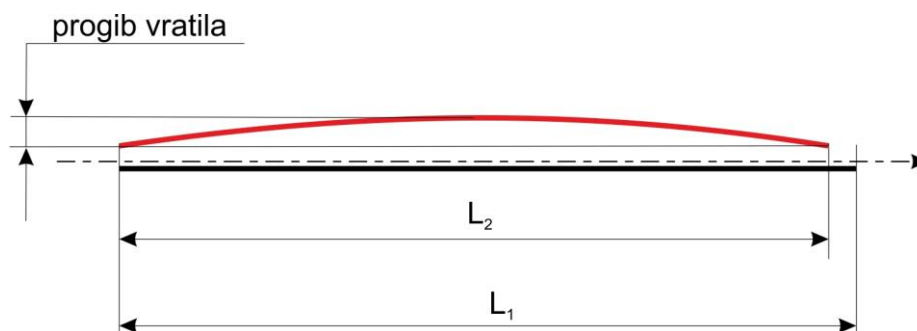
Prihvatač vratila omogućen je preko dvije stezne glave, čime je osigurano brzo postavljanje i uklanjanje vratila s uređaja za ispitivanje. Kako bi se mogla ispitivati vratila različitih dimenzija, s lijeve strane ispitnog vratila (zeleni pravokutnik) nalazi se međuvratilo (označeno ljubičastom bojom) koje je uležišteno ležajem u aksijalno pomičnoj glavini. Kako bi se omogućio relativni pomak u aksijalnom smjeru, korišteno je teleskopsko vratilo (TV).

Sustavom senzora i pogonskih elemenata upravlja se preko računala, gdje se preko upravljačke sabirnice (US) šalju i primaju signali potrebni za rad uređaja. Pa se tako pomoću računala može birati željena brzina vrtnje elektromotora (EM) te narinuti moment torzije na torzijskom motoru (PS).

Ovim uređajem moguće je mjeriti brzinu vrtnje vratila, opterećenje na vratilu, progib uslijed centrifugalnih sila, kutni zakret (deformaciju) vratila pri statičkom ili dinamičkom opterećenju, temperaturu zglobova kardanskog spoja (u slučaju ispitivanja kardanskog vratila) te mjerenje vibracija uzrokovanih disbalansom rotirajućeg vratila.

Mjerenje brzine vrtnje vratila vrši se preko rezolvera (R) koji je u stalnoj vezi s elektromotorom kako bi se moglo vršiti zadavanje željene brzine vrtnje vratila. Isto tako, rezolverom (R) mjeri se kutni zakret. Opterećenje se mjeri izravnim mjerenjem putem bežičnog senzora torzijskog opterećenja, smještenog na spoju teleskopskog vratila (TV). Temperatura zgloba se mjeri pirometrima (P).

Progib vratila mjeri se senzorom linearnog pomaka koji je smješten na glavini kojoj je omogućen aksijalni pomak. Senzorom linearnog pomaka dolazi se do vrijednosti progiba vratila posrednom metodom, odnosno preko geometrije vratila.



Slika 39. Shematski prikaz mjerenja progiba:

crna linija – mirujuće vratilo, crvena linija – rotirajuće vratilo, L_1 – dužina mirujućeg vratila, L_2 – dužina rotirajućeg vratila

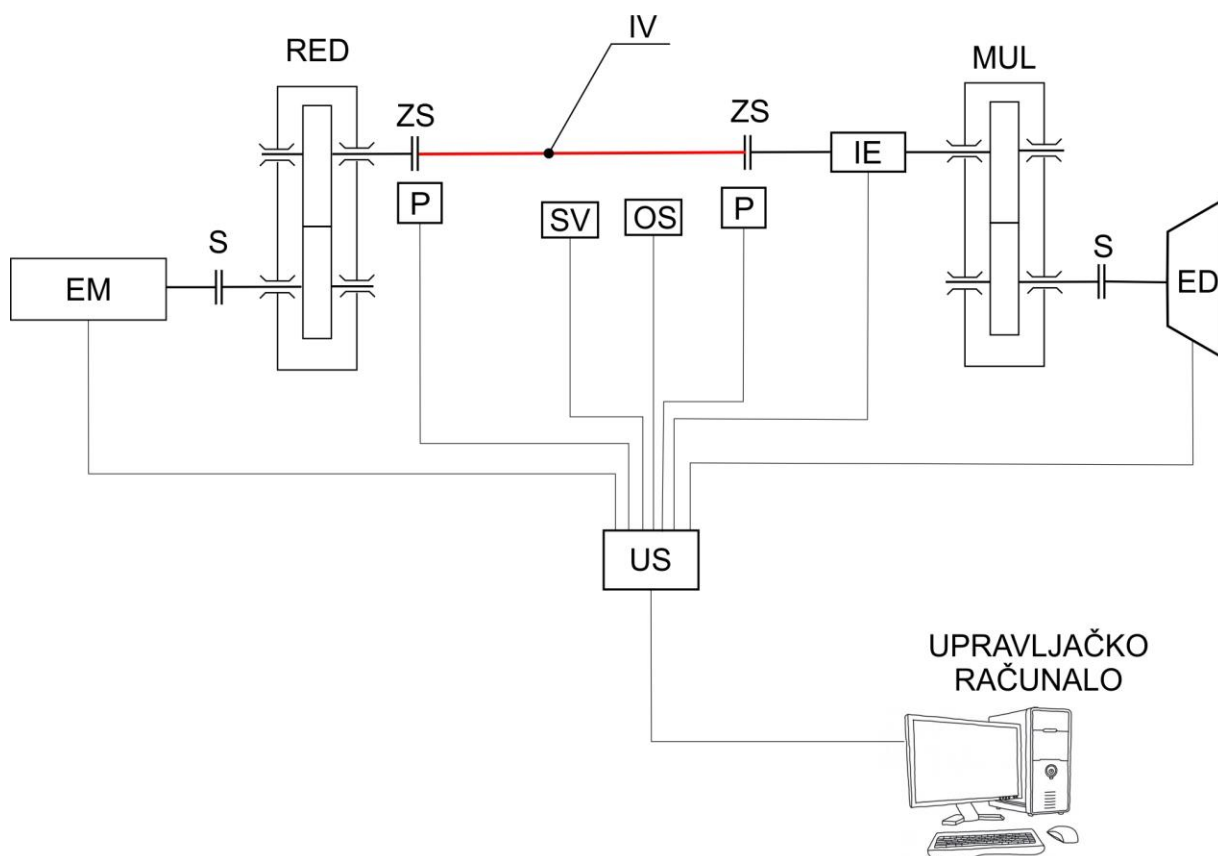
Prednosti koncepta:

