

# Konstrukcija hidrauličnih disk kočnica cestovnog bicikla

---

Trgovac, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:033017>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**KONSTRUKCIJA HIDRAULIČNIH DISK KOČNICA  
CESTOVNOG BIKIKLA**

Rijeka, rujan 2024.

Ivan Trgovac

0069092074

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**KONSTRUKCIJA HIDRAULIČNIH DISK KOČNICA  
CESTOVNOG BIKIKLA**

Mentor: Prof.dr.sc. Marina Franulović

Rijeka, rujan 2024.

Ivan Trgovac

0069092074

Rijeka, 27.08.2024.

Zavod: Zavod za konstruiranje  
Predmet: Konstrukcijski elementi I

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Ivan Trgovac (0069092074)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Konstrukcija hidrauličnih disk kočnica cestovnog bicikla / Design of road bicycle hydraulic disc brakes**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti konstrukciju hidrauličnih disk kočnica cestovnog bicikla. Pri tome treba uzeti u obzir samu konstrukciju bicikla i njegovih pogonskih karakteristika kako bi se što točnije procijenili ulazni parametri za njihov proračun: brzina, faktori trenja, materijala pojedinih komponenti, površinske karakteristike te potrebno vrijeme zaustavljanja bicikla. Geometrijske karakteristike moraju biti takve da se zadovolje kriteriji čvrstoće svih elemenata konstrukcije. Rad treba biti popraćen tehničkim opisom dijelova sustava, svim potrebnim proračunima elemenata, skicama i nacrtima.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
prof. dr. sc. Marina Franulović

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žić

## **IZJAVA**

Sukladno pravilniku o preddiplomskom sveučilišnom studiju Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio Završni rad u razdoblju od 01.lipnja 2024. do 01.rujna 2024. godine. Rad sam izradio prema zadatku pod vodstvom mentorice prof.dr.sc. Marina Franulović.

Ivan Trgovac

Potpis:

## **Zahvale**

Većinu moje zahvalnosti pridajem svojoj mentorici koja me podupirala tijekom osmišljavanja i razrade teme te bez njezine podrške nikada ne bih uspio u svojoj zamisli te ovaj rad ne bi postojao baš na ovaj datum. Također sam zahvalan svojim roditeljima na strpljenju i vjerovanju u mene sada kao i tijekom studija. Jednako važan aspekt donosi podrška mojih prijatelja i svih koji su vjerovali u mene te se veselili mojem uspjehu, te naravno zahvalan sam svim svojim profesorima od kojih sam kumulativno skupljao znanje i iskustvo. Nedvojbeno najvažniji dio na koji polažem svoju zahvalnost je moj vlastiti trud i želja bez koje bi svaka pomoć bila nedovoljna.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPIS HIDRAULIČKIH DISK KOČNICA NA CESTOVNOM BICIKLU .....	3
3. KONSTRUKCIJA CESTOVNOG BICIKLA .....	5
3.1. Geometrija cestovnog bicikla.....	5
3.2. Pogonske karakteristike cestovnog bicikla .....	8
3.3. Montažni konstrukcijski dijelovi.....	11
4. KONSTRUKCIJA PREDNJE HIDRAULIČKE DISK KOČNICE.....	15
4.1. Disk prednje kočnice.....	15
4.1.1. Proračun sila koje djeluju na disk.....	15
4.1.2. Geometrija i dizajn diska.....	20
4.1.3. Materijali izrade diska .....	25
4.1.4. Masa diska .....	30
4.1.5. Proračun čvrstoće zakovica .....	32
4.1.6. Proračun čvrstoće montažnih vijaka.....	38
4.1.7. Numerička analiza nosivosti diska .....	44
4.1.8. Analiza termičkog naprezanja .....	46
4.1.9. Sustav hlađenja diska.....	51
4.2. Prednja kočnica .....	53
4.2.1. Osnovna geometrija, dizajn i materijali izrade kočnice .....	53
4.2.2. Fizikalni principi hidrauličkog kočenja i kočiono ulje.....	57
4.2.3. Geometrija kočionih pakni .....	61
4.2.4. Materijal i otpornost kočionih pakni .....	63
4.2.5. „Ice technology“ tehnologija odvođenja topline .....	64
4.2.6. Montaža kočnice na prednju vilicu.....	66
5. RAZLIKE PREDNJE I STRAŽNJE HIDRAULIČKE DISK KOČNICE .....	70
6. ZAKLJUČAK.....	72
7. LITERATURA .....	74
8. POPIS SLIKA.....	77
9. POPIS TABLICA .....	79

10. SAŽETAK .....	80
11. SUMMARY .....	81



## 1. UVOD

Hidrauličke disk kočnice su jedan od boljih predstavnika fuzije različitih grana strojarstva odnosno tehničkih znanosti. Iako se navedena tvrdnja odnosi na kočnice općenito, hidrauličke disk kočnice na cestovnom biciklu nisu iznimka ni u kojem slučaju. Naizgled mala i jednostavna konstrukcija koja ima vrlo jednoličnu i repetitivnu ulogu zahtjeva široko znanje konstruktora i dizajnera iz raznih područja strojarstva kako bi savršeno i sigurno funkcionirala. Hidrauličke disk kočnice na cestovnom biciklu imaju, kao i svaki tehnički sustav koji je do sada izumljen, svoj slijed razvoja koji je krenuo od trivijalnih konstrukcijskih rješenja te se s vremenom usavršavao ne bi li danas došao do tehnologija koje grade budućnost. Unatoč toj snažnoj povezanosti moguće ih je smjestiti u granu strojarstva na kojoj se najviše temelje i čije znanje najviše iziskuju, a to je konstruiranje. Ono je centralna jedinica koja koristi znanja iz drugih područja strojarstva te ih primjenjuje na konstruiranje i dizajniranje, u ovom slučaju hidrauličkih disk kočnica. Gotovo je nemoguće nabrojati sve faktore koje treba uzeti u obzir pri izradi tog tipa kočnica, ali vrlo je korisno nabrojati osnovna područja strojarstva koja treba uzeti u obzir prilikom njihove konstrukcije.

Kako sam opis teme govori, hidrauličke kočnice podrazumijevaju njihovo funkcioniranje na temelju zakona mehanike fluida te bez stručnosti u tom području konstrukcija ne bi bila funkcionalna. Dinamika je sljedeće područje koje igra određenu ulogu radi fundamentalnih pojava prilikom kočenja kao što su sile, trenje, rotacije, momenti te općenito gibanje. Na to se nadovezuju područja čvrstoće konstrukcija i inženjerstva materijala jer i disk i kočnica moraju biti u stanju izdržati sva opterećenja kroz određeni vremenski period na što također u velikoj mjeri utječe vrsta materijala od kojeg je napravljen pojedini element kočionog sustava kao i dimenzije pojedinih elementa. Uz sve navedeno postoji jedna vrlo važna i pomalo čudljiva pojava koju izučava termodinamika, a to je toplina koja se stvara kao rezultat trenja. Nju treba posebno nadzirati jer je ona sveprisutna kada je u pitanju funkcionalnost kočnica i može imati negativan učinak.

Ponekad je vrlo nespretno povući jasnu granicu između pojedinih područja primjene zbog iznimne isprepletenosti i cjelokupnog potrebnog znanja kojeg konstrukcija hidrauličkih disk kočnica na cestovnom biciklu zahtijeva. Tada postaje veoma jasno da mnoga područja strojarstva tvore cjelinu koja ne prepoznaje podjele već se temelji na mnoštvu fizikalnih principa i zakona koje treba razumjeti i u skladu s njima osmišljavati konstrukcijska rješenja.

Zadnje ekstremno važno područje koje omogućava konstruiranje i dizajniranje kočnica, kao i svega ostaloga, je matematika, uz računarsko inženjerstvo koje je prag budućnosti. Naravno, važno je napomenuti da su hidrauličke disk kočnice cestovnog bicikla samo jedna od inačica mnoštva sličnih izuma koji se ugrađuju i imaju istu ulogu na motorima, autima i ostalim vozilima. Iako su kočnice na takvim vozilima konstrukcijski zahtjevnije i složenije, i dalje iziskuju znanja iz istih područja struke kao i biciklističke kočnice. Ta činjenica ukazuje na naizgled iznenađujući karakter hidrauličkih disk kočnica na biciklu, a to je njihova kompleksnost i zahtjevnost s obzirom na jednostavnu funkciju i izgled.

## 2. OPIS HIDRAULIČKIH DISK KOČNICA NA CESTOVNOM BICIKLU

Među mnoštvom različitih vrsta i izvedbi kočnica na cestovnom biciklu, hidrauličke su našle najširu primjenu ponajviše zbog svojih vrhunskih karakteristika i prostora za usavršavanje. Ovdje valja napomenuti koje su to vrste kočnica od kojih su hidrauličke u pravilu superiornije. To bi bile mehaničke disk kočnice gdje silu kočenja od ručice do kućišta kočnice prenosi čelična sajla čije zatezanje dovodi to pritiskanja kočionih pakni o rotirajući disk ostvarujući potrebno trenje. Druga vrsta kočnice su obručne kočnice koje funkcioniraju na istom fizikalnom principu kao i mehaničke disk kočnice s naročito vidljivom razlikom, a to je smještaj kočnice odnosno njezina montaža na okvir bicikla na način da obavija gumu te pakne pritišću felgu po obodu tik ispod gume. Niti jedna druga nespomenuta izvedba kočnica ne konkurira hidrauličkima, možda zbog načina njezine konstrukcije, ali nedvojbeno zbog fizikalnog principa na kojemu se temelji njezin rad o kojem će biti riječ u kasnijim poglavljima.

Sukladno automobilskim kočnicama ili onima bilo kojeg drugog vozila, riječ je o čitavom kočionom sustavu što nalaže postojanje niza vitalnih elemenata i dijelova koji ga čine. Jedno od umijeća konstrukcije i dizajna hidrauličkih disk kočnica na cestovnom biciklu jest napraviti ih prateći zlatna pravila u biciklizmu koja glase da svaki dio ili sustav mora biti čim lakši, kompaktniji i aerodinamičniji bez ugrožavanja funkcionalnosti. Tim uvjetima je postavljen podosta zahtjevan izazov koji se konstantno nastoji iznova savladati ne bi li se unaprijedila konstrukcija.

To treba itekako imati na umu dizajnirajući svaki od neophodnih dijelova kao što su, krećući od početka, ručice na lijevoj i desnoj strani volana koje biciklist tijekom kočenja pritišće prema sebi te time utječe na mehanizam unutar volana nakon čega se sila kočenja preko hidrauličke cijevi prenosi do prednje i stražnje kočnice. Optimalno je kočiti koristeći kažiprst i srednji prst kako bi sa preostala dva prsta i palcem i dalje bio osiguran čvrst hvat na volanu. Ručica je zapravo poluga koja je kod cestovnih bicikala postavljena okomito na volan kako bi kočenje bilo što prirodnije i efikasnije. Tome je tako jer je cijela geometrija volana uvelike drugačija nego u brdskih ili gradskih bicikala. Dizajniran je na način da je prvotno savinut prema naprijed, a potom prema dolje tvoreći slovo „U“ čime je stvorena geometrija koja pruža strahoviti aerodinamički potencijal što je proporcionalno brzini koja se može postići koja je jedan od primarnih pokazatelja kvalitete cestovnog bicikla. Nadalje, od ručice sila se prenosi preko hidrauličke cijevi do kočnice hidrauličkim uljem. Ono je ključna karika po kojoj se takav

tip disk kočnica razlikuje od ostalih. Iz svega navedenog shodno je zaključiti da je prijenos sile hidrauličkim uljem od ručice do kočnice u mnogim aspektima djelotvorniji od mehaničkog prijenosa sajlom ili nekom drugom izvedbom mehaničkog kočenja zbog dominacije hidrauličkih disk kočnica u biciklističkoj industriji.

Nakon što se sila kočenja prenese do kočnice, hidrauličko ulje pritisne kočione pakne koje zatim vrše silu okomito na rotirajući disk ostvarujući potrebno trenje za usporavanje odnosno zaustavljanje. Disk je tanak i okrugao konstrukcijski element koji je montiran na osovinu kotača te rotira zajedno s njim. Kočnica, kao drugi glavni element, je montirana na karbonsku vilicu, ukoliko je riječ o prednjoj kočnici, tako da njezina čeljust obavija tarnu plohu diska kako bi primicanje pakni uslijed kočenja nastojalo trenjem zaustaviti rotaciju diska, a samim time i cijelog bicikla. Ukoliko je riječ o stražnjoj kočnici, ona je montirana na okvir bicikla blizu stražnje osovine također obavijajući disk. Iako poprilično složen za konstruiranje, hidraulički disk kočioni sustav na cestovnom biciklu ima prilično razumljiv i ne toliko složen princip rada.

### **3. KONSTRUKCIJA CESTOVNOG BICIKLA**

#### **3.1. Geometrija cestovnog bicikla**

Kako bi se uspješno provela konstrukcija hidrauličkih disk kočnica, nužno je uzeti u obzir i samu geometriju bicikla. Tome je tako jer je bicikl poput sustava međusobno višestruko zavisnih dijelova i komponenti koji trebaju funkcionirati u što boljem skladu.

Općenito govoreći, kako bi se išta konstruiralo mora se poznavati namjena konstrukcije te uvjeti rada odnosno ekstremni uvjeti kojima će konstrukcija biti izložena tijekom upotrebe. To znači da se početak bilo kojeg procesa konstruiranja i dizajniranja svodi na određivanje ulaznih podataka za proračun. Kako bi ta prva faza bila što bolje izvršena potrebno je kvalitetno istražiti i analizirati sve utjecajne faktore, a naročito one koji imaju dominantni utjecaj. Pošto je unutar pojma cestovni bicikl utkan DNA brze vožnje ( naspram MTB i gradskih bicikala ), važno je uzeti u obzir čitavu geometriju jer je ona jedan od utjecajnih faktora za konstrukciju kočnica koje moraju omogućiti pouzdano kočenje pri velikim brzinama.

Usporedba je bitan element pri analiziranju konstrukcije pa je shodno tome važno uočiti ključne razlike u geometriji cestovnog bicikla u odnosu na ostale vrste bicikala. Ugrubo, bicikle možemo podijeliti u nekoliko skupina:

1. Gradski bicikli
2. Brdski bicikli (MTB bike)
3. Cestovni bicikli
4. Električni bicikli

Svaka od navedenih skupina ima nekoliko različitih varijanti i podvrsta od čega će biti, naravno, analizirana geometrija cestovnog bicikla. Upoznavajući svijet biciklizma postaje vrlo brzo jasno da je cestovni biciklizam poveći svijet za sebe pa se tako cestovni bicikli mogu na neki način podijeliti u osam skupina što je i prikazano slikom (3.1.):

1. Endurance
2. Performance
3. Aero
4. Touring
5. Gravel
6. Cyclocross
7. Time trial
8. Triathlon

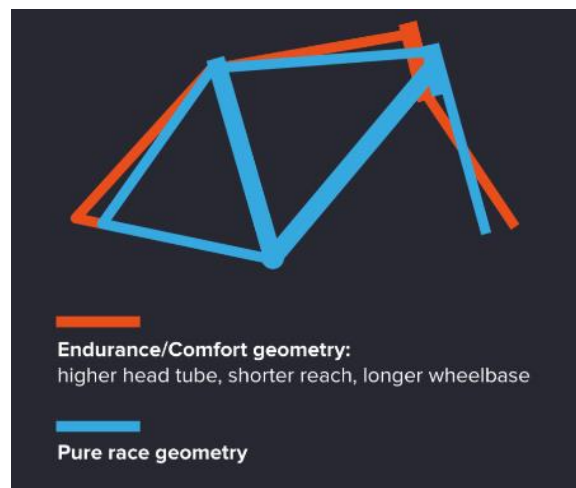


*Slika 3.1. Vrste cestovnih bicikala [1]*

Očigledna je razlika u geometriji svakog od prikazanih tipova cestovnih bicikala no nije problematično uvidjeti te istaknuti sličnosti. Cilj svakog cestovnog bicikla jest postizanje veće brzine nego u drugim vrstama bicikala, a jedan od najboljih načina za to jest smanjivanje aerodinamičkog otpora zraka. Promatrajući aerodinamiku vožnje koja se testira u zračnom tunelu simulirajući uvjete prave vožnje, može se zaključiti kako sam biciklist stvara nemjerljivo veći otpor zraka nego što ga stvara bicikl. Na prvi pogled vabi pomisao kako je najutjecajniji faktor koji onemogućuje brže kretanje na biciklu izvan moći konstruktora.

Međutim, srećom, to je samo djelomično točno. Geometrija okvira bicikla uvelike utječe na položaj biciklista tijekom vožnje te ukoliko je gornji dio tijela pognut prema naprijed, aerodinamički otpor postaje manji, a brzina raste. Moglo bi se reći da se geometrijom bicikla diktira položaj biciklista. Univerzalna karakteristika tipična za geometriju okvira cestovnih

bicikala jest sjedalo koje je postavljeno iznad ravnine volana kako bi se tijelo moglo nagnuti naprijed. Volan je relativno nisko postavljen te je veoma uzak u usporedbi sa ostalim biciklima. Kotači i gume su uski kao i prednja vilica te cijeli okvir. Općenito postoji težnja ka što užem okviru, ali zato, bočno gledano, dubljem profilu, kako okvira tako i kotača. Navedena geometrija je karakteristična za okvire napravljene od karbonskih vlakana jer su takvi bicikli aerodinamičniji i manje mase. Zadnje navedena karakteristika spada u razlike među vrstama cestovnih bicikala koja diferencira sporije od bržih bicikala te također skuplje od jeftinijih. Prije određivanja ulaznih podataka za proračun hidrauličke disk kočnice bit će pobliže razmotrena geometrija „aero“ cestovnog bicikla na kojeg će se odnositi parametri te usporedba sa „endurance“ geometrijom što prikazuje slika (3.2.).