- mali utrošak energije rezultira manjom potrebnom snagom elektromotora
- mogućnost statičkog i dinamičkog opterećenja vratila
- mogućnost ispitivanja vratila različitih duljina
- brzi prihvatač vratila omogućen steznim glavama

Nedostatci koncepta:

- složenost izvedbe
- brojnost komponentata koje ne sudjeluju aktivno u mjernom krugu već služe samo za prijenos snage i okretnog momenta
- skupa izrada

10.2 Koncept 2



Slika 40. Shematski prikaz ispitnog uređaja s otvorenim tokom snage, Koncept 2:

S – spojka, *ZS* – zupčasta spojka, *RED* – reduktor, *MUL* – multiplikator, *IV* – ispitno vratilo, *EM* – elektromotor, *P* – pirometar, *SV* – senzor vibracija, *US* – upravljačka sabirnica, *ED* – elektro dinamometar, *IE* – inkrementalni enkoder, *OS* – optički senzor

Ispitni uređaj je zamišljen za rad na principu mehanički otvorenog toka snage. Konstruktivno, takvi uređaj je jednostavniji od ispitnog uređaja sa zatvorenim tokom snage (Koncept 1).

Na ispitnom postolju montiraju se redno pogonski stroj (EM), prijenosnici (RED i MUL) te simulator radnog stroja (elektro dinamometar). Veza s postoljem je ostvarena stezaljkama koje omogućavaju relativno brzo premještanje komponenti sustava prema želji, a time i ispitivanje vratila različitih duljina i pod različitim kutovima (za kardanska vratila).

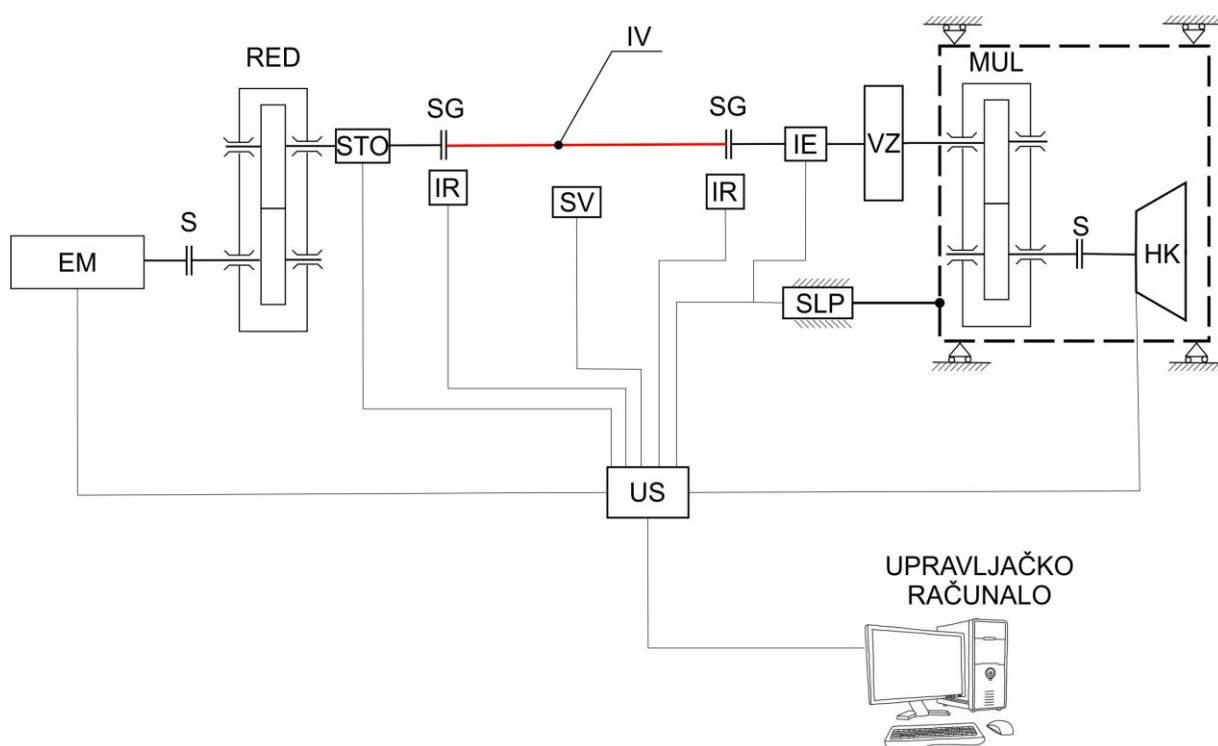
Spoj ispitnog vratila s uređajem za ispitivanje vratila ostvaren je zupčastim spojkama (ZS) koje omogućavaju relativno brzu montažu i demontažu ispitnog vratila, a istovremeno osiguravaju prijenos velikih momenata torzije.

Pirometrima (P) se mjeri temperatura zglobnih spojeva na vratilu za vrijeme ispitivanja vratila.

Ovim ispitnim uređajem moguće je mjeriti broj okretaja vratila i opterećenje momentom torzije pomoću elektro dinamometra (ED) koji je smješten poslije multiplikatora (MUL) kako bi što manjom silom ostvarivao veći moment kočenja, pa samim time lakše kočio i manje se zagrijavao.

Isto tako, kutni zakret, odnosno kutna deformacija vratila mjeri se pomoću inkrementalnog enkodera (IE). Progib vratila pri ispitivanju mjeri se optičkim senzorom (OS), dok se vibracije nastale uslijed disbalansa vratila mjere senzorom vibracija (SV).