*Slika 3.2. Razlika u geometriji „endurance“ i „racing (aero)“ vrste bicikala [2]*

Na njoj je prikazana razlika u geometriji okvira dvaju vrsta cestovnih bicikala. Plavom bojom označen okvir pripada „aero“ geometriji dok crvena boja predstavlja „endurance“ geometriju. Osnovna razlika je su međuosovinskom razmaku koji je ponešto kraći kod „aero“ bicikala te prednjoj vilici koja je postavljena više okomito na podlogu. Gornja cijev je položena u odnosu na „endurance“ geometriju što spušta volan bliže kotaču, podiže sjedalo i omogućava „aero“ položaj. Slika (3.3.) prikazuje „aero“ geometriju. Iako takva geometrija bicikla omogućava postizanje većih brzina, ona je manje udobna zbog agresivne pozicije u koju stavlja biciklista. Kao suprotnost tome stoji „endurance“ geometrija gdje sama riječ označava izdržljivost odnosno namjenu za duže vožnje, ali zato manje brzine.

Međutim, ukoliko se žele konstruirati sigurne i snažne kočnice, bolje je razmišljati na način da su u mogućnosti izdržati kočenje pri velikim brzinama i ekstremnim uvjetima pa je za to pogodnija „aero“ geometrija.



*Slika 3.3. Bianchi Oltre comp s trkaćom geometrijom [3]*

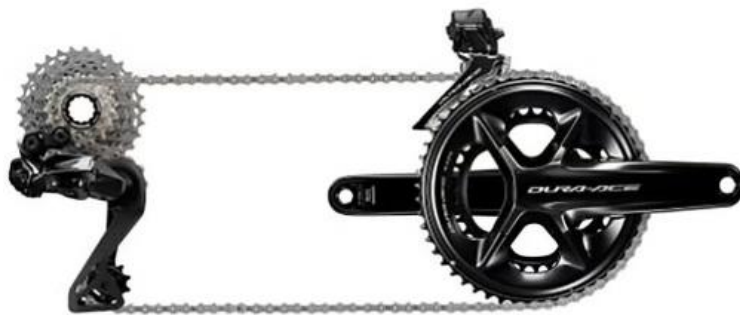
### **3.2. Pogonske karakteristike cestovnog bicikla**

Promatrajući daljnje faktore koji utječu na brzinu koju bicikl postiže, osim geometrije okvira, veliki utjecaj ima i pogon bicikla. Pod pogon spadaju svi dijelovi koji prenose snagu nogu od pedala do kotača i tako pokreću bicikl. Iako naizgled svaki bicikl ima isti pogon odnosno isti princip pogona, zapravo se uvelike razlikuju. Vrlo je čest slučaj da se bicikli razlikuju u nijansama i malim neuočljivim promjenama, pogotovo kada su u pitanju različite marke i modeli cestovnih bicikala. Upravo ti detalji igraju veliku ulogu u kvaliteti bicikla jer zamjetno mijenjaju pogonske karakteristike. Kako bismo mogli adekvatno razlučiti i analizirati koje su pogonske karakteristike relevantne za proračun kočnica cestovnog bicikla trkaće geometrije, valja spomenuti od kojih se dijelova sastoji pogon.

Redom, sama pedala predstavlja početak prijenosa snage koju biciklist pritišće nogom i povezana je preko utora sa plastičnom izbočinom na biciklističkim tenisicama što omogućava fiksni položaj stopala u odnosu na pedal. Na taj način su smanjeni gubici snage jer noga ne



može skliznuti sa pedale te je moguće i povlačiti pedalu u uzlaznoj putanji što kod običnih pedala nije moguće. Nadalje slijedi poluga pedale koja je povezana na osovinu koja prolazi kroz okvir bicikla te ima ključnu ulogu u kvaliteti i stanju pogona. Na tu osovinu unutar koje se nalazi ležaj su montirana i dva lančanika različite veličine koja čine prednju kazetu na koju se namotava lanac. Lanac je zatim povezan sa stražnjim lančanicima različite veličine koji čine stražnju kazetu koja je montirana na osovinu stražnjeg kotača unutar koje se nalazi kuglični ležaj i na taj način se snaga prenosi na kotač. Pored prednje i stražnje kazete se nalaze mjenjači brzina koji mehaničkim ili elektronskim putem ostvaruju kontrolirane pomake u lijevo i desno čime pomiču lanac sa jednog lančanika na drugi što rezultira drugačijim prijenosnim omjerom odnosno prilagodbu na nagib ceste. Opisani sustav je prikazan slikom (3.4.) u nastavku, dok su slikom (3.5.) prikazani lančanici:



*Slika 3.4. Pogonski sustav cestovnog bicikla [4]*



*Slika 3.5. Lančanici stražnje kazete [5]*

Stražnja kazeta se vrlo često sastoji od zasebnih lančanika koji se umeću na osovinu poput prstenova kao što se vidi na slici 3.5. radi velikog trošenja manjih lančanika zbog velikih sila

koje djeluju na njih jer manji lančanik podrazumijeva veći stupanj prijenosa, a samim time i veću brzinu kretanja.

Jedno od posljednjih razmatranja pogonskih karakteristika jest kvaliteta dijelova i prijenosni omjeri jer sukladno kvaliteti pogona mora biti i prilagođena kvaliteta kočnica. Svaki trkaći cestovni bicikl ima poredane stražnje lančanike tako da postoji veća razlika u promjeru lančanika pri manjim stupnjevima prijenosa nego pri većim. To je prikazano slikom (3.6.):



*Slika 3.6. Prikaz stražnje kazete odozgo [6]*

Razlog tomu je povećano ubrzanje bicikla. Pri pokretanju, bicikl ima tendenciju brže ubrzavati ukoliko lančanici omogućavaju nagliji pad lanca prema manjim promjerima lančanika, a potom tek pri većim brzinama lančanici većih stupnjeva prijenosa omogućavaju postepenije reguliranje prijenosnog omjera. Matematički gledano, ukoliko spojimo vrhove svakog lančanika te kroz te točke povučemo liniju, ta linija bi nalikovala grafu eksponencijalne funkcije, a ne pravcu što nalaže da se prijenosni omjeri ne mijenjaju linearno. To nije slučaj kod svih vrsta bicikala nego većinom kod brzih cestovnih. Uz takvu konstrukciju vrlo često ide ruku pod ruku pogon 2 puta 11 što znači da se prednja kazeta sastoji od dva lančanika od kojih manji najčešće ima 34 do 36 zuba, a veći 50 do 52 zuba, a stražnju kazetu tvori 11 lančanika u međusobno prethodno opisanom odnosu.

Finalne finese koje razlučuju elitne bicikle od prosječnih su razlike u kvaliteti dijelova, kako pogonskih tako i općenito, što ovisi o proizvođaču iako u pravilu većina njih koristi prethodno

naveden pogonski sistem. Među cestovnim biciklima postoji mnoštvo proizvođača dijelova od kojih valja izdvojiti Shimano kao jedan od dominantnijih. Njihove verzije pogona su dostigle gotovo vrhunsku učinkovitost kao i njihove kočnice. Pa se tako u svijetu biciklizma ponajviše ističu Shimano Ultegra grupa mijenjača i kočnica kao ponajbolja te još naprednija grupa imena Dura-ace. Imajući na umu geometriju i pogonske karakteristike i time shodnu namjenu te uvjete vožnje cestovnog bicikla, postaje znatno lakše i egzaktnije određivanje ulaznih parametara pri ekstremnim uvjetima za konstruiranje hidrauličkih disk kočnica.

### 3.3. Montažni konstrukcijski dijelovi

U konstrukciju cestovnog bicikla spadaju i dijelovi temeljem kojih se omogućuje posljednji korak procesa konstruiranja, a to je montaža, te konstrukcijski elementi moraju imati zadovoljen redosljed montiranja. U nastavku će stoga biti opisana prednja glavčina, dva široko korištena načina montiranja diska te njihovi dijelovi i dvije vrste osovina kotača.

Ovaj slučaj obuhvaća montažu disk rotora na glavčinu koja se nalazi na osovini kotača te čini centralnu jedinicu čitavog kotača. Radi bolje vizualizacije napisanih riječi slikom (4.21.) u nastavku je prikazana prednja glavčina od proizvođača SRAM:



*Slika 3.7. Glavčina prednjeg kotača [7]*

Unutar glavčina se nalaze kuglični ležajevi koji omogućuju slobodnu rotaciju kotača unatrag neovisno o pogonu bicikla te prijenos snage prema naprijed gdje kotač rotira zajedno s pogonom. Također je važno napomenuti kako cestovni bicikl, kao i ostale vrste, ima više od nekoliko vrsta ležajeva. Osim ovoga, postoje ležajevi mjenjača, ležajevi okvira, pedala i mnogih drugih dijelova. Jedna od glavnih karakteristika ležaja glavčine je velika tolerancija na radijalne i aksijalne sile. Radijalne sile su sasvim normalna pojava s obzirom da se one javljaju kao posljedica funkcije ležaja odnosno težine bicikla u ovom slučaju, dok karakteristična izvedba omogućava i otpornost na aksijalne sile koje se javljaju uslijed skretanja u zavojima ili bilo kakvim bočnim udarima ili opterećenjima. Aksijalne sile se javljaju u oba smjera tako da ležaj mora biti shodno tome konstruiran. Promatrajući slike glavčina, istaknute plohe s rupicama raspoređenima po obodu služe za montiranje i napinjanje žbica koje povezuju glavčinu i felgu kotača. One su sve postavljene u radijalnom smjeru te su opterećene isključivo aksijalno kako ne bi došlo do loma uslijed njihovog savijanja.

Po pitanju montiranja diska, najvažniji dio se odnosi na mjesto gdje se šest vijaka priteže za glavčinu. Takav dio glavčine je identičan kako na prednjem tako i na stražnjem kotaču. No to nije univerzalan način montaže već njemu parira drugi način montaže pod nazivom centralno zaključavanje. Ono podrazumijeva modifikaciju prihvata na glavčini i unutarnjeg dijela diska. Može se reći kako je riječ o totalno drugačijem načinu montaže koji je u podjednakoj mjeri zastupljen kao i montaža pomoću šest vijaka što je slučaj kod 3D generiranog modela. Sljedeća slika (4.23.) prikazuje primjer diska čija montaža koristi šest vijaka i primjer diska sa sistemom centralnog zaključavanja.



*Slika 3.8. Razlika montaže pomoću šest vijaka i centralnog zaključavanja [8]*

Pošto niti jedan način montaže ne dominira nad drugim, može se zaključiti da su prednosti i mane oba sistema montaže podjednake težine te ovise o individualnim potrebama i željama. Montaža pomoću standardnih šest vijaka osigurava čvrstu prisnost, zahvalno održavanje te korištenje standardnih alata dok ima potencijalnih problema oko oštećenja navoja i paralelnosti s kotačem. Nasuprot tomu stoji centralno zaključavanje koje osigurava iznimnu geometrijsku točnost i smanjeno trošenje površina prilikom montaže i demontaže, ali zato rezultira malo većom masom i potrebnim posebnim alatom za postavljanje i skidanje. Moglo bi se reći kako sistem montaže pomoću vijaka ima veću kompatibilnost s raznim glavčinama pa je tako presudio u izradi 3D modela.

Neosporiva je činjenica da hidraulički disk kočioni sustav utječe na gotovo sve dijelove bicikla koji moraju biti međusobno adekvatni i prilagođeni vrsti kočnica pogotovo kada je riječ o dijelovima blizu same kočnice. Iz tog razloga je mrvicu bolje rješenje koristiti „thru-axle“ umjesto „quick-release“ osovine. „Thru-axle“ je prolazna osovina koja se umeće kroz glavčinu te centrira i učvršćuje kotač za prednju vilicu. Pri samom kraju ima navoj koji se priteže za unutarnji navoj na drugoj strani vilice nakon što prođe glavčinu i tako osigurava geometrijsku točnost kotača u odnosu na cijeli bicikl. Postoji nekoliko standardnih dimenzija od kojih valja istaknuti one prikazane sljedećom slikom (4.24.). Ukupna duljina je 120 mm, duljina navoja 15 mm, a promjer je 12 mm.



*Slika 3.9. Prolazna osovina prednjeg kotača [9]*

S druge strane, „quick-release“ osovina je znatno tanja te se nakon provlačenja kroz glavčinu osigurava plastičnim čepom koji se navije na navoj osovine, s tim da se s obje strane glavčine umeće mekana konična opruga. Osovina s jedne strane ima ručicu čijim se zatvaranjem ostvaruje aksijalna sila, a time i prisnost glavčine i prednje vilice. Zbog svojeg manjeg promjera, takva osovina je nešto pogodnija za bicikle s obručnim kočnicama jer prilikom

kočenja pakne jednoliko pritišću felgu s obje strane te sve sile koje se javljaju prilikom pravocrtnog kočenja bi trebale biti simetrične što znači da kotač ne bi trebao biti opterećen bočno.

Međutim, disk kočnica već samim smještajem na jednu stranu kotača postavlja asimetričnu prirodu odnosa elemenata. Stoga kada je riječ o izdržavanju naglog kočenja, cijeli kotač osjeti notu bočnih sila i asimetričnog opterećenja. Iz tog razloga je povoljnija osovina većeg promjera jer osigurava bolju stabilnost i otpornost kotača na asimetričnu narav sila. Tu je „thru-axle“ pronašla svoju prednost nad standardnim „quick-release“ sistemom.

Mogućnost kombinacije oba sistema montaže se omogućuje adapterom koji je predviđen za prihvat diska pomoću šest vijaka, a on se montira centralnim zaključavanjem na glavčinu kotača te se potom montira disk.

## 4. KONSTRUKCIJA PREDNJE HIDRAULIČKE DISK KOČNICE

### 4.1. Disk prednje kočnice

#### Uvod

Temeljem uvodnih, do sada objašnjenih, razmatranja moguće je odrediti mjerodavne parametre za uvodni proračun koji je neophodan za konstrukciju kočnica. On podrazumijeva izračun fizikalnih veličina gibanja i djelujućih sila na disk na osnovu kojih je moguće provesti numeričku simulaciju nosivosti diska čija će svrha i princip biti opisani u poglavlju (4.1.7.) i (4.1.8.). Također, nakon izvršene analize postojećih diskova prema [3] članku o utjecaju materijala i dizajna diska na učinkovitost u kombinaciji sa vlastitom analizom uvodnih parametara, pokazala se mogućnost i potreba za izradom optimalnog dizajna diska u programu Autodesk Inventor koji će poslužiti kao model u daljnjim proračunima i opisu dijelova sustava.

#### 4.1.1. Proračun sila koje djeluju na disk

Jedan od najvažnijih aspekata pri konstruiranju jest proračun određenih dijelova. Iako je možda samo po sebi logično što on predstavlja, bolje razumijevanje sadržaja se stvara ponavljajući osnove struke pa tako proračun služi kao matematički dokaz određenih pretpostavki, koraka koje prolazimo tokom konstruiranja. Pošto je suludo napamet procjenjivati dimenzije, materijal te oblik dijelova za koje znamo da su izloženi velikim opterećenjima ili ekstremnim uvjetima, uvodimo proračune kojima, na osnovu procijenjenih ulaznih podataka određujemo njihove karakteristike i dimenzije kako bi konstrukcija sigurno i dugotrajno funkcionirala. Jedini ispravan način provedbe proračuna jest vizualizacija ekstremnih uvjeta rada te shodno dimenzioniranje dijelova jer ako je određeni element dimenzioniran da izdrži ekstremne uvjete, tada će sigurno izdržati i normalne uvjete rada.

Iz tog razloga kod vožnje bicikla uzimamo u obzir kretanje po nizbrdici gdje cestovni bicikli postižu i brzine do 70 km/h. Svaki gibajući objekt tada posjeduje određenu količinu kinetičke energije gibanja za čiji iznos je osim brzine odgovorna i masa. Ukupna masa u ovom slučaju predstavlja zbroj mase bicikla i biciklista te za potrebe proračuna iznosi 120 kilograma s tim da je najveća dopuštena masa biciklista 110 kilograma. Pri normalnim uvjetima na cesti, koji

podrazumijevaju suhu cestu te temperaturu okoline od 20°C, koeficijent trenja između guma i asfalta iznosi oko 0,75.

Iz navedenih podataka moguće je izračunati graničnu silu kočenja prema izrazu (4.1.) uzevši vrijednost ubrzanja sile teže  $9,81 \frac{m}{s^2}$ :

$$F_k = m_{uk} \cdot g \cdot \mu \quad (4.1.)$$

$$F_k = 120 \cdot 9,81 \cdot 0,75$$

$$F_k = 809,33 \text{ N}$$

Gdje je:

$F_k$  sila kočenja [N],

$m_{uk}$  ukupna masa [kg],

$g$  ubrzanje sile teže [ $\frac{m}{s^2}$ ],

$\mu$  faktor trenja.