10.3 Koncept 3



Slika 41. Shematski prikaz ispitnog uređaja s otvorenim tokom snage, Koncept 3

S – spojka, *SG* – stezna glava (amerikaner), *RED* – reduktor, *MUL* – multiplikator, *IV* – ispitno vratilo, *EM* – elektromotor, *IR* – infracrveni senzor temperature, *SV* – senzor vibracija, *US* – upravljačka sabirnica, *HK* – hidraulička kočnica, *IE* – inkrementalni enkoder, *SLP* – senzor linearnog pomaka, *VZ* – varijabilni zamašnjak, *STO* – senzor torzijskog opterećenja





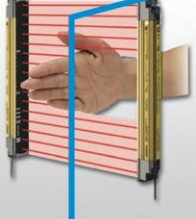








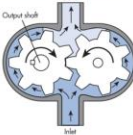



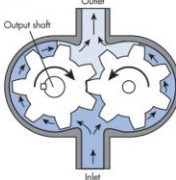

I ovaj ispitni uređaj radi na principu mehanički otvorenog toka snage. Snaga se u sustav unosi preko elektromotora (EM) na kojeg je redno spojen reduktor (RED) nepomično pričvršćen za postolje. Steznim glavama (SG) omogućen je brzi prihvat i uklanjanje vratila s ispitnog uređaja. Nadalje, unutar sustava nalazi se i varijabilni zamašnjak (VZ) namijenjen simuliranju opterećenja na vratilu prilikom testiranja. Stoga, varijabilni zamašnjak (VZ) u ovom slučaju predstavlja sve mase koje vratilo mora pokrenuti u realnim eksploatacijskim uvjetima.

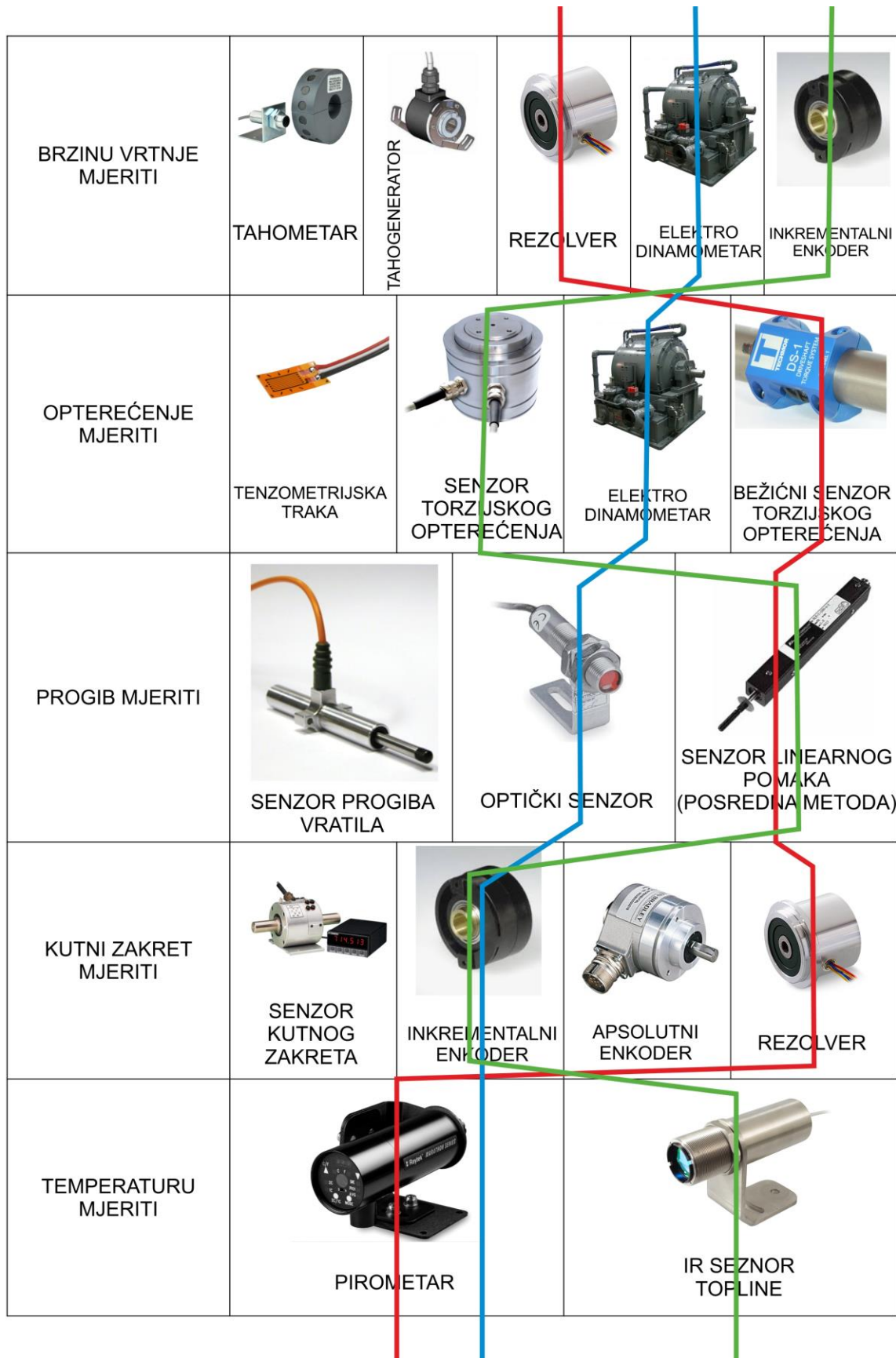
U crnom crtkanom kvadratu nalazi se sklop s multiplikatorom (MUL) te hidrauličnom kočnicom (HK), a povezani su spojkom (S). Cijeli sklop se nalazi na vodilicama koje omogućavaju relativni aksijalni pomak do kojeg dolazi uslijed pojave progiba na vratilu prilikom testiranja. Upravo taj relativni aksijalni pomak očitava se senzorom linearnog pomaka (SLP) daje nam podatak o veličini progiba vratila. Isto tako, aksijalnim pomakom sklopa multiplikatora i kočnice omogućeno je ispitivanje različitih duljina vratila.

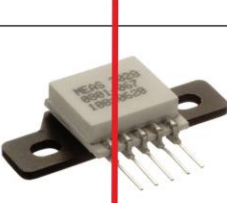
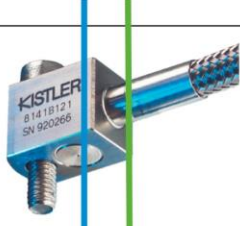





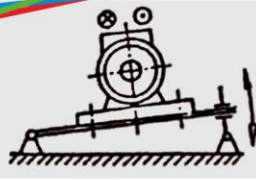




Ispitni uređaj opremljen je raznim sensorima, kao što su senzor torzijskog opterećenja (STO) kojim se očitava narinuti moment torzije na ispitnom vratilu (IV), inkrementalni enkoder (IE) za mjerenje kutnog zakreta ispitnog vratila (IV), infracrveni senzori temperature (IR) smješteni kod zglobova vratila te senzor vibracija (SV). Mjerenje broja okretaja vratila vrši se pomoću pogonskog elektromotora (EM), čijim radom se upravlja preko upravljačkog računala.