Izračunata sila kočenja predstavlja maksimalnu vrijednost prilikom koje između tarne plohe diska i kočionih pakni i dalje vlada dinamička sila trenja što znači da se kotač kotrlja po podlozi. Daljnje povećanje sile kočenja bi dovelo do potpunog zaustavljanja rotacije diska, a samim time i kotača te bi između tarne plohe diska i kočionih pakni zavladao statička sila trenja što bi rezultiralo klizanjem kotača po podlozi. U tom slučaju bi se trenje kotrljanja između kotača i podloge zamijenilo trenjem klizanja koje je znatno veće. Takva pojava bi bila popraćena mnogim neželjenim efektima kao što je zanošenje stražnjeg dijela bicikla i gubitak kontrole nad volanom što tada postaje nesigurno i opasno kočenje. Proračun se vrši za najbrže moguće sigurno kočenje te se iz tog razloga za daljnje računanje sila kočenja zaokružuje na 808 N kako bi se osiguralo kotrljanje kotača po podlozi.

Iz ukupne mase i brzine kretanja se može izračunati kinetička energija gibanja koristeći sljedeću jednadžbu (4.2.) s tim da brzinu uvrštavamo u metrima po sekundi:



$$E_k = \frac{m_{uk} \cdot v^2}{2} \quad (4.2.)$$

$$E_k = \frac{120 \cdot 19^2}{2}$$

$$E_k = 19,86 \text{ kJ}$$

Gdje je:

$E_k$  kinetička energija [J],

$v$  brzina gibanja bicikla [ $\frac{m}{s}$ ].

Procijenjeno vrijeme od trenutka kočenja do potpunog zaustavljanja bicikla pri maksimalnom kočenju iznosi 5 sekundi. Znajući to i brzinu kretanja možemo izračunati deceleraciju odnosno brzinu usporavanja bicikla. Konačna brzina iznosi  $0 \frac{m}{s}$  jer se bicikl potpuno zaustavi pa je promjena brzine jednaka početnoj. Prikazana jednadžba (4.3.) izračunava deceleraciju:

$$a = \frac{v_1 - v_2}{t_{uk}} \quad (4.3.)$$

$$a = \frac{19 - 0}{5}$$

$$a = 3,8 \frac{m}{s^2}$$

Gdje je:

$a$  deceleracija [ $\frac{m}{s^2}$ ],

$v_1$  početna brzina [ $\frac{m}{s}$ ],

$v_2$  konačna brzina [ $\frac{m}{s}$ ],

$t_{uk}$  ukupno vrijeme [s].

Iz maksimalne kinetičke energije i vremena zaustavljanja je moguće izračunati snagu kočenja koristeći navedenu jednadžbu (4.4.):

$$P_k = \frac{E_k}{t_{uk}} \quad (4.4.)$$

$$P_k = \frac{19.855}{5}$$

$$P_k = 3,97 \text{ kW}$$

Gdje je:

$P_k$  snaga kočenja [W].

Neizostavni dio proračuna uvodnih podataka jest tlak koji stvara maksimalna sila kočenja i moment kočenja koji djeluje na disk. Za tlak je potrebno poznavati površinu kočionih pakni koja na cestovnim biciklima iznosi  $600 \text{ mm}^2$ . Površina jedne kočione pakne je  $300 \text{ mm}^2$ , ali se za izračun tlaka uzimaju obje jednadžbom (4.5.):

$$P_d = \frac{F_k}{A_p} \quad (4.5.)$$

$$P_d = \frac{808}{600 \cdot 10^{-3}}$$

$$P_d = 1,35 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$P_d$  djelujući površinski tlak na disk [Pa],

$A_p$  površina kočionih pakni [ $\text{mm}^2$ ].

Moment kočenja izračunavamo preko dvije osnovne dimenzije diska, a to su vanjski promjer i unutarnji promjer tarne plohe koje standardno iznose 160 i 130 milimetara. Iz navedenih

veličina se izračuna srednji polumjer jednađbom (4.6.) kojim se podijeli granična sila kočenja kako bi se dobio moment kočenja (4.7.) dok jednađbe (4.8.) i (4.9.) izračunavaju polumjere:

$$r_v = \frac{d_v}{2} \quad (4.8.)$$

$$r_v = \frac{160}{2}$$

$$r_v = 80 \text{ mm}$$

$$r_u = \frac{d_u}{2} \quad (4.9.)$$

$$r_u = \frac{130}{2}$$

$$r_u = 65 \text{ mm}$$

$$r_{sr} = \frac{r_v + r_u}{2} \quad (4.6.)$$

$$r_{sr} = \frac{80 + 65}{2}$$

$$r_{sr} = 72,5 \text{ mm}$$

$$T = \frac{F_k}{r_{sr}} \quad (4.7.)$$

$$T = \frac{808}{72,5 \cdot 10^{-3}}$$

$$T = 58,58 \text{ Nm}$$

Gdje je:

$r_v$  vanjski polumjer diska [mm],

$d_v$  vanjski promjer diska [mm],

$r_u$  unutarnji polumjer diska [mm],

$d_u$  unutarnji promjer diska [mm],

$r_{sr}$  srednji polumjer diska [mm],

$T$  moment kočenja [Nm].

#### 4.1.2. Geometrija i dizajn diska

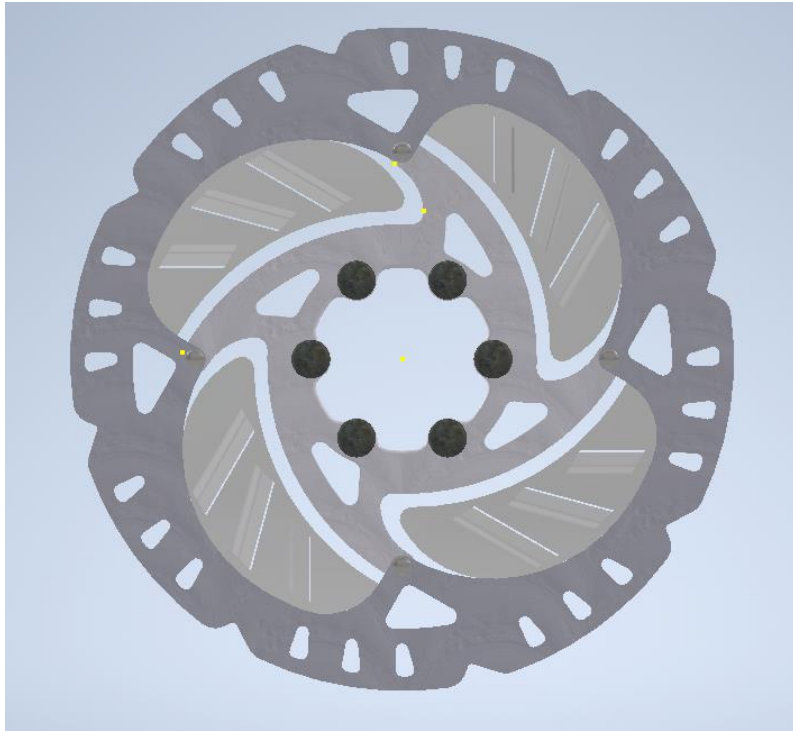
Nabrojani uvjeti koje mora ispuniti geometrija okvira kao što je aerodinamičnost ne mogu se mjeriti s važnošću geometrije samoga diska gledano kroz prizmu konstruiranja kočnica. Kako disk izgleda, način na koji je osmišljen tok njegovih linija i površina definira njegovu geometriju. Ona mora biti takva da unutar materijala od kojeg je izrađen disk prouzroči minimalna moguća naprezanja. Neminovno je da će ih biti, ali geometrijskim karakteristikama se može utjecati na njihovo smanjenje ili povećanje. Promatrajući bilo koji dizajn diska moguće je zamijetiti izostanak oštih linija i rubova, naglih prijelaza linija iz jednog smjera u drugi zbog toga što oni djeluju kao koncentratori naprezanja. To je znatno povećanje naprezanja na mjestu nagle promjene u geometriji što također podrazumijeva naglo suženje poprečnog presjeka kao i prethodno spomenute oblike te se zato svi rubovi nastoje zaobliti te svim promjenama u geometriji omogućiti polaganiji prijelaz. Drugi razlog zbog kojeg određena zaobljenja postoje se tiče tehnologija izrade elemenata što znači da npr. glodalicom nije moguće postići unutarnji pravi kut.

Druga važna geometrijska karakteristika jest osigurati dovoljno velike dimenzije pojedinih poprečnih presjeka na disku kako bi bio u stanju izdržati moment kočenja i ostala popratna opterećenja od čega je među važnijima toplinsko opterećenje odnosno naprezanje koje ono izaziva. U toj fazi konstruiranja postaju presudni proračuni. Jedino ispravnim proračunom

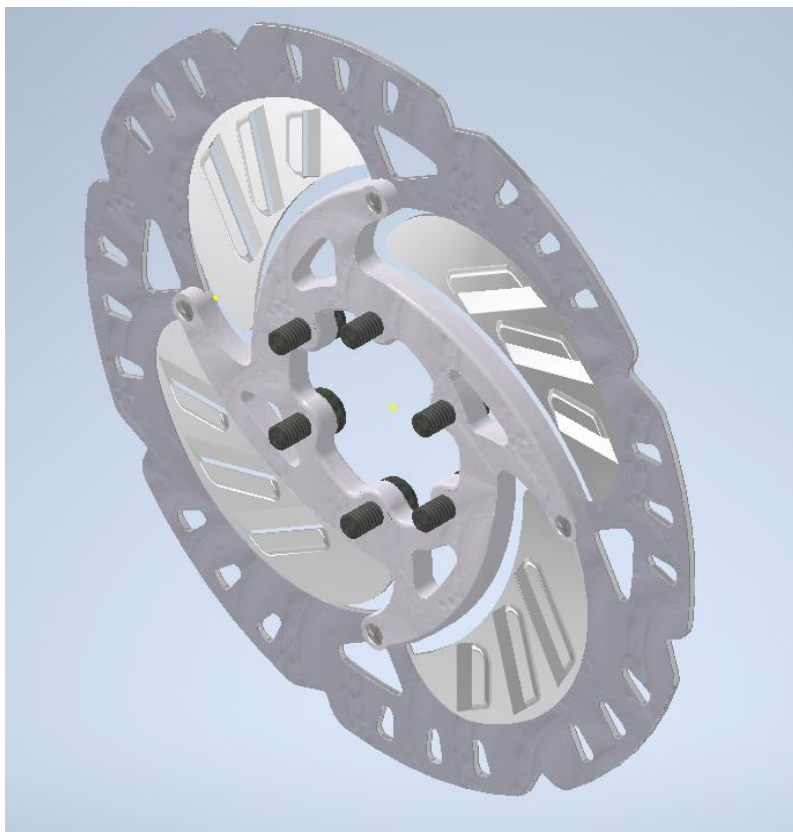
saznajemo koliki pojedini presjeci moraju iznositi kako ne bi došlo do mehaničkog ili termičkog loma najslabijeg presjeka. Akonto rečenog može se ustanoviti kako postoje određena univerzalna pravila kod osmišljavanja geometrije koja mora poštovati svaki disk, međutim, nije svaki disk identičnog dizajna. To nam govori da postoji više od jednog konstrukcijskog rješenja za navedeni problem. Razni dizajni diska zadovoljavaju uvjete čvrstoće te postoji tendencija ka invenciji što više različitih dizajna diska jer se time, gledano s tehničke strane, obogaćuje znanje o konstruiranju, a gledano s marketinške strane, povećava obim proizvodnje te svaki proizvođač ima više mogućnosti za razviti svoj vlastiti proizvod bez poklapanja s konkurencijom.

Geometrija i dizajn diska sežu puno dalje od samog zadovoljavanja uvjeta čvrstoće. Spomenuto termičko naprezanje se javlja uslijed temperaturne dilatacije što uzrokuje sila trenja te je uloga dizajna diska smanjiti tu silu kako bi termičko naprezanje bilo unutar dopuštenih granica pritom zadržavajući dovoljnu kontaktnu površinu kako bi sigurno kočenje bilo osigurano. Sljedeći zanimljiv aspekt geometrije jest da ona diktira količinu materijala utrošenog na izradu, a potom i masu diska. Slučajevi gdje se masa stavlja u drugi plan se mogu nabrojati na prste jedne ruke jer ona povećava ukupnu masu bicikla što negativno utječe na performanse.

Ostale geometrijske karakteristike diska kao i već objašnjene će biti analizirane na konkretnom disku. Model, napravljen u programu Autodesk Inventor Professional poslužit će kao primjer dizajna za koji će biti izvršen proračun osnovnih elemenata. Inventor je software koji omogućava parametarsko 3D modeliranje te je pogodan za širu publiku iz razloga što ne iziskuje stručnost i znanje iz programiranja, intuitivan je i kompatibilan sa Autocadom što znači da se 2D skica iz njega može prebaciti u Inventor gdje se može izraditi 3D model na kojemu je moguće vršiti razne simulacije te izraditi potrebnu dokumentaciju. Općenito govoreći, praktičan je, i za potrebe 3D modeliranja diska biciklističkih hidrauličkih kočnica odrađuje svoju ulogu savršeno. Izrađeni model je prikazan slikom ispod (4.1.), kao i slikom (4.2.):

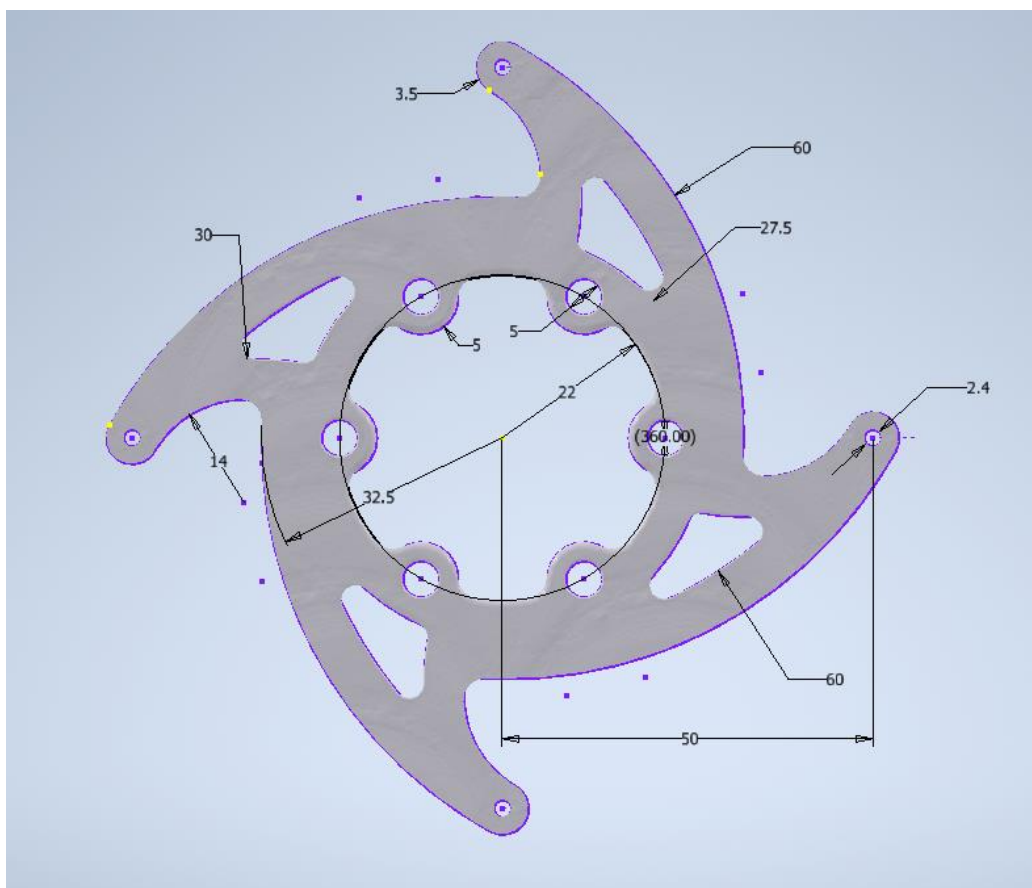


*Slika 4.1. 3D model diska hidrauličke kočnice na cestovnom biciklu*

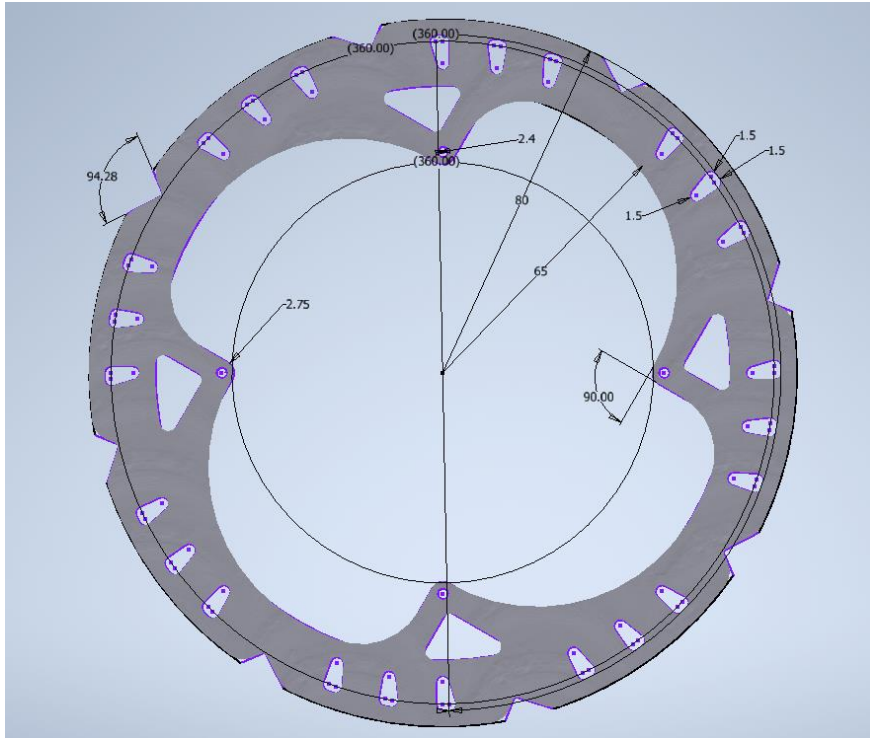


*Slika 4.2. Izometrijski prikaz diska*

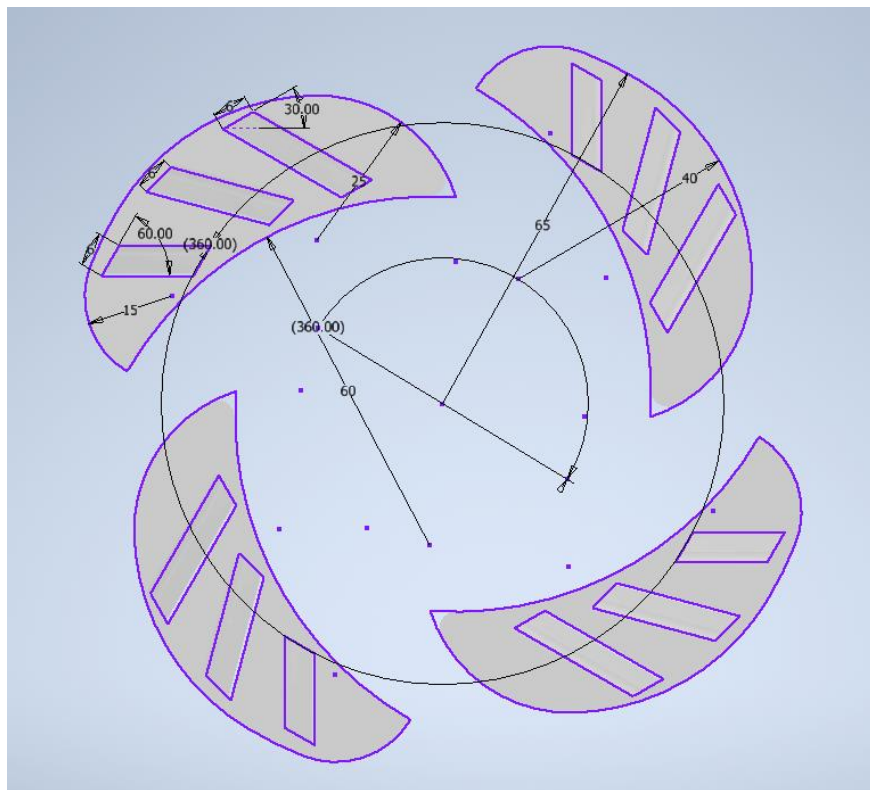
Svaki disk se sastoji od nekoliko vrsta dijelova, konkretni model ih ima pet od čega su glavni tarra ploha od aluminija s plošnim elementima koji poboljšavaju aerodinamiku i omogućuju hlađenje, obostrani sloj tarne plohe od nehrđajućeg čelika te aluminijski dio kojim se disk montira za glavčinu na kotaču. Elementi koji omogućuju montažu su zakovice i vijci. Zakovicama je povezana tarra ploha s unutarnjim dijelom diska, a vijcima je cijeli sklop montiran na glavčinu kotača. Svaki dio u dizajnu diska nije estetske naravi, već tehničke. Shodno tome, rupe na tarroj plohi smanjuju masu diska i preveniraju pretjerano zagrijavanje tijekom intenzivnog kočenja što mora biti u savršenoj međusobnoj ravnoteži kako bi se postigao optimum u proizvodnji po pitanju potrošnje materijala, funkcionalnosti i tek na kraju, estetike. Isti slučaj je i s unutarnjim dijelom diska koji je ponešto širi od tarne plohe. Na sljedećim slikama (4.3.), (4.4.) i (4.5.) je prikazana geometrija tri glavna dijela diska uz kotirane dimenzije:



*Slika 4.3. Dimenzije unutarnjeg dijela diska*



*Slika 4.4. Dimenzije tarne površine diska*



*Slika 4.5. Dimenzije ploha za odvođenje topline*



Plošni elementi s unutarnje strane diska su izrađeni od aluminijske zajedno s unutarnjim dijelom tarne plohe koja je trodijelne građe. Oni imaju po tri reza duž plohe koji služe za usisavanje zračnih struja tijekom vožnje koje zatim struje tik uz disk i na taj način bolje hlade tarnu površinu koja vapi za hlađenjem. Dobra aerodinamika diska podrazumijeva strujanje zraka koje je usmjereno kako bi se izbjeglo neželjeno kovitlanje ili odvajanje zračne struje od diska prije vremena.

Kao što je već naglašeno, geometrija diktira mnoge druge aspekte diska, ali zato i ti aspekti dijelom definiraju geometriju. Nije moguće neovisno o uvjetima rada konstruirati disk, već se pravilna konstrukcija odražava naizmjeničnim uzimanjem u obzir željene geometrije s uvjetima koji moraju biti zadovoljeni i na taj način se postiže zlatna sredina.

#### 4.1.3. Materijali izrade diska

Još jedan bitan aspekt tijekom konstruiranja diska jest odrediti materijal od kojeg će biti izrađen. Iako se možda ne doima opsežnim zadatkom, ranije spomenuta višestruka zavisnost svih komponenti znači da i materijal treba biti pažljivo i proaktivno definiran. O njemu ovise mehanička i termička svojstva diska što je direktno povezano s geometrijom. Ukoliko koristimo čvrste i otporne materijale, manji poprečni presjeci će nam biti potrebni za zadovoljavanje uvjeta čvrstoće nego li kod korištenja slabijih materijala. Međutim, koristeći bolje materijale raste i cijena, kako proizvodnje tako i prodaje. To je samo jedan od primjera delikatne ravnoteže koju treba uspostaviti prilikom konstruiranja što je nedvojbeno najteži zadatak prilikom izrade. Pravilan slijed razmišljanja za konstruiranje nalaže definiranje i analizu početnog problema što bi u ovom trenutku bilo razmatranje potrebnih mehaničkih i termičkih svojstava diska. Prvo, čvrstoća mora biti na dorasloj razini jer ona podrazumijeva prenošenje opterećenja bez pojave loma što disk mora zadovoljiti. Krutost je sljedeća. Ona omogućava otpornost na elastične deformacije jer na njih disk mora imati izrazito nisku toleranciju. Jaz između tarne površine diska i utora za disk na kočnici iznosi svega nekoliko desetina milimetra što znači da disk mora imati visoku razinu točnosti rotacije i krutosti kako se ne bi javljalo nepotrebno struganje po paknama tijekom normalne vožnje. U još gorem slučaju, ukoliko dođe do mehaničkog oštećenja diska ili naglog udarnog opterećenja, on se mora ponašati kao krhki materijal što znači da mora doživjeti lom bez značajnih pojava

plastične deformacije. Tome je tako jer deformirani disk nije u mogućnosti rotirati kroz uska kliješta na kočnici pa bi se, teoretski gledano, visokom duktilnošću materijala pojavio problem pri padovima gdje bi se disk potencijalno deformirao i onemogućio rotaciju kotača. Stoga se njeguju svojstva čvrstoće i krutosti, a ne i duktilnosti. Gledano iz kuta vremena, poželjno je da ima što veću otpornost na starenje, što u tehničkom smislu prevodimo kao otpornost na zamor materijala odnosno mikro pukotine, koroziju i površinsko trošenje odnosno tvrdoću. Što je veća otpornost na navedene pojave, logično, to je veća kvaliteta diska. Pored toga materijal mora zadovoljavati uvjet minimalne toplinske dilatacije što znači da mora biti otporan na promjenu temperature, detaljnije rečeno, mehanička svojstva se ne smiju značajnije mijenjati promjenom temperature. Daljnje nizanje potrebnih svojstava materijala bi samo potvrđivalo činjenicu koliko faktora treba uzeti u obzir prilikom izrade naizgled obične kočnice na biciklu. Međutim, sada se postavlja pitanje odabira materijala odnosno koji materijal zadovoljava sve navedene uvjete, sva navedena svojstva. Kao i kod geometrije diska, postoji više od jednog rješenja tog problema te će u nastavku biti analizirane tri dominantne vrste materijala od kojih se izrađuje disk, točnije tarna površina, a to su:

1. Nehrdajući čelik 410
2. Legura Titanija ( Ti-6Al-4V )
3. Karbonska vlakna

Izvedba diska koristeći bilo koji od navedena tri materijala je uspješna zbog toga što niti jedan od navedenih materijala nije elementaran, već je mješavina materijala tvoreći legure i kompozite kojima je moguće modificirati svojstva prema potrebama. Sljedeća slika (4.6.) prikazuje mehanička i termička svojstva navedenih materijala.

Mechanical Properties	Stainless Steel 410	Titanium 6Al-4V (Ti-6Al-4V)	Epoxy/HS Carbon Fibre, UD Prepreg, UD Layup
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	7.65x10 <sup>3</sup>	4.41x10 <sup>3</sup>	1.55x10 <sup>3</sup>
Youngs Modulus (Gpa)	190	110	129
Yield Strength (Mpa)	1000	827	1740
Tensile Strength (Mpa)	1250	896	1740
Shear Modulus (Gpa)	73	43	3.74
Toughness (Kj/M <sup>2</sup> )	10.7	59.7	25.5
Max Service Temperature °C	357	350	140
Min Service Temperature °C	-150	-273	-123
Thermal Conductivity Wm.°C	15.6	7.1	0.75
Specific Heat Capacity J/Kg.°C	481	528	902
Thermal Shock Resistance °C	58.4	763	1501
Thermal Distortion Resistance MW/m	0.933	0.788	0.228

*Slika 4.6. Mehanička i termička svojstva tri promatrana materijala [10]*

Svaki od tri odabrana materijala ima svoje prednosti i mane odnosno neke uvjete zadovoljava bolje, a neke lošije. Konkretno, za izradu 3D modela diska je odabran nehrđajući čelik i aluminij zbog dobre kombinacije svojstava od čega je najvažniji omjer mase i čvrstoće, ali i odvodnje topline. Dakle, tarna ploha je trodijelne građe što omogućava bolje odvođenje topline o čemu će biti riječ u poglavlju (4.1.8.).

#### Nehrđajući čelik 410

Nehrđajući čelik 410 je martenzitni nehrđajući čelik koji ima određeni postotak kroma u sebi kako bi mu se poboljšala svojstva koja pružaju dovoljno veliku otpornost na koroziju tijekom vremena. Inače je čvrst i tvrd materijal koji ima široku primjenu u visoko opterećenim elementima. Ima najveću gustoću od navedenih materijala, a time i najveću masu pa je, gledano iz tog aspekta najmanje prihvatljiv, no ostala važna svojstva ga i dalje drže na životu. Iz toga razloga se pretežito koristi u jeftinijih bicikala ili brdskih bicikala gdje masa nije toliko ključna. Cestovni bicikli preferiraju legure titanija ili karbonska vlakna, a rjeđe nehrđajući čelik.

#### Legura Titanija ( Ti-6Al-4V )

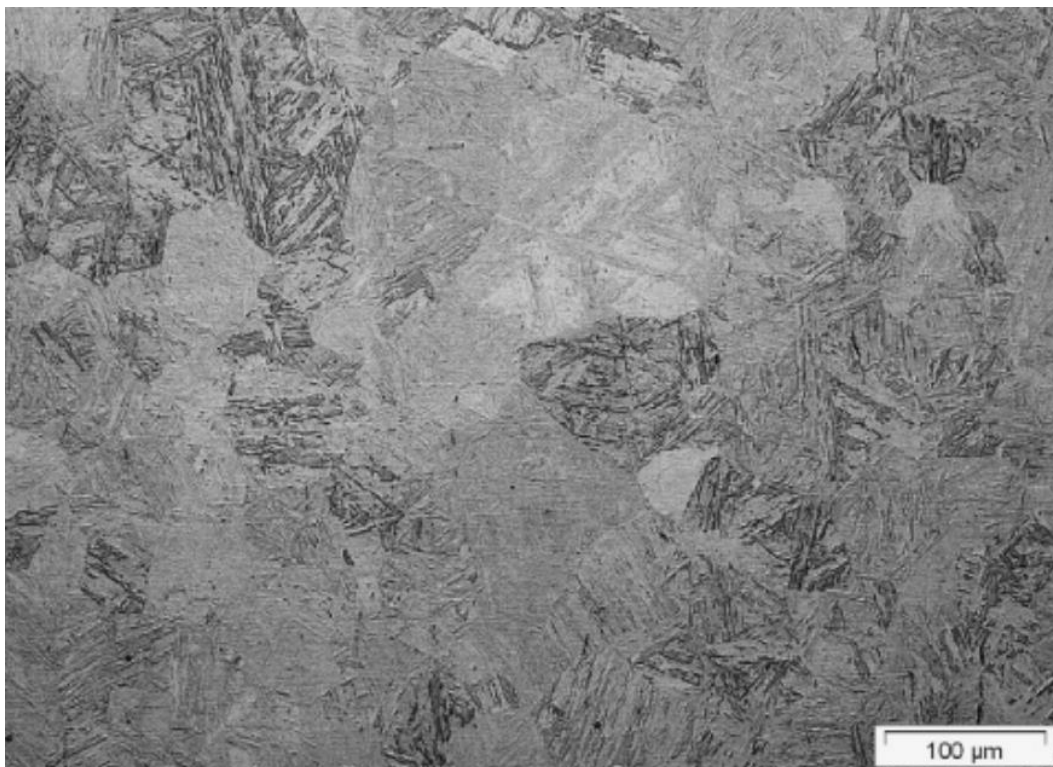
Titanij je sam po sebi veoma zahvalan element. Rijedak je i skup. Konkretna legura je alfa-beta legura koja posjeduje izrazito visoku specifičnu čvrstoću i otpornost na koroziju. Specifična čvrstoća ukazuje na to da je jako čvrst po jedinici volumena što znači da nije potreban veliki volumen odnosno velike dimenzije da bi se postigla željena čvrstoća. Postizanje tako dobrih

svojstva se može zahvaliti mikrostrukтури čije razumijevanje je ključno kod bilo kojeg materijala jer se promjenama mikrostrukture utječe na promjenu svojstva.

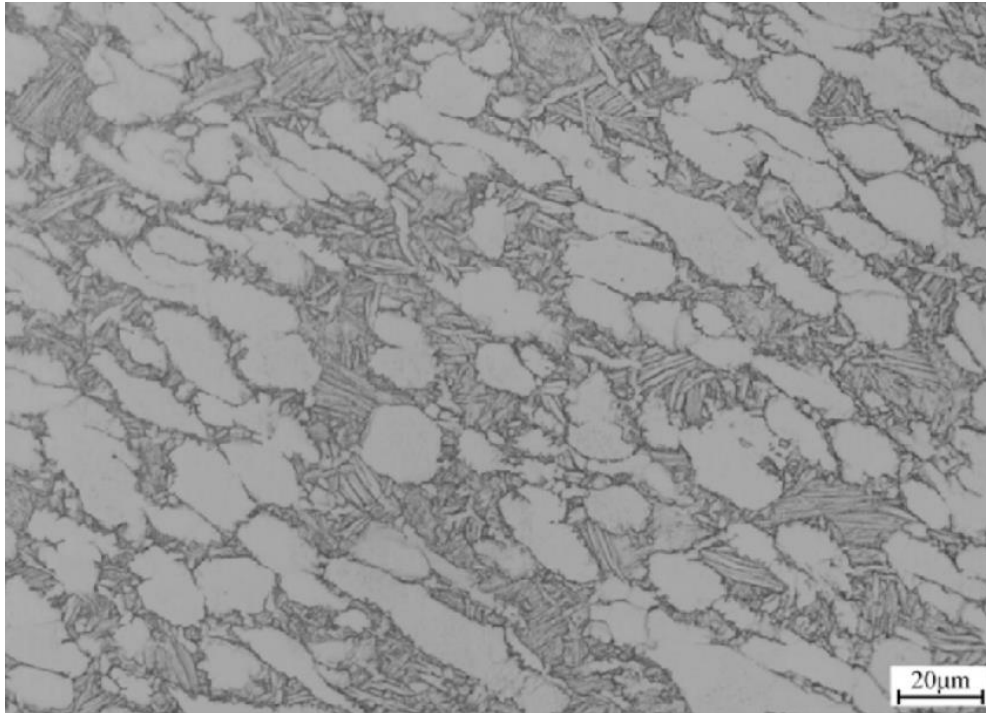
### Karbonska vlakna

U novije vrijeme sve češći materijal izrade pojedinih dijelova auta, formula, pa tako i bicikala su karbonska vlakna. Najvažniji princip na kojemu se temelji njegova čvrstoća jest povećanje broja gradivnih dijelova u određenoj konfiguraciji. Tipičan primjer su ljudski mišići koji se sastoje od snopova i vlakana te što ih je više to je mišić u pravilu jači. Preneseno na karbonska vlakna, što ih je više te što su bolje isprepletene to je veća čvrstoća. Ogromna prednost ovakvog kompozita je strahovito mala masa u odnosu na čvrstoću i krutost što ga također čini prihvatljivom opcijom za izradu diska.