Isto tako, upravljačkim računalom upravlja se radom hidrauličke kočnice, što omogućava opterećivanje ispitnog vratila (IV) i zaustavljanje uređaja pri kraju ispitivanja.

10.4 Prikaz odabranih rješenja iz morfološke matrice

<p>PRIHVAT REGULACIJSKIH PARAMETARA PRIHVATITI (UPRAVLJANJE UREĐAJEM OMOGUĆITI)</p>	 KONTROLNA PLOČA	 TOUCH PANEL	 RAČUNALO		
<p>SIGURAN RAD OMOGUĆITI</p>	 SIGURNOSNA SKLOPKA	 SIGURNOSNI SENZORI	 OGRAĐIVANJE OPASNOG DIJELA UREĐAJA		
<p>BRZI PRIHVAT I SKIDANJE VRATILA OSIGURATI</p>	 JARAM SA PRIRUBNICOM	 PRIRUBNICA S OZUBLJENJEM	 STEZNA GLAVA (AMERIKANER)	 ZUPČASTA SPOJKA	 ZUPČASTA SPOJKA
<p>VRATILO OPTERETITI</p>	 ZAMAŠNJAK	 EL. MOTOR	 HIDRAULIČNI MOTOR	 TORZIJSKI MOTOR	 KOČNICA (Pronijeva, hidraulična, elektrodinamo metar..)
<p>VRATILO ROTIRATI</p>	 ELEKTROMOTOR	 HIDRAULIČNI MOTOR	 TORZIJSKI MOTOR		



VIBRACIJE MJERITI	 AKCELEROMETAR	 SENZOR VIBRACIJA	 OPTIČKI SENZOR
VEZU S POSTOLJEM OSTVARITI	 VIJČANA VEZA	 LINEARNE VODILICE	 STEŽALJKE
PODESIVOST POZICIJE OSIGURATI	 LINEARNE VODILICE	 ZAKRETANJE	 LINEARNE VODILICE S KUTNO PODESIVOM PRIRUBNICOM
MEHANIČKU ENERGIJU VODITI (VRATILA ULEŽIŠTITI)	 KUGLIČNI ILI VALJNI LEŽAJEVI	 LEŽAJ S GLAVINOM	 LINEARNI LEŽAJ

Tablica 7. Morfološka matrica s elementima korištenim u konstruiranju koncepata:
Crvenom linijom prikazan je Koncept 1, plavom linijom prikazan je Koncept 2, dok je Koncept 3 prikazan zelenom linijom u morfološkoj matrici

11. Vrednovanje koncepata

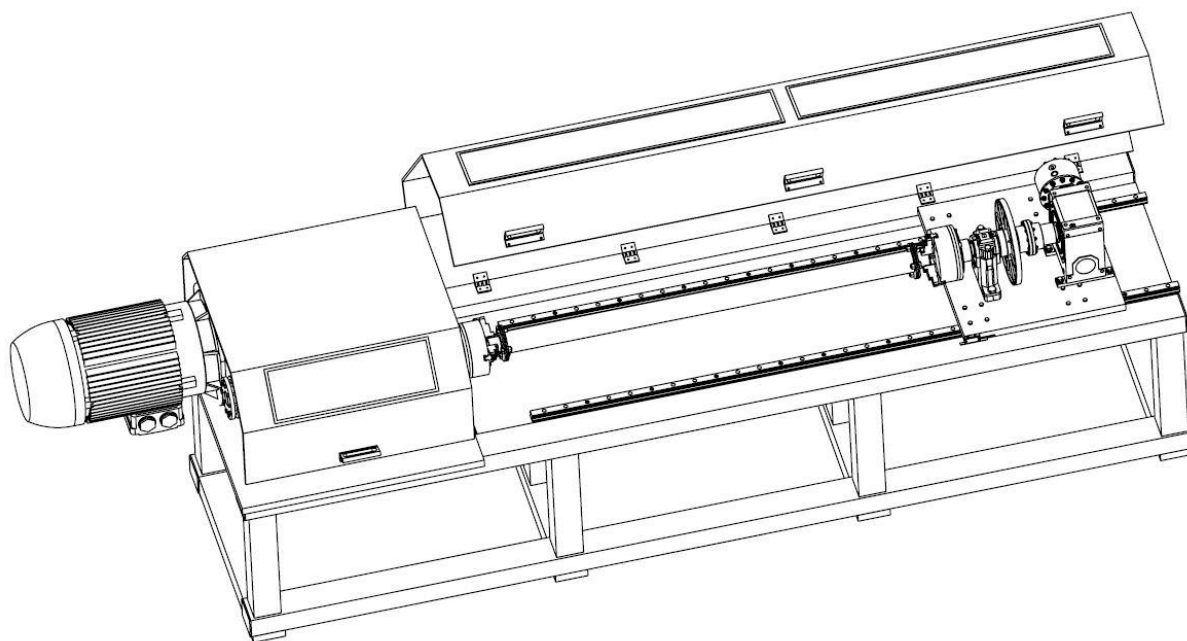
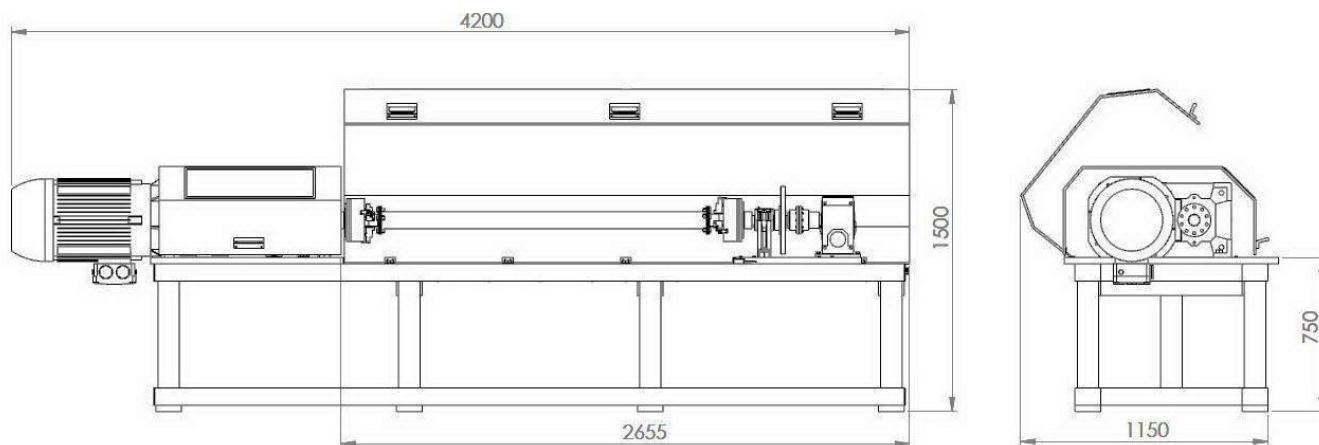
U svrhu odabira koncepta za detaljnu razradu napravljena je tablica za vrednovanje koncepata. Ocjene koncepata su od 1 do 10 gdje ocjena 1 označava vrlo loše ispunjen kriterij dok ocjena 10 označava u potpunosti ispunjen kriterij.