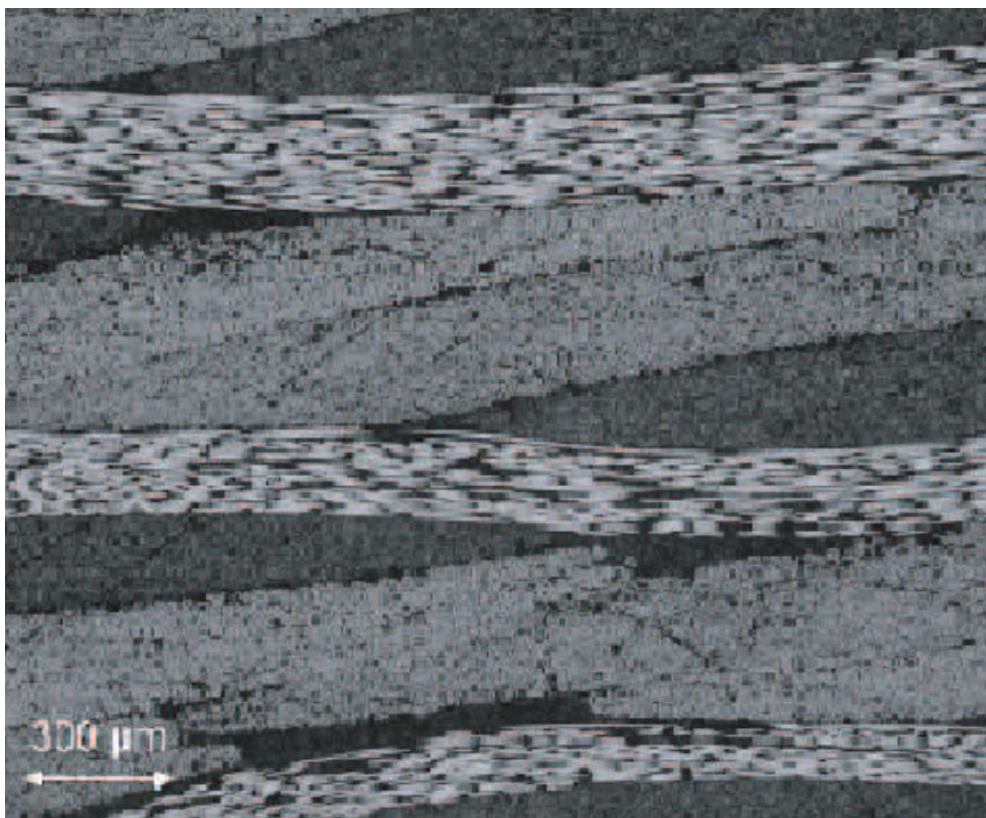
U nastavku je slikama dana usporedba mikrostrukture tih triju vrsta materijala od kojih se izrađuje tarna površina diska.



*Slika 4.7. Mikrostruktura nehrđajućeg čelika [11]*



*Slika 4.8. Mikrostruktura legure titana Ti-6Al-4V [12]*



*Slika 4.9. Mikrostruktura karbonskih vlakana [13]*

Shodno navedenim svojstvima i usporedbama može se zaključiti kako niti jedna vrsta materijala nema apsolutnu dominaciju nad ostalima već odabir materijala ovisi o vrsti bicikla, željenoj kvaliteti, cijeni i naravno uvjetima vožnje. Statistički gledano, elitni cestovni bicikli nastoje gledati kvalitetu povrh cijene.

Unutarnji dio diska kojim se montira na glavčinu je izrađen od aluminijske dok su zakovice i montažni vijci od nehrđajućeg čelika te će za njih u poglavljima 4.1.5 i 4.1.6. biti proveden proračun čvrstoće.

#### 4.1.4. Masa diska

Više puta je već naglašeno koliko je važna masa diska. No nije dovoljno samo koristiti lagane materijale za izradu već je potrebno imati na umu ravnotežu između dizajna i vrste materijala jer oboje utječe na ukupnu masu diska. Jednadžba (4.10.) kojom se računa masa diska proizlazi iz volumena i gustoće materijala te glasi:

$$m_i = V_i \cdot \rho_i \quad (4.10.)$$

Gdje je:

$m_i$  masa pojedinog dijela diska [kg],

$V_i$  volumen pojedinog dijela diska [ $m^3$ ],

$\rho_i$  gustoća pojedinog dijela diska [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

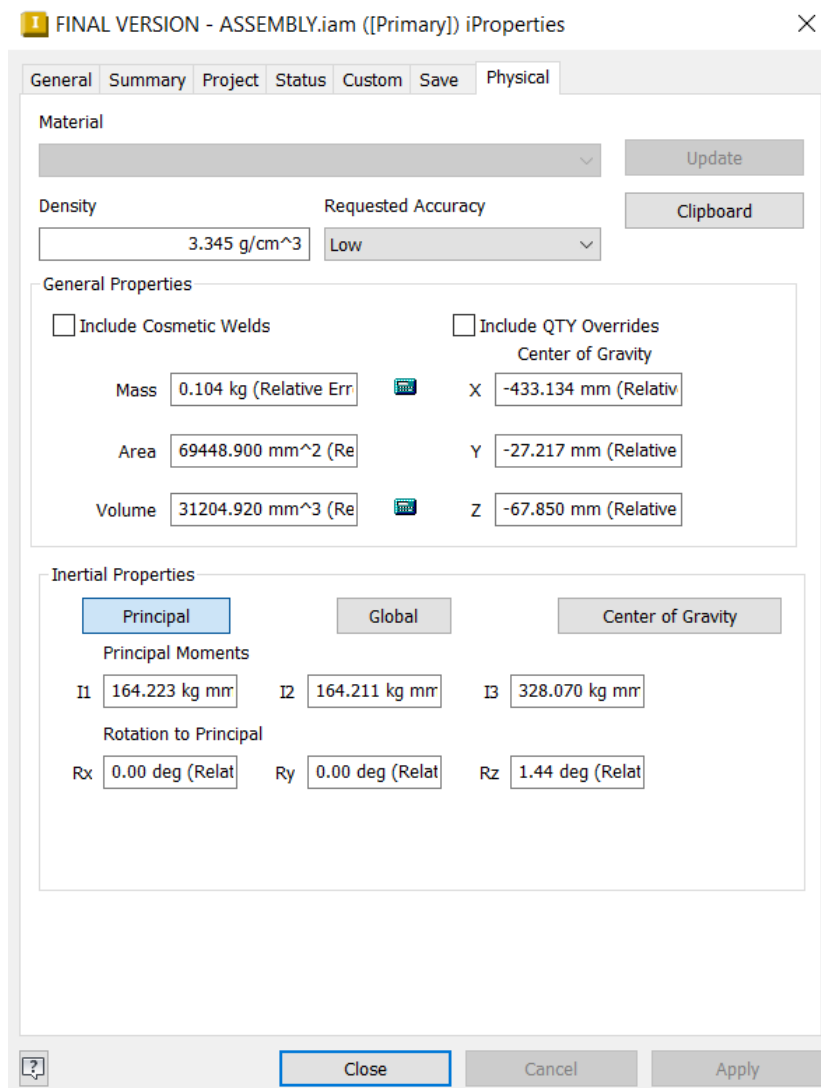
Ukupna masa diska se može dobiti zbrajajući mase pojedinih dijelova diska što je na generiranom modelu masa tarne plohe, zakovica, unutarnjeg dijela diska i aluminijskih ploha za poboljšanje aerodinamike. Montažni vijci nisu uzeti u obzir kod proračuna mase diska. Sljedeća formula (4.11.) se odnosi na ukupnu masu diska:

$$m_{uk} = m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_n \quad (4.11.)$$

Gdje je:

$m_{uk}$  ukupna masa diska [kg].

Zahvaljujući opciji physical properties u programu Inventor, nije potrebno računati masu diska koristeći iznad navedenu formulu jer ta opcija automatski izbacuje vrijednost ne samo mase, već i volumena i mnogih drugih podataka o generiranom modelu. Svrha slike (4.10.) u nastavku je prikazati volumen i masu 3D izrađenog modela diska.



Slika 4.10. Prikaz fizikalnih svojstava diska

Volumen diska iznosi  $31204.920 \text{ mm}^3$  dok masa iznosi  $0.104 \text{ kg}$  što je i više nego zadovoljavajuća vrijednost. Vrijednosti mase mnogih diskova se kreću preko  $100 \text{ g}$ , ako je izrađen u potpunosti od nehrđajućeg čelika koji ima najveću gustoću, ispod  $50 \text{ g}$ , ako je izrađen od karbonskih vlakna što masu od  $0.104 \text{ kg}$  postavlja otprilike oko zlatne sredine. Optimum geometrije i korištenog materijala se očituje masom diska što je u ovom slučaju zadovoljeno.

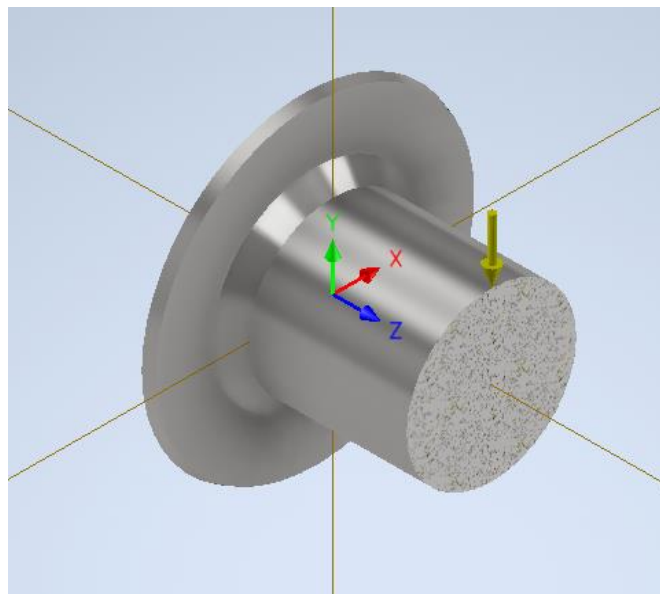
#### 4.1.5. Proračun čvrstoće zakovica

Kao što je u prethodna dva poglavlja ustanovljeno analizom geometrije i materijala diska, svaki dio diska je izložen naprezanju koje ne smije prouzročiti deformaciju niti lom. To se onemogućuje odabirom određenog materijala od nekolicine prikladnih koji su prethodno analizirani, ali i dovoljno velikim dimenzijama elemenata. Temeljem ranijeg opisa 3D modela diska vidljiva je njegova građa koja se sastoji od nekoliko dijelova. Oni moraju biti međusobno povezani kao što se i cijeli disk mora montirati na kotač. U tu svrhu se koriste montažni elementi čiji je proračun neophodan. Zakovice povezuju vanjski i unutarnji dio diska te će njihov proračun biti proveden u nastavku ovog poglavlja. Elementi koji povezuju disk sa glavčinom kotača su kruti vijci čiji će proračun uslijediti u poglavlju (4.1.6.) nakon proračuna zakovica.

Proračun zakovica je vrlo jednostavan te ih se proračunava na smicanje. Napravljeni model ih ima četiri te su izrađene od nehrđajućeg čelika 410. Prije ispisivanja formula valja objasniti kontekst i korake proračuna. Ukoliko se želi proračunati određeni element treba prvo znati od kojeg je materijala napravljen jer materijal diktira čvrstoću. Zatim je potrebno poznavati njegova svojstva te od mnogih izdvojiti dva presudna, a to su duktilnost i krhkost koja anuliraju jedan drugoga. Znajući je li materijal duktilan ili krhak određuje se hoće li za proračun biti relevantna granica tečenja ili vlačna čvrstoća. Pošto je riječ o nehrđajućem čeliku, relevantna je granica tečenja jer se ne smije dopustiti plastično deformiranje zakovica koje nastupa kada je naprezanje prekorači.



Poznavanje vrste opterećenja ukazuje na vrstu i smjer naprezanja koji se javlja u elementu iz čega je moguće odrediti najveću moguću toleranciju elementa za takvu vrstu opterećenja. Zakovice na disk kočnici cestovnog bicikla trpe tangencijalno naprezanje u poprečnom presjeku koje je uzrokovano smicanjem. Ono leži u ravnini diska i silnice su usmjerene tangencijalno na promjer diska orijentirane suprotno od njegovog smjera rotacije jer kočione pakne nastoje zaustaviti disk, dok ga inercija ukupne mase bicikla i biciklista i dalje rotira prema naprijed. Sljedećom slikom (4.11.) je prikazan poprečni presjek zakovice i sila koja izaziva tangencijalno naprezanje u njemu.



*Slika 4.11. Poprečni presjek zakovice*

Jednadžba (4.12.) kojom se računa tangencijalno naprezanje okruglog poprečnog presjeka glasi:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{4F}{d^2 \cdot \pi} \quad (4.12.)$$

Gdje je:

$\tau$  tangencijalno naprezanje [MPa],

$F$  smična sila [N],

$d$  promjer poprečnog presjeka zakovice [mm],

Smična sila iz brojnika prethodno navedene formule proizlazi iz momenta kočenja i udaljenosti zakovica od sredine diska što predstavlja krak. Shodno rečenom jednadžba kojom ju izračunavamo glasi (4.13.):

$$F_s = \frac{T}{r_z} \quad (4.13.)$$

$$F_s = \frac{58.58}{50 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_s = 1171,6 \text{ N}$$

Ukoliko je riječ, kao na ovom modelu, o više od jedne zakovice, tada površinu zakovice moramo pomnožiti s brojem zakovica i brojem presjeka po svakoj zakovici kako bismo dobili ukupan broj površina na kojima je javlja tangencijalno naprezanje. Tada gornja jednadžba glasi (4.13.):

$$\tau = \frac{4F}{d^2 \cdot \pi \cdot n \cdot m} \quad (4.13.)$$

Gdje je:

$n$  broj zakovica,

$m$  broj rezova po zakovici.

Iz navedene jednadžbe je potrebno izračunati minimalni potrebni promjer zakovice. Za to treba poznavati silu i tangencijalno naprezanje u zakovici odnosno ako baš želimo izračunati najmanji potrebni promjer onda trebamo uvrstiti najveće dopušteno tangencijalno naprezanje pa možemo pisati:

$$\tau = \tau_{dop}$$

$$d = d_{min}$$

Gdje je:

$\tau_{dop}$  najveće dopušteno tangencijalno naprezanje [MPa],

$d_{min}$  najmanji mogući promjer zakovice [mm].

Sukladno korigiranim izrazima izrazimo iz gornje jednadžbe promjer te dobijemo:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4F}{\tau_{dop} \cdot \pi \cdot n \cdot m}}$$

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1171,6}{330 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 1}}$$

$$d_{min} = 1,06 \text{ mm}$$

Dobiveni promjer svake od zakovica znači da bi u idealnim uvjetima toliki promjer bio dovoljan da zakovica izdrži najveće dopušteno tangencijalno naprezanje, odnosno da ne doživi mehanički lom. Međutim, okolni uvjeti nikada nisu idealni što znači da ukoliko puše vjetar tokom vožnje, ukoliko je cesta grbava ili se prouzroče bilo kakva udarna opterećenja, tangencijalno naprezanje će se zasigurno povećati iznad dopuštenog. Ovdje se proračun upoznaje s faktorom sigurnosti. On je u principu običan broj kojim se množi dobivena vrijednost, u ovom slučaju dobiveni promjer kako bi se usvojio novo dobiveni iznos i osigurala dovoljna čvrstoća zakovice pri povećanim naprezanjima. Iznos faktora sigurnosti ovisi o tome koliko parametara je uzeto u proračun te koliku sigurnost se želi postići. Za potrebe proračuna iznosi 2. Tada promjer opisuje jednadžba (4.14.):

$$d_{stvarno} = d_{min} \cdot f_s \quad (4.14.)$$

$$d_{stvarno} = 1,06 \cdot 2$$

$$d_{stvarno} = 2,12 \text{ mm}$$

Gdje je:

$f_s$  faktor sigurnosti.

s time da se stvarni promjer može zaokružiti na usvojenu vrijednost te iznosi:

$$d_{usvojeno} = 2,4 \text{ mm}$$

Iako se može zaključiti da stvarni promjer zadovoljava kriterije čvrstoće, proračun treba biti konzistentan što znači da također treba odrediti koliko iznosi tangencijalno naprezanje za taj stvarni promjer i usporediti ga s najvećim dopuštenim.

Iz promjera je moguće odrediti ukupnu površinu ukoliko ga se uvrsti u navedenu jednadžbu (4.15.):

$$A_{uk} = \frac{d_{stvarno}^2 \cdot \pi}{4} \cdot n \cdot m \quad (4.15.)$$

$$A_{uk} = \frac{2,4^2 \cdot \pi}{4} \cdot 4 \cdot 1$$

$$A_{uk} = 18,1 \text{ mm}^2$$

Gdje je:

$A_{uk}$  ukupna površina zakovica [ $\text{mm}^2$ ].