ODABIR KRITERIJA	KONCEPT 1	KONCEPT 2	KONCEPT 3
Spektar opterećenja vratila	8	7	8
Jednostavnost izrade (proizvodni postupci, tehnologija)	6	6	8
Složenost izvedbe pogona	6	7	8
Mogućnosti mjerenja	7	7	9
Sigurnost	9	9	9
Cijena	7	6	8
Σ	43/60	42/60	50/60
Rang lista	2.	3.	1.

Tablica 8. Vrednovanje koncepata

Temeljem tablice za vrednovanje koncepata odlučeno je da će se Koncept 3 detaljnije razraditi po uzoru na shematski prikaz iz prijašnjeg poglavlja. Isto tako, lošije ocjene koje je dobio Koncept 3 pokušati će se daljnjom konstrukcijskom razradom poboljšati. Kod daljnje razrade valja imati na umu da sve komponente ispitnog uređaja moraju biti tehnološki izvedive, odnosno da se svi standardni dijelovi korišteni pri konstruiranju mogu nabaviti na tržištu.

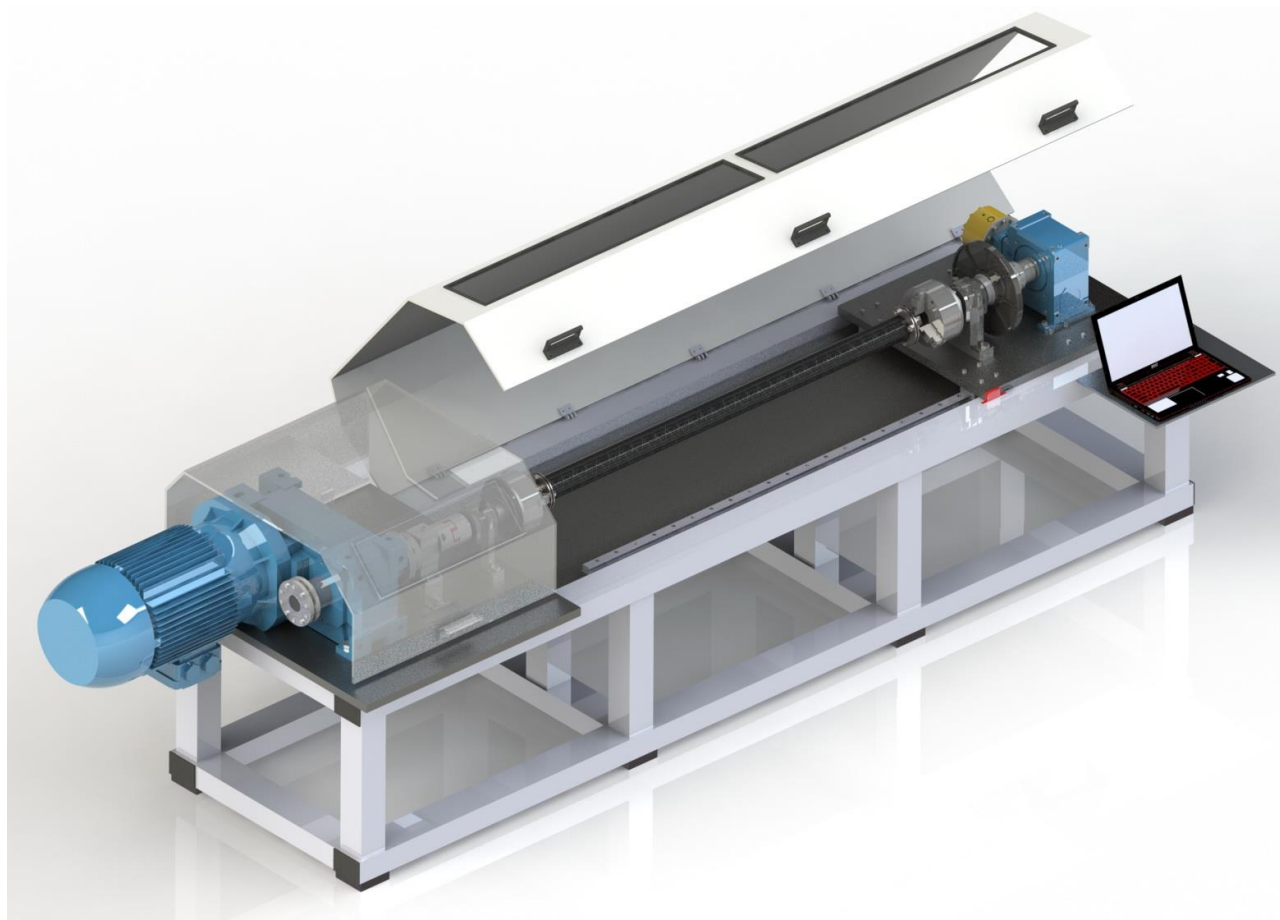
12. Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila



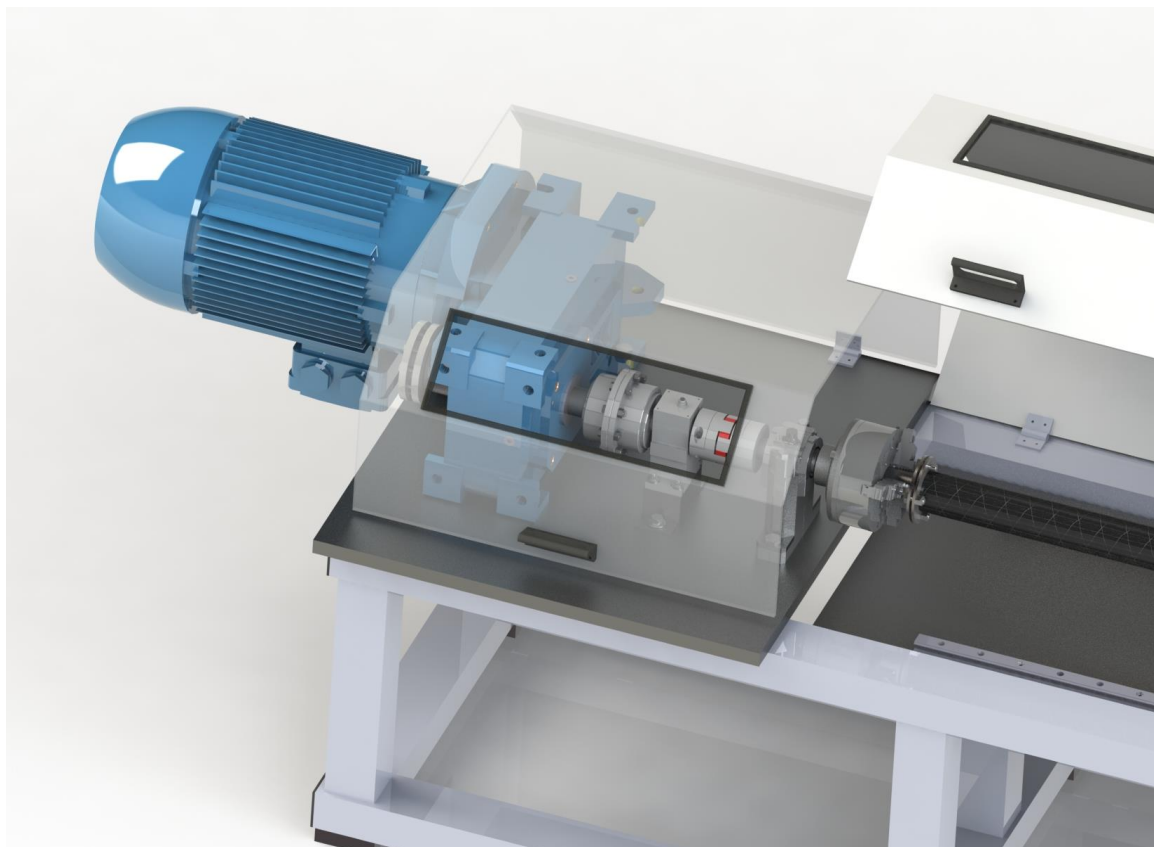
Slika 42. Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila

Pri konstruiranju uređaja posebna je pažnja usmjerena na tehnološkičnost izrade kako bi se uređaj izradio u što kraćem vremenu, što jeftinije i sa što manje obrade. Isto tako, većina dijelova uređaja je standardna i može se nabaviti na tržištu. Time je pridoneseno znatnom pojednostavljenju izrade uređaja.

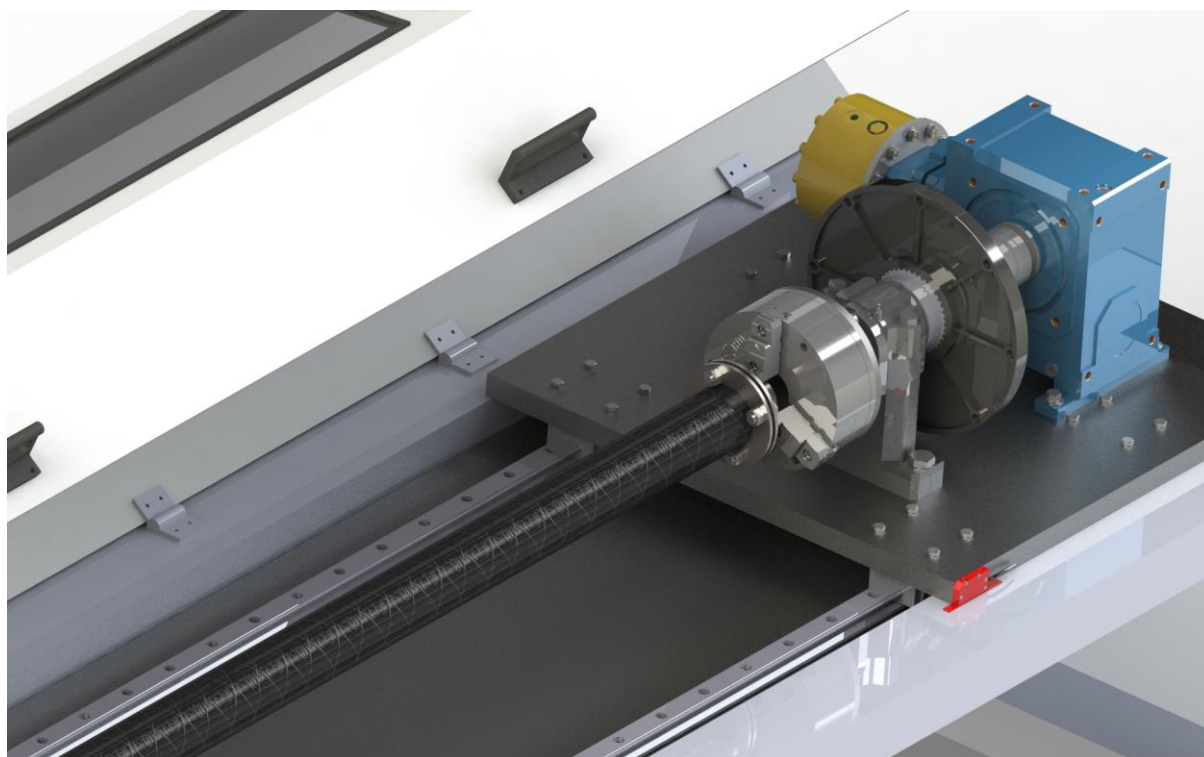
Detaljniji pregled uređaja dan je Prilogom 1.



Slika 43. Izometrijski prikaz idejnog rješenja uređaja za ispitivanje vratila



Slika 44. Detalj pogonskog dijela uređaja



Slika 45. Detalj gonjenog dijela uređaja

13. Zaključak

Radom je dan pregled svojstava kompozitnih materijala, podjela kompozita prema materijalu matrice i vlakana te primjeri primjene kompozitnih materijala u industriji. Prikazana je podjela osnovnih vrsta spojeva kompozit – metal i konstrukcijskih rješenja spojeva kompozita i metala. Također, radom je dan pregled bitnih stavki kod konstruiranja kompozitnog vratila kao što su odabir vrste materijala, vrste smole, vrste ljepila i tehnike izrade.