Prisutno tangencijalno naprezanje u zakovicama se računa pomoću prve jednadžbe:

$$\tau = \frac{F}{A_{uk}}$$

$$\tau = \frac{808}{18,0956}$$

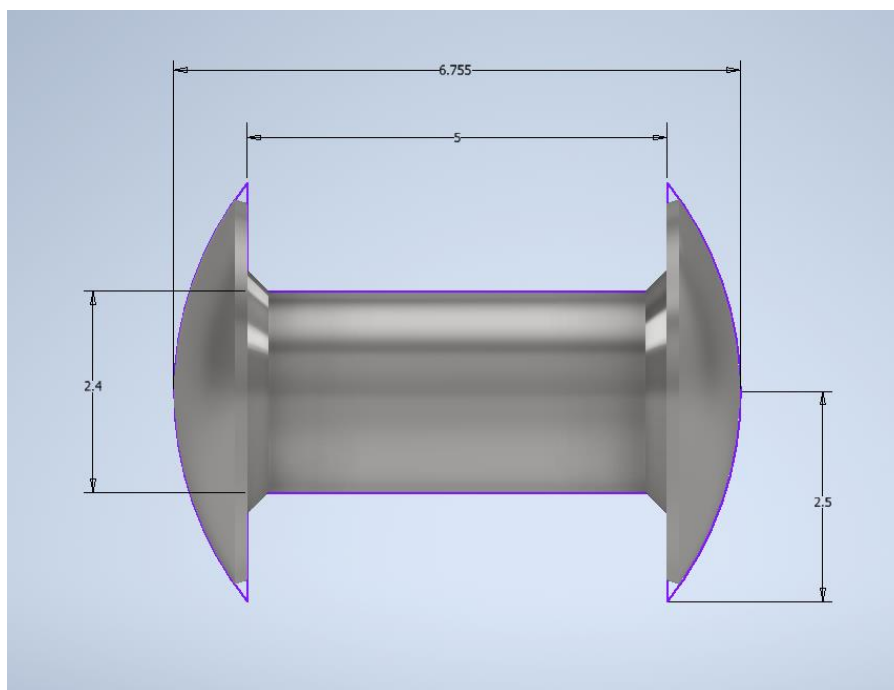
$$\tau = 46,65 \text{ MPa}$$

Zadnji korak predstavlja uspoređivanje stvarnog naprezanja s najvećim dopuštenim gdje stvarno naprezanje mora uvijek biti manje ili jednako od najvećeg dopuštenog naprezanja. U ovom slučaju je vidljivo da je tangencijalno naprezanje od 46.65 MPa manje od najvećeg dopuštenog naprezanja koje iznosi 330 MPa što se matematički zapisuje izrazom (4.16.):

$$\tau \leq \tau_{dop} \quad (4.16.)$$

$$46,65 \text{ MPa} \leq 330 \text{ MPa}$$

Razlog velike razlike između stvarnog i najvećeg dopuštenog tangencijalnog naprezanja se krije u velikom faktoru sigurnosti. Ukoliko bi on bio manji, i razlika bi bila manja. Time je kompletiran proračun zakovica na smicanje te su njezine konačne dimenzije prikazane na slici (4.12.):



*Slika 4.12. Konačne dimenzije zakovice*

#### 4.1.5. Proračun čvrstoće montažnih vijaka

Jednostavnost razumijevanja konstrukcijskih proračuna leži u međusobnom uspoređivanju i povezivanju fizikalnih principa i matematičkih izraza jer osnovna pretpostavka kod razumijevanja tehničkih i prirodnih znanosti je da sve ima isti temelj i potom se traže razlike. Primjeni li se ta ideja na ovaj proračun može se vidjeti da su vrlo slični. Razlikuju se po parametrima koji slijede u nastavku.

Opterećenje nije smicanje, već aksijalno vlačno opterećenje jer kada se vijak pritegne određenim momentom pritezanja, on nastoji stlačiti podlogu, a podloga njega nastoji rastegnuti zbog trećeg Newtonovog zakona akcije i reakcije. Time se pojavljuje sila prednaprezanja u vijku. To je ona sila koja ostaje u vijku nakon pritezanja moment ključem. Iako se čini da bi vijci trebali biti opterećeni na smicanje jer sijeku ravninu diska kao što je to slučaj sa zakovicama, razlog zašto se u ovakvom slučaju vijci proračunavaju na vlak je taj što se nakon pritezanja između vijka i podloge javlja statička sila trenja koja preuzima opterećenje na smicanje što ostavlja vijak opterećen samo na vlak kojeg uzrokuje već spomenuta sila prednaprezanja.

Druga razlika leži u obrnutom redosljedu proračuna koje vezuje određena analogija. Sukladno izrazu za tangencijalno naprezanje, normalno vlačno naprezanje se računa pomoću izraza (4.17.):

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} \quad (4.17.)$$

Gdje je:

$\sigma$  normalno naprezanje [MPa],

$F$  normalna sila [N],

$A$  površina poprečnog presjeka [mm<sup>2</sup>].

Kod zakovica je dobiven minimalni promjer preko najvećeg dopuštenog naprezanja, no u ovom slučaju će biti iskorišten standardni vijak M5 za montažu. Taj podatak govori da je promjer od

5 mm poznati parametar. Kako se zna i najveće dopušteno normalno naprezanje, jedino preostaje izračunati silu u brojniku što se i treba izračunati. Tada površina iznosi (4.18.):

$$A_{vijak} = \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.18.)$$

$$A_{vijak} = \frac{4,567^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{vijak} = 16,38 \text{ mm}^2$$

Gdje je:

$A_{vijak}$  površina porečnog presjeka vijka [ $\text{mm}^2$ ],

$d_s$  promjer poprečnog presjeka vijka [mm].

a normalno naprezanje je najveće dopušteno:

$$\sigma = \sigma_{dop}$$

Znajući da je riječ o nehrđajućem čeliku, relevantan podatak za naprezanje je granica tečenja koja iznosi 480 MPa jer montažni vijci spadaju u razred čvrstoće 6.8 koji se pokazao idealnim rješenjem za zadovoljavanje kriterija čvrstoće. Broj 480 je dobiven na način da se pomnože dvije znamenke pripadajućeg razreda čvrstoće te pomnože sa 10. No ono nije najveće dopušteno naprezanje jer tada se počinju pojavljivati neznatne plastične (trajne) deformacije što je neprihvatljivo. Zato se uzima faktor sigurnosti od 1.4 te dobiva najveće dopušteno vlačno normalno naprezanje u vijku jednadžbom (4.18.):

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{f_T}$$

$$\sigma_{dop} = \frac{480}{1,4}$$

$$\sigma_{dop} = 342,86 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$\sigma_{dop}$  najveće dopušteno normalno naprezanje vijku [MPa],

$R_e$  naprezanje na granici tečenja [MPa],

$f_T$  faktor sigurnosti.

Pošto je vijak složeniji konstrukcijski element od zakovica, sila u vijku se računa uzimajući u obzir parametre navoja i moment pritezanja. Ti parametri se odnose na kut uspona navoja jer o tome, između ostaloga, ovisi sila u vijku. Kut uspona označava kut pod kojim je postavljen navoj odnosno tangens omjera hoda navoja i opsega vijka. Koristeći sljedeću jednadžbu (4.19.) može se izračunati taj kut:

$$\tan \gamma = \frac{h}{d_s \cdot \pi} \quad (4.19.)$$

Gdje je:

$\gamma$  kut uspona navoja [°],

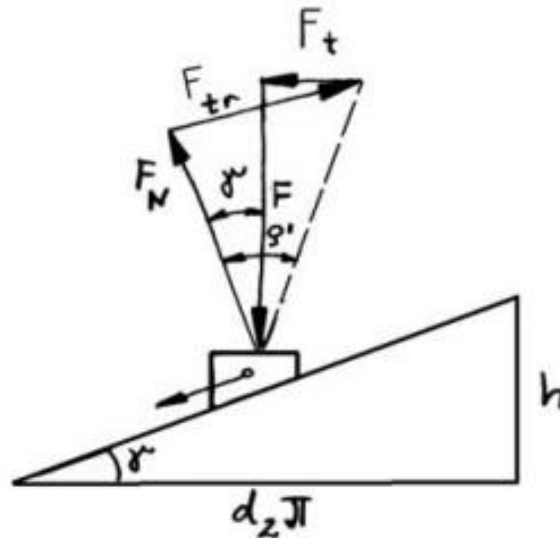
$h$  uspon navoja [mm].

Uspon navoja iznosi 0.8 [14] mm te uvrštavanjem u jednadžbu slijedi:

$$\begin{aligned} \tan \gamma &= \frac{0,8}{4,567 \cdot \pi} \\ \gamma &= \arctan \frac{0.8}{4,567 \cdot \pi} \\ \gamma &= 3,19^\circ \end{aligned}$$



Korigirani kut trenja je sljedeći parametar kojeg zatvaraju vektori normalne sile i zamišljene spojnice hvatišta vektora normalne sile i vektora sile trenja koja je nanesena hvatištem okomito na vrh normalne sile. Sljedeća slika (4.13.) prikazuje objašnjeno:



Slika 4.13. Skica sila u vijku kada je osigurana samokočnost vijčanog spoja [15]

Korigirani kut trenja se računa inverznim tangensom korigiranog faktora trenja koji u ovakvim slučajevima najčešće iznosi 0,12. Sljedećim izrazom (4.20.) tada dobivamo:

$$\rho' = \arctan \mu'_G \quad (4.20.)$$

$$\rho' = \arctan 0,12$$

$$\rho' = 6,84^\circ$$

Gdje je:

$\rho'$  korigirani kut trenja,

$\mu'_G$  korigirani faktor trenja.

Vidljivo je da je korigirani kut trenja veći od kuta uspona navoja što govori da je vijčani spoj samokočan, a to znači se neće otpustiti sam od sebe odnosno bez djelovanja dodatne sile odvrtnja. To je pokazatelj ispravnosti vijčanog spoja. Tome je tako što je tada tangens razlike kuta uspona i korigiranog kuta trenja negativan odnosno tangencijalna sila je suprotnog smjera djelovanja pa je potrebna dodatna sila za otpuštanje.

Aksijalna sila u vijku se može izračunati iz jednadžbe (4.21.):

$$M_G = F \cdot \frac{d_s}{2} \cdot \tan(\rho' + \gamma)$$

$$M_k = F \cdot \mu_k \cdot \frac{d_h + d_w}{4}$$

$$M_A = M_G + M_k$$

$$M_A = F \cdot \left[ \frac{d_s}{2} \cdot \tan(\rho' + \gamma) + \mu_k \cdot \frac{d_h + d_w}{4} \right] \quad (4.21.)$$

Gdje je:

$M_G$  moment na usponu navoja [Nm],

$M_k$  moment na podlozi [Nm],

$M_A$  ukupni moment pritezanja [Nm],

$F$  normalna sila u vijku [N],

$d_h$  unutarnji promjer glave vijka [mm],

$d_w$  vanjski promjer glave vijka [mm].

Promatrajući jednadžbu može se zaključiti o čemu sve ovisi sila u vijku. Prvi član po redu u zagradi se odnosi na savladavanje momenta na navoju, a drugi član na savladavanje momenta na podlozi gdje su relevantni unutarnji i vanjski promjer glave vijka koja pritezanjem ostvaruje veliku silu trenja s podlogom. Na vijku M5 oni iznose 5 mm i 9.5 mm. Faktor trenja također iznosi kao na navoju 0.12. Ukupni moment pritezanja montažnih vijaka M5 na disku cestovnih bicikala je standardnih 4 Nm. Izražavanjem sile  $F$  te uvrštavanjem varijabli slijedi:

$$F = \frac{M_A}{\left[ \frac{d_s}{2} \cdot \tan(\rho' + \gamma) + \mu_k \cdot \frac{d_h + d_w}{4} \right]}$$

$$F = \frac{4}{\left[ \frac{4,567 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \tan(6,8428 + 3,1914) + 0,12 \cdot \frac{(5 + 8,79) \cdot 10^{-3}}{4} \right]}$$

$$F = 4891,48 \text{ N}$$

Izračunavši aksijalnu silu u vijku moguće je dobiti vlačno normalno naprezanje u poprečnom presjeku ukoliko se podijeli sa površinom poprečnog presjeka kroz sljedeću jednadžbu:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{4891,4812}{16,3814}$$

$$\sigma = 298,6 \text{ MPa}$$

Dobiveno naprezanje je stvarno naprezanje koje djeluje u vijku. Kontrole radi:

$$\sigma \leq \sigma_{dop}$$

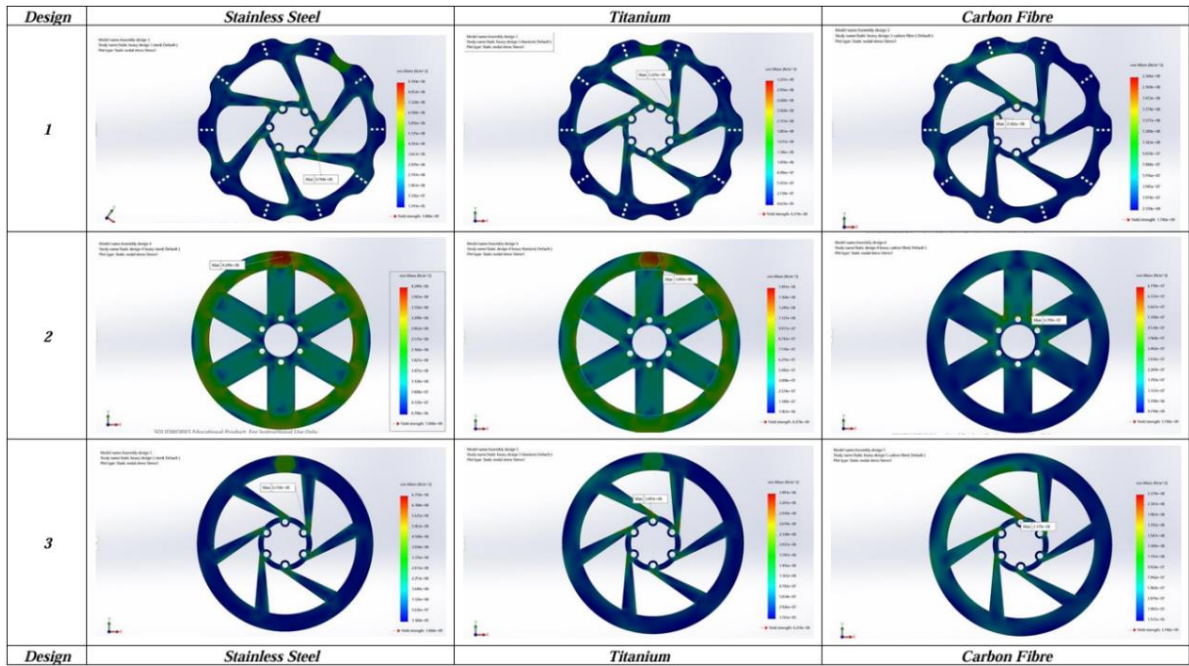
$$298,6 \text{ MPa} \leq 342,86 \text{ MPa}$$

Navedenom tvrdnjom je izvršen proračun jednog montažnog vijaka na aksijalno vlačno opterećenje te vidimo da vijak zadovoljava postavljene uvjete. Međutim, 3D generirani model ima ukupno šest takvih vijaka raspoređenih u pravilan šesterokut kao što je vidljivo u prijašnjim poglavljima na slikama (4.1.), (4.2.) i (4.3.) gdje su vidljive i međusobne dimenzije.

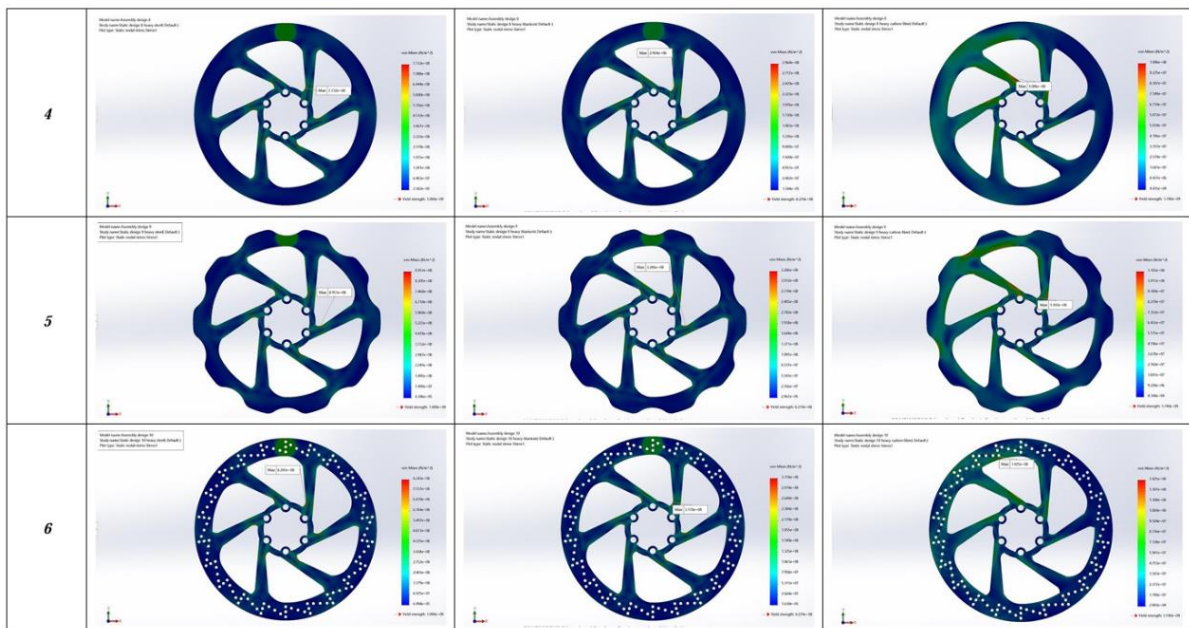
#### 4.1.6. Numerička analiza nosivosti diska

Temeljem izvršenih proračuna čvrstoće zakovica i montažnih vijaka nije moguće zaključiti kako disk neće doživjeti lom iz razloga što postoje daljnji uvjeti koji moraju biti zadovoljeni kao što su pravilan dizajn diska koji ne izaziva velika naprezanja unutar materijala. Stoga se provodi numerička analiza nosivosti diska kao i analiza termičkog naprezanja koje će biti opisane u ovom i sljedećem poglavlju (4.1.7.) na temelju rezultata dobivenih u članku [3] gdje je ispitivana ovisnost dizajna i materijala diska o njegovoj učinkovitosti. Također je potrebno usporediti način na koji se već prethodno spomenuti 3D generirani model optimalnog dizajna diska uklapa u dobivene rezultate.