Isto tako, prikazane su vrste opterećenja koje djeluju na vratilo i spoj kompozit – metal na vratilu te kriteriji pri odabiru vrste spoja kompozit – metal.

Razvojem kompozitnih materijala te tehnologije izrade kompozitnih vratila sve se više tvrtki upušta u izradu svojih prototipova kompozitnih vratila koje je prije prodaje kupcima potrebno ispitati zadovoljavaju li sve potrebne kriterije za siguran i pouzdan prienos okretnog momenta. Samim time otvara se novo tržište, a ono se zasniva na razvoju uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila.

Istraživanjem tržišta uočeno je da postoje ispitni uređaji za ispitivanje vratila te da postojeći uređaji ne mogu potkrijepiti sve vrste opterećenja i rađeni su prema određenoj namjeni i ispitnom području.

Predložena su tri konceptijska rješenja. Vrednovanjem i ocjenjivanjem koncepata za daljnju razradu odabran je Koncept 3. Na temelju shematskog prikaza koncepta, napravljen je idejni model uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila. Uređaj ima namjenu ispitivanja vratila u različitim radnim uvjetima gdje je potrebno regulirati brzinu vrtnje vratila te moment narinut na vratilo pri dinamičkim uvjetima ispitivanja. Namjena uređaja proizašla je iz eksploatacijskih i funkcionalnih uvjeta u kojima se primjenjuju kompozitna vratila u automobilske industriji.

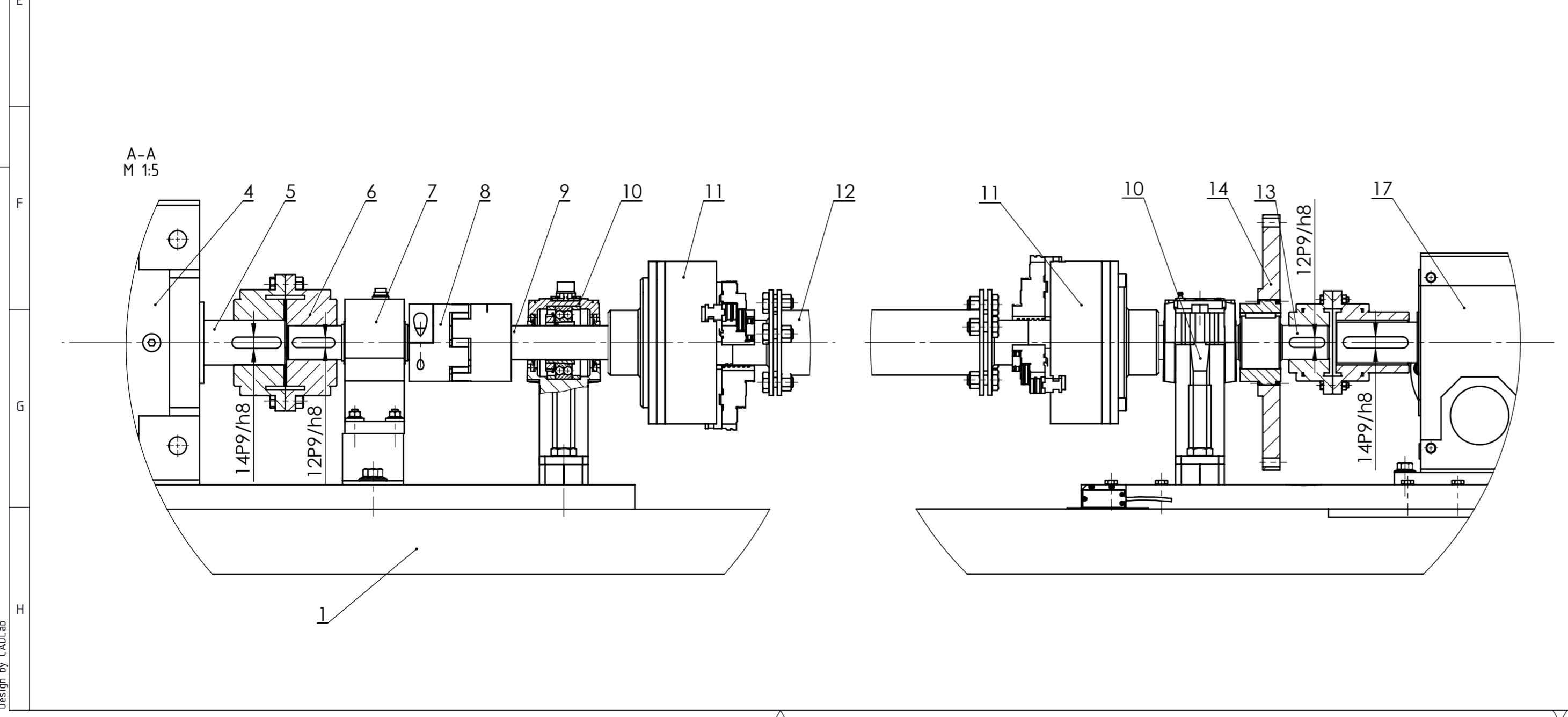
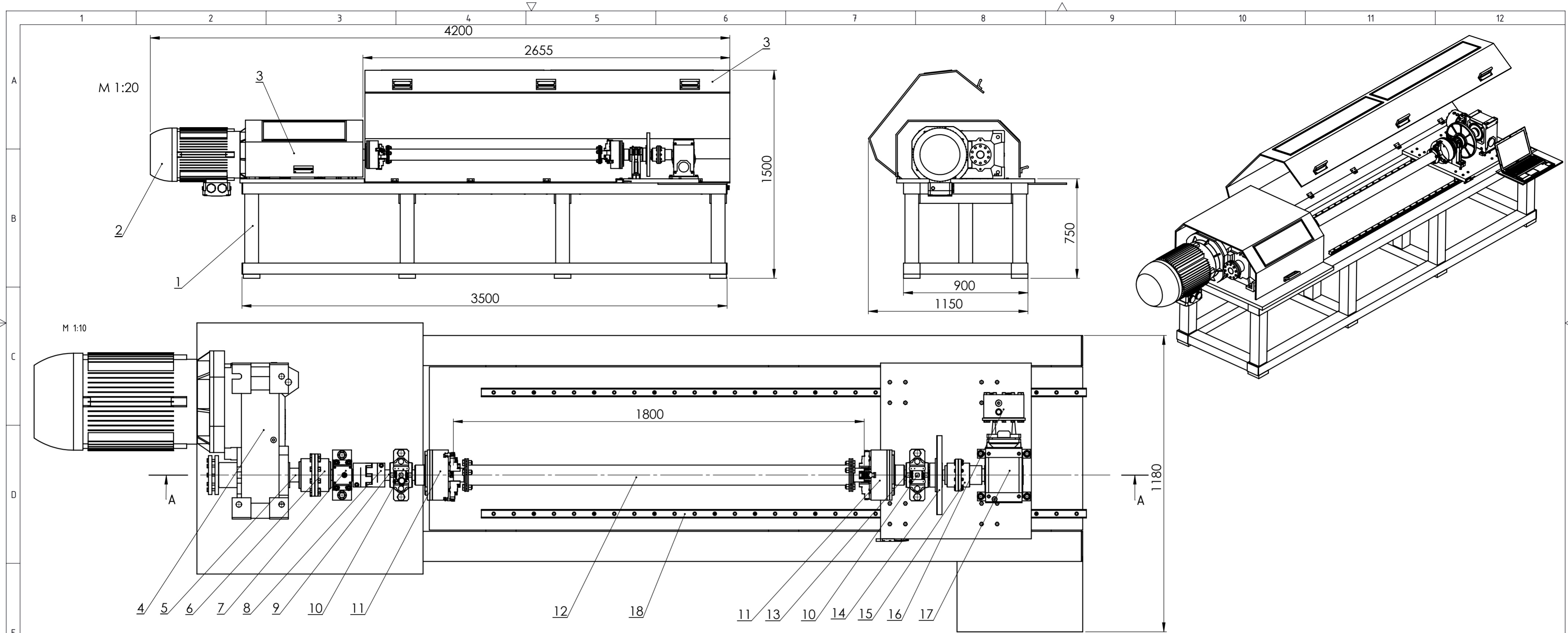
Konstrukcijskom razradom problema konstruiranja kompozitnih vratila te sagledavanjem problema konstruiranja kompozitnih vratila i primjene istih dan je prikaz mogućih pravaca razvoja ispitnih uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila.

14. Literatura

- [1] Filetin T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb 2002.
- [2] Suryawanshi B.K., Damle P.G.: Review of Design of Hybrid Aluminium/Composite Drive Shaft for Automobile
- [3] Bhajantri V.S., Bajantri S.C., Shindolkar A.M., Amarapure S.S.: Design and analysis of composite drive shaft
- [4] Khoshhravan M.R., Paykani A.; Design of a Composite Drive Shaft and its Coupling for Automotive Application
- [5] Pollard, A.: Polymer matrix composites in driveline applications, GKN Technology, Wolverhampton, UK
- [6] Kim W.S., Lee J.J.: Interfacial fracture toughness measurement and improvement for composite/metal interfaces
- [7] Dons, K.: Filament winding of composite tubes
- [8] Peters S.T., Humphrey W.D., Foral R.F.: Filament winding - composite structure fabrication, ISBN 0-938994-81-6
- [9] Kunej, W.: Poliesterski kompoziti, Metalmineral, 2006., ISBN 953-99392-1-6
- [10] Azo Materials: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=997>
- [11] Keys C., Kinkler W., Santiago A.: Composite driveshaft: Efficiency, Safety and Economics
- [12] Matsuzaki R., Shibata M., Todoroki A.: Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method
- [13] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration: Stress Analysis of In-Plane, Shear-Loaded, Adhesively Bonded Composite Joints and Assemblies, April 2001., Virginia Springfield
- [14] Fors, F.: Analysis of Metal to Composite Adhesive Joints in Space Applications
- [15] Plexus Structural Adhesives: Guide to bonding plastics, composites and metals
- [16] Car torque specification list: <http://www.autosnout.com/Car-Torque-List.php>
- [17] Blum – Novotest: <http://www.blum-novotest.com/>
- [18] Strama – MPS: <http://www.strama-mps.de/>
- [19] SICK, Inc.: Guidelines for safe machinery
- [20] Papić, V.: Elektroničke komponente mehatroničkih sustava – Mjerni pretvornici (senzori), Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Zavod za konstruiranje u strojarstvu

15. Prilozi

- I. Tehnička dokumentacija
- II. CD-R disk



Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
18.	Linearne vodilice	2	ISEL LS 35 SS		l = 2640	8 kg
17.	Multiplikator	1	WEG		WEG	180 kg
16.	Hidraulička kočnica	1	Warner Electric			25 kg
15.	Spojka 2	1	Suoda GAB4			8 kg
14.	Zamašnjak	1	SITSPA		Ø 315x50x Ø 65	
13.	Vratilo 2	1	001-005	S355	Ø 65x280	4 kg
12.	Ispitno vratilo	1	001-004			
11.	Stežna glava	2	ISEL		Ø 200x120x Ø 55	15 kg
10.	Uležištenje	2	SNL 510		SKF	7 kg
9.	Vratilo 1	1	001-003	S355	Ø 55x250	3 kg
8.	Zupčasta spojka	1	XL-19-KC			6 kg
7.	Senzor momenta torzije	1	Fufek TRS705		Fufek	12 kg
6.	Spojka 1	1	Suoda GAB3		Suoda	6 kg
5.	Mjerno vratilo	1	010-002	S355	Ø 65x425	8 kg
4.	Reduktor	1	WEG FSA		WEG	250 kg
3.	Zaštitna pregrada	2	001-001		2640x850x400	10 kg
2.	Elektromotor	1	WEG motor		WEG	210 kg
1.	Postolje	1	010-001	S355	3500x900x750	850 kg

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis
	14.02.2016.	Nikola Kuzmić	
Razradio		Nikola Kuzmić	
Crtao		Nikola Kuzmić	
Pregledao			

ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:
14P9/h8 +0,009 -0,061		R. N. broj:
12P9/h8 +0,009 -0,061	Napomena:	
	Materijal:	Masa: 1600 kg
	Mjerilo originala	Naziv: Idejno rješenje uređaja za ispitivanje kompozitnih vratila
	M 1:20	Crtež broj: 100-001-001
		Format: A2
		Listova: 1
		List: 1