Po pitanju mehaničkog naprezanja do sada je bila riječ o mehaničkom naprezanju zakovica ( smicanje – tangencijalno naprezanje ) i montažnih vijaka ( vlak – normalno naprezanje ). Ali to nisu jedini elementi koji su izloženi naprezanju. Cijeli disk je napregnut prilikom kočenja što znači da se u svakom poprečnom presjeku tarne plohe diska kao i unutarnjeg dijela javlja mehaničko naprezanje. Upravo zbog prirode naprezanja, geometrija diska se mora prilagoditi tome da ne bi došlo do loma. Zato treba izbjegavati koncentratore naprezanja kvalitetnom geometrijom kao što je ranije spomenuto te najveća koncentracija materijala mora biti u smjeru najvećih naprezanja. Drugim riječima, smjer najveće koncentracije materijala se mora poklapati sa smjerom djelovanja sila. Prethodna rečenica je ključna za osiguranje čvrstoće cijeloga diska te upravo zato većina dizajna diska izgleda poput spirale i raznih elegantnih geometrijskih oblika. Time se prati tok silnica naprezanja i nastoji se umanjiti njihov utjecaj. Kako bi analiza mehaničkog naprezanja bila uspješno provedena, potrebno je poznavati proračun sila i tlaka koji je proveden u poglavlju 4.1.1. Na osnovu tih podataka se nekom od metoda teorija čvrstoće odrede uvjeti ispitivanja i dobiju rezultati. Navedena analiza se provodi u programima za simulaciju. Primjer takvog programa je SolidWorks, program za računalni dizajn i inženjering veoma velikog značaja u znanju konstruktora. Sljedećim slikama (4.14.) i (4.15.) su prikazani rezultati analize mehaničkog naprezanja u softwareu SolidWorks na šest različitih dizajna diska izrađenih od tri promatrana materijala – nehrđajući čelik, titanij i karbonska vlakna.



Slika 4.14. Rezultati mehaničkog naprezanja prva tri dizajna [10]



Slika 4.15. Rezultati mehaničkog naprezanja druga tri dizajna [10]

Rezultati potvrđuju prethodno objašnjenu prirodu naprezanja i geometrije diska. Bojama je prikazan intenzitet naprezanja gdje prema crvenoj raste intenzitet, a prema plavoj se smanjuje.

Najveće mehaničko naprezanje se javlja kod dizajna 2 gdje su zastupljeni oštri geometrijski prijelazi i gdje ona ne prati tok silnica. Ostali dizajni su podjednaki uz neznčajne razlike od materijala do materijala i od oblika do oblika.

Uzevši u obzir blage prijelaze koji prevladavaju na 3D modelu diska, masu koja je unutar granica tolerancije za cestovne bicikle te kvalitetno odabran materijal, shodno je zaključiti kako bi numerička analiza nosivosti diska provedena na 3D modelu također zadovoljavala sve uvjete te bi se javljala znatno manja naprezanja nego kod dizajna 2 što je još jedan od dokaza optimalne izrade 3D izrađenog modela.

#### 4.1.7. Analiza termičkog naprezanja

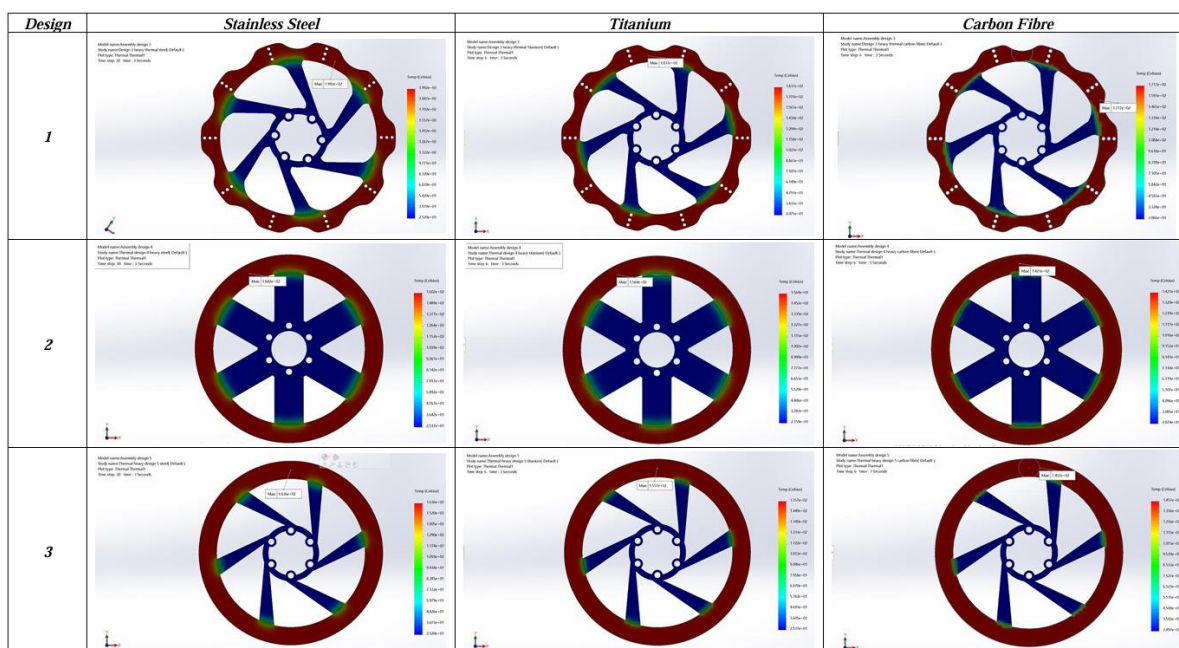
Termičko naprezanje zahtijeva poseban obim pažnje te je njezina analiza ključan faktor pri izradi diska. Sve to se može zahvaliti sili trenja koja generira toplinu. Navedena tvrdnja se najbolje može shvatiti ukoliko se promatra iz aspekta pretvorbe energije gdje termodinamika zaslužuje najviše zahvala. Kako je izračunato u uvodnom proračunu, gibajući bicikl posjeduje određenu količinu kinetičke energije koja se nakon pet sekundi intenzivnog kočenja smanji do nulte vrijednosti. Znajući da zbog zakona očuvanja energije ona ne može nastati niti nestati, znamo da je prešla u drugi oblik. Taj oblik energije opisujemo pojmom toplina. Ona nastaje trenjem između diska i kočionih pakni te što ono duže traje, to se veći dio energije prenese što znači da je zapravo riječ o toplinskom toku odnosno snazi kočenja koja se izražava u watima što je također izračunato u uvodnom proračunu. Time se generirana toplina raspršuje u okolinu kako se disk hladi i postaje nepovrativa. Nepovrativost znači da je nemoguće provesti suprotan smjer pretvorbe energije od prirodnog smjera. Prilikom kočenja, kinetička energija gibanja se pretvara u mehaničku energiju kočenja koja se zatim trenjem pretvara u toplinsku energiju koja se konvekcijom između diska i okolnog zraka predaje okolini. Takav proces je nepovrativ odnosno nereverzibilan jer nije moguće toplinu iz okoline predati disku te ju ponovno pretvoriti u mehaničku i kinetičku energiju gibanja bicikla. Složenost ovakvih procesa je iznimna te otvara vrata svijetu za sebe pogotovo kada se spomene tajanstveni pojam entropija. Entropija predstavlja svojevrsnu zagonetku jer je pomalo neistražena te vezuje mnoge aspekte znanosti pa čak i filozofije, ali u užem smislu ona označava stupanj nepovrativosti procesa. Kako je proces kočenja nepovrativ, ukupna entropija sustava se povećava. Njezino ukupno povećanje

predstavlja zlatno pravilo prirode jer je ono na neki način sigurno pohranjivanje energije. Kinetička energija bicikla je usmjereni i koncentrirani oblik energije generiran snagom nogu te mehaničkim prijenosom što predstavlja uređeni oblik energije, a kočenjem se ta energija pretuče u toplinu koja se nastoji jednoliko raspršiti u okolinu što povećava entropiju sustava i postizanje energetske ravnoteže jer jedan od osnovnih principa realnosti je težnja ka minimalnoj energiji odnosno njezinim, što je više moguće, jednolikim raspoređivanjem. Primjerice, upravo iz tog razloga dolazi do grmljavine gdje se velika koncentracija električnog naboja nastoji raspršiti udarom u tlo povećavajući ukupnu entropiju sustava ili hlađenje vrućeg čaja na stolu gdje on predaje toplinu okolini kako bi se temperature nastojale izjednačiti čime bi se postigla toplinska ravnoteža, a to je optimalno stanje.

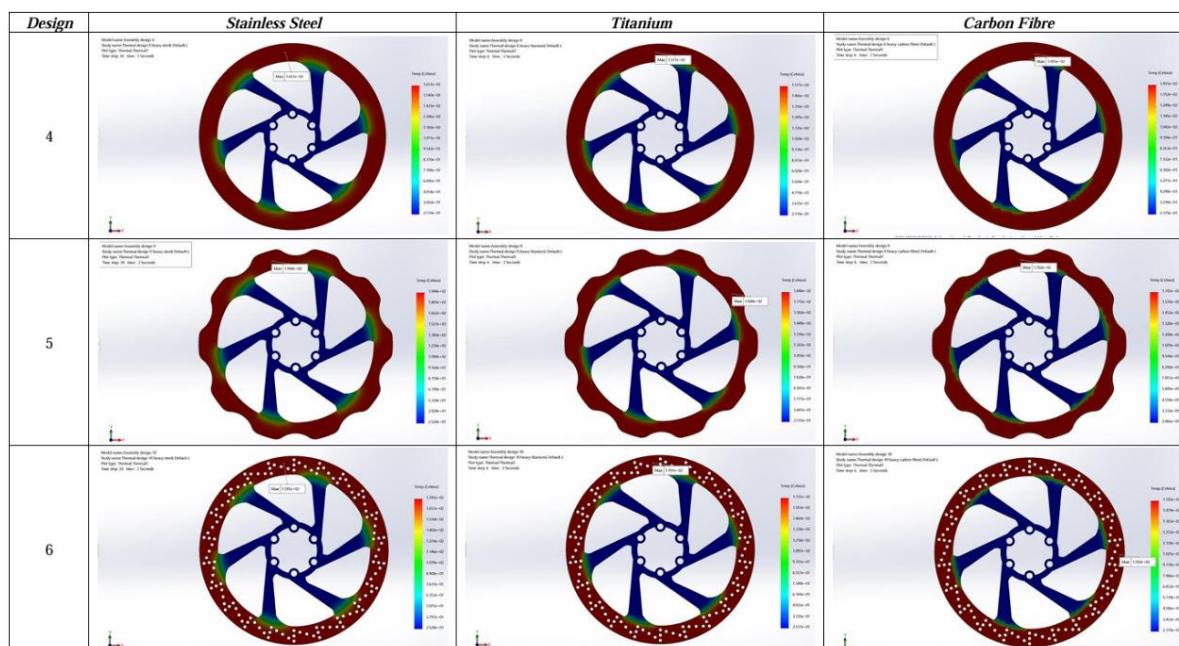
Razumijevanje ovakvih termodinamičkih procesa je od krucijalne važnosti za dobru konstrukciju i analizu diska. Također potvrđuje isprepletenost konstruiranja kočionog sustava sa ostalim područjima tehničkih pa čak i prirodnih znanosti. Polazišna točka za analizu termičkog napreznja jest činjenica da se disk mora što manje zagrijavati za vrijeme kočenja te da mora biti osigurano njegovo brzo hlađenje. Tome je tako jer se porastom temperature mijenjaju i mehanička svojstva materijala pa se shodno tome analiza mehaničkog napreznja u pravilu vrši nakon analize termičkoga odnosno pri maksimalnoj dopuštenoj temperaturi na koju se materijal diska smije zagrijati jer navedena svojstva materijala se ne smiju značajno promijeniti prilikom kočenja kako ne bi ugrozila funkcionalnost kočnica. Iz tog razloga su osim mehaničkih svojstava veoma važna i termička svojstva materijala od kojih su najbitniji specifični toplinski kapacitet, koeficijent prolaza i koeficijent prijelaza topline, odnosno koliko brzo se disk zagrijava i koliko brzo se hladi, dakle, izmjenjuje toplinu s okolnim zrakom. Dobar je materijal stoga onaj koji ima čim veći specifični toplinski kapacitet i čim veći koeficijent prijelaza topline, a čim manji koeficijent prolaza topline. Navedena svojstva su prikazana u tablici u poglavlju 4.1.3.

Konkretna analiza termičkog napreznja se može provoditi u Inventor Nastranu, softwareu koji omogućuje simulacije napreznja ili u SolidWorksu temeljem podataka izračunatih u uvodnom proračunu i geometrije diska gdje je još potrebno imati definiranu temperaturu okoline i maksimalnu temperaturu koju materijal može izdržati.

Sljedećim slikama (4.16.) i (4.17.) su prikazani rezultati analize provedene u SolidWorksu na šest različitih dizajna diska i tri prethodno objašnjena materijala čime je dana usporedba i ovisnost odnosa dizajna i materijala o zagrijavanju diska tokom intenzivnog kočenja.



Slika 4.16. Rezultati termičkog napreznja prva tri dizajna [10]



Slika 4.17. Rezultati termičkog napreznja druga tri dizajna [10]

Bojama je prikazana razlika u temperaturi gdje crvena prikazuje najviše temperature, a plava najmanje. Vidljivo je da se tarna površina najviše zagrijava te da se toplina neznatno prenosi na unutarnji dio diska. To je karakteristično za svih šest dizajna od sva tri materijala s tim da

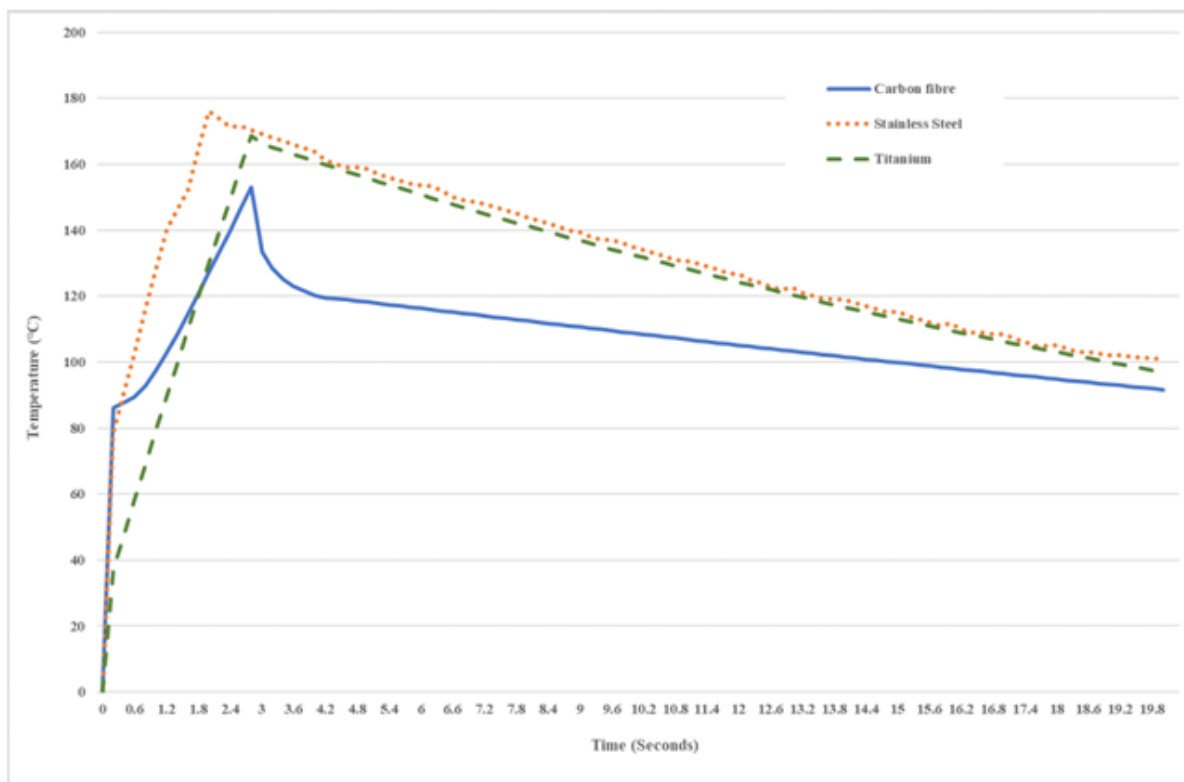


ipak postoje određene razlike ako se malo bolje pogleda. Konkretno na dizajnu šest se može uočiti da nehrđajući čelik više prenosi toplinu na unutarnji dio diska nego titanij ili karbonska vlakna. Ista analogija je vidljiva na ostalim dizajnima što govori o tome da nehrđajući čelik bolje provodi toplinu što je kod diska nepoželjno te su titanij i karbonska vlakna po tom pitanju u prednosti.

Još jedan važan detalj jest toplinska dilatacija materijala. Poznato je da se povećanjem temperature materijal rasteže, posebice metalni materijal odnosno raste im volumen što je također nepoželjna pojava prilikom kočenja, a postoji tendencija k tome. Negativna posljedica toplinske dilatacije je ta što se materijal tarne površine nastoji širiti odnosno povećavati promjer, ali je to onemogućeno zakovicama kojima je čvrsto vezan za unutarnji dio diska. U takvoj situaciji dolazi do neslobodnog vitoperenja tarne površine koja više ne leži u jednoj ravnini već poprima sinusoidni trend što rezultira struganjem o kočione pakne i promjenom mehaničkih svojstava. Ta pojava se može izbjeći pametno osmišljenom geometrijom koja omogućuje dobro hlađenje, kvalitetnim materijalom ili izradom potpuno drugačije vrste diska kao što je plutajući disk.

Plutajući disk karakterizira fizička odvojenost tarne površine od ostatka diska. Oni su u tom slučaju povezani prstenastim elementima koji toleriraju toplinsku dilataciju i omogućuju slobodno širenje tarne površine unutar ravnine diska bez vitoperenja. Takva vrsta diska je više karakteristična za motocikle nego za cestovne bicikle jer oni postižu puno veće brzine te su kočenja znatno intenzivnija i generiraju više topline pa su i veće toplinske dilatacije.

Nakon zagrijavanja diska zbog kočenja slijedi hlađenje koje se mora odvijati čim brže kako se disk ne bi pregrijao tokom višestrukog kočenja. Kao što je mnogo puta naglašeno, kvalitetan dizajn diska i materijal upravo to omogućuju. Slika (4.18.) prikazuje ovisnost temperature kočenja o proteklom vremenu:



*Slika 4.18. Krivulja hlađenja diska nakon intenzivnog kočenja [10]*

Krivuljama su grafički prikazane ovisnosti temperature diskova o vremenu za dizajn 6. Narančasta točkasta linija prikazuje hlađenje diska od nehrđajućeg čelika, zelena isprekidana hlađenje diska od titanija, i zadnja plava, hlađenje diska od karbonskih vlakana. Temperaturni raspon se kreće od 0 do 200 stupnjeva celzijusa, a vrijeme je promatrano u intervalu od 0 do 20 sekundi. Unutar navedenih raspona se može vidjeti da se nehrđajući čelik najbrže zagrijava i također postiže najviše temperature zbog svojih termičkih svojstava provođenja kao što se i hladi pri višim temperaturama nego titanij i karbonska vlakna. Upravo zato je s termičkog stajališta on najmanje prihvatljiv od tri promatrana materijala. Titanij se nešto sporije zagrijava od nehrđajućeg čelika zbog većeg specifičnog toplinskog kapaciteta te postiže manju maksimalnu temperaturu, ali se zato hlade pri relativno istim temperaturama. Materijal koji odskače od njih je karbon odnosno karbonska vlakna koja imaju znatno veći toplinski kapacitet te znatno manju maksimalnu temperaturu iako se inicijalno brže zagrijavaju. Početno hlađenje eksponencijalno pada zbog izvrsnog odvođenja topline te vrlo brzo postigne niže temperature. U konačnici, sva tri materijala nakon dvadeset sekundi hlađenja dođu na otprilike iste temperature, ali se razlikuju po putanji hlađenja odnosno brzini. Koeficijent provođenja topline prikazan u tablici svojstava materijala također potvrđuje navedena ponašanja materijala jer što

je on manji to materijal sporije provodi toplinu po disku pa se i sporije zagrijava, a za čelik je ta vrijednost najveća, dok je za karbonska vlakna najmanja.

Baratajući dosad objašnjenim aspektima disk kočnica, postaje lako predviđati trend krivulja ukoliko bismo mijenjali parametre geometrije i svojstva materijala. Shodno tome, veća koncentracija materijala bi povisila maksimalnu temperaturu diska i produžila vrijeme hlađenja, dok obrnutom analogijom, dodavanje više rupa za hlađenje bi spustilo maksimum krivulja za određenu vrijednost te poboljšalo hlađenje. Povećanje specifičnog toplinskog kapaciteta bi rezultiralo sporijim zagrijavanjem i manjom maksimalnom temperaturom dok bi povećanje koeficijenta prijelaza topline dovelo do bržeg hlađenja odnosno spuštanja krivulje.

Umijeće dobro konstruiranog diska leži u uravnoteživanju svih objašnjenih aspekata te temeljem toga kreiranju optimalnog rješenja koje zadovoljava sve potrebne uvjete kako ne bi došlo do mehaničkog ili termičkog loma te kako bi bila osigurana čvrstoća i trajnost diska.

#### 4.1.8. Sustav hlađenja diska

Iako je tema hlađenja diska već spomenuta nekoliko puta, analiza detaljnija od spominjanja je potrebna za pravilno razumijevanje i konstrukciju. Nakon termičke analize se može bolje razumjeti kako i čime odvoditi toplinu s diska. Sustav hlađenja se svodi na upravo to, te što se ona brže odvodi to je čitav kočioni sustav efikasniji. On se može podijeliti na dio koji se tiče kočnice i dio koji se tiče disk rotora. Riječ je o relativno novoj tehnologiji koja se naziva Ice-technologies, tehnologije koje omogućavaju znatno efikasnije i mirnije kočenje. Umanjuju zračenu toplinu do čak 100°C. Što se tiče konstrukcije diska, navedene prednosti, kao i mnoge druge, su postignute trodijelnom građom tarne plohe. Ona je izrađena od aluminijske na koju su vezani plošni elementi za usisavanje i distribuciju zraka te sa svake strane tarne plohe oblaže sloj nehrđajućeg čelika koji je u kontaktu s kočionim paknama za vrijeme kočenja. Navedena građa je prisutna i na 3D primjeru diska te je prikazana sljedećom slikom (4.19.):

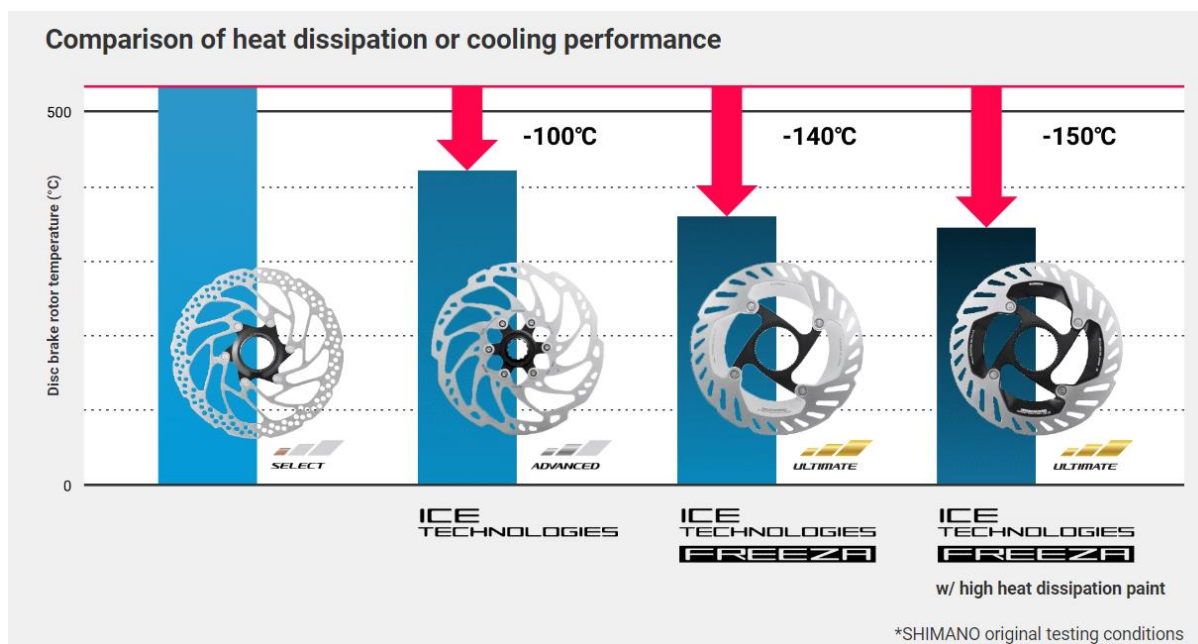


*Slika 4.19. Trodijelna građa tarne plohe diska*

Takvom građom su osigurana bolja termička svojstva diska jer kombiniraju prednosti nehrđajućeg čelika i aluminija koji ima veliki specifični toplinski kapacitet pa mu treba duže vrijeme da se zagrije. Tim bolje što su aluminijske plohe za usisavanje zraka direktno vezane za središnji aluminijski dio tarne plohe te pospješuju odvođenje topline.

Čak i unutar same izvedbe „Ice-technologies“ tehnologije postoje određene razlike i unaprijeđenja pa tako „Ice-technologies Freeza“ zauzima vodeće mjesto po pitanju redukcije topline, trošenja pakni, mirnoće i efikasnosti kočenja. Promatrajući dimenzije debljine diska izrađenog modela može se zaključiti kako prati način konstrukcije po najnovijoj tehnologiji koju karakterizira deblji sloj aluminija od 1mm te obostrani sloj nehrđajućeg čelika čija je ukupna debljina 0.5 mm što znači da je ukupna debljina troslojne tarne plohe 1.5 mm.

Priloženom slikom (4.20.) je prikazana usporedba u redukciji topline običnih tehnologija kočenja i varijanti „Ice-technologies“ tehnologija kočenja.



Slika 4.20. Usporedba redukcije topline u različitim tehnologija izrade diska [16]

Zadnji prikaz diska na slici pokazuje važnost finesa i detalja pri konstruiranju diska (navedena tvrdnja se odnosi i na konstrukciju čitavog bicikla), jer samo razlika u bojama može utjecati na odvođenje topline što se može objasniti zakonima zračenja pa je tako time ostvarena redukcija topline od dodatnih 10°C.

Usporedbom navedenih karakteristika sa izrađenim 3D modelom diska koji nalikuje na zadnja dva dizajna na slici (4.20.), može se zaključiti kako bi također bila prisutna velika redukcija topline što bi ga svrstavalo u kategoriju visoko kvalitetnih i učinkovitih diskova. Tvrdnja koja to dokazuje je ta što je njegov optimalni dizajn i izrada temeljena na benefitima „Ice technology“ tehnologije o kojoj je bila riječ.

## 4.2. Prednja kočnica

### 4.2.1. Osnovna geometrija, dizajn i materijali izrade kočnice

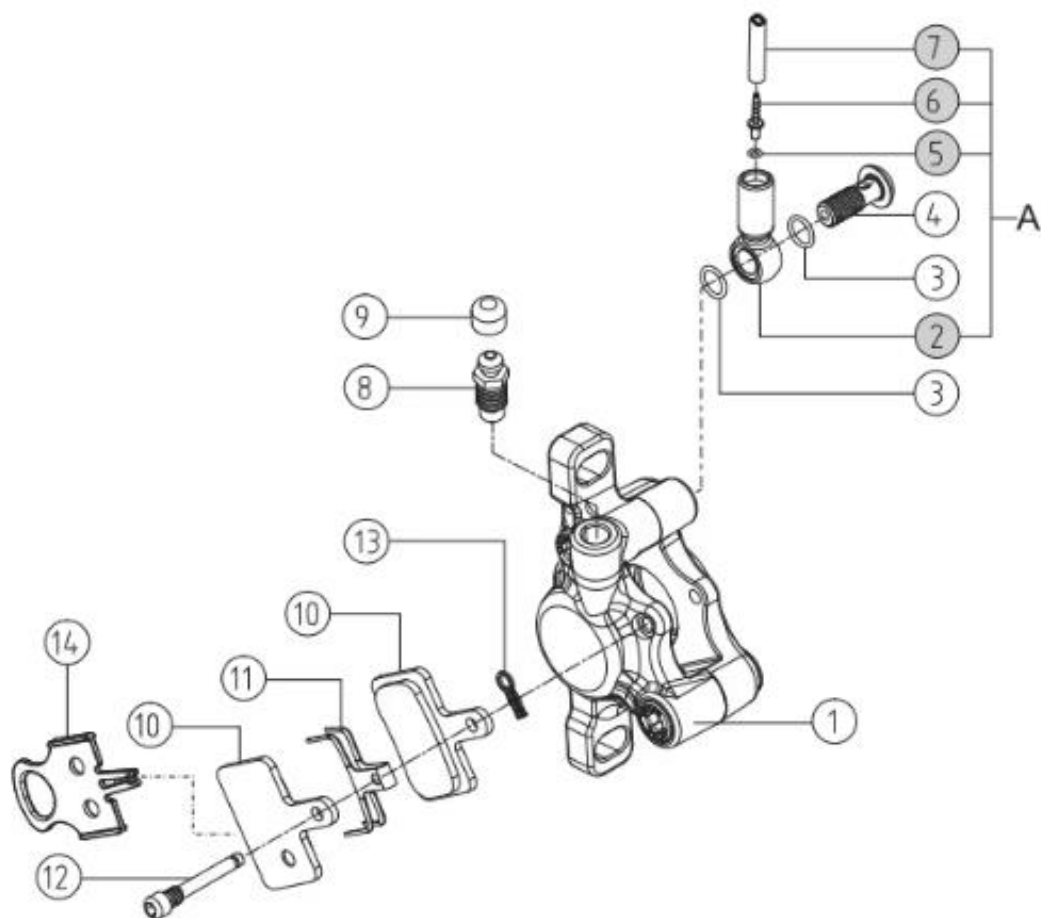
Kučište kočnice predstavlja drugu veliku cjelinu prilikom konstrukcije hidrauličkog kočionog sustava jer je fizički odvojeno od disk rotora. Unatoč tomu, mnogo spona ih veže. Snaga

kočenja ovisi o mnoštvu parametara koji se tiču i diska i kočnice stoga oni međusobno trebaju biti itekako kompatibilni. Kada je riječ o geometriji i dizajnu, pretjerane razlike u načinu razmišljanja nema, isto zlatno pravilo koje vrijedi za disk vrijedi i za kočnicu, a to je čim lakša konstrukcija, kompaktnija i aerodinamičnija, uz uvjet da svi kriteriji čvrstoće i funkcionalnosti budu zadovoljeni. Tek na kraju se pridaje pažnja estetici. Mnoge funkcionalne razlike u mnogih proizvođača kočnica i samih različitih modela su minimalne te se tiču uglavnom ponešto manje mase, pa se skokovita razlika nastoji postići modifikacijom dizajna kočnice.

Smještaj kočnice na biciklu nije jednoznačno definiran već sukladno geometriji samog bicikla on varira unutar nekih granica. Ali, o kojem god smještaju da je riječ, odnosno načinu montaže, svi oni prate spomenuta pravila konstruiranja te ju smještaju iza prednje vilice kako bi stvarala što manji otpor zraka.

Osnovna geometrija kočnice je manje više identična u mnogih vrsta te se sastoji od nekoliko osnovnih dijelova prikazanih slikom (4.27.):

1. Dvije kočione pakne
2. Dvije čeljusti
3. Metalni uložak
4. Brtve
5. Kućište kočnice
6. Cijev za dovod ulja



Slika 4.21. Osnovni dijelovi hidrauličke kočnice [17]

Slikom iznad je dan općeniti prikaz dijelova hidrauličke kočnice u cestovnog bicikla. Glavni dijelovi su, redom, kočione pakne koje ostvaruju silu trenja s diskom te su označene brojem 10 na slici, metalni uložak koji ih povezuje je označen brojem 11 te on omogućuje vraćanje kočionih pakni u početni položaj, a mali vijak s kratkim navojem uz samu glavu koja osigurava fiksni međusoban položaj dijelova je pod brojem 12. Neizostavni dio su naravno i brtve koje osiguravaju nepropusnost ulja, sprječavaju ulazak prašine i nečistoća u kočnicu te osiguravaju prisnost dijelova. Nalaze se unutar kućišta kočnice na spojevima čeljusti i kućišta te na ostalim spojevima kao što su otvor za točenje novog ulja te spoj na kojem je montirana cijev za dovod ulja. Taj spoj je označen slovom A na slici iznad. Čitavo kućište je sastavljeno od dva dijela koja su međusobno spojena vijcima i na kojima se nalaze rupe za montažu na prednju vilicu. Ostali dijelovi označeni na slici su čepići, gumene zaštitne kapice te razni pomoćni elementi.

Možda iz navedenih i opisanih dijelova zvuči kako je riječ o složenom sustavu koji se očituje svojom glomaznošću, ali zapravo je riječ o kompaktnom sustavu odnosno kočnici koja je vrlo

često trokutastog oblika veličine prekidača za paljenje i gašenje svjetla. Napravljena je na način koji omogućuje veoma jednostavno baratanje i jednostavnu zamjenu kako kočionog ulja tako i kočionih pakni. Otpuštanjem vijka koji je na slici 4.26. vidljiv s prednje strane moguće je izvući obje pakne na koje su vezane rebraste plohe s primarnom svrhom odvođenja topline. To je omogućeno otvorom kućišta s gornje strane te je geometrijski složen tako da pakne ostvaruju prisnost s kućištem samo na jedan način što onemogućuje krivo umetanje pakni u kućište kočnice.

Kako bi bili zadovoljeni uvjeti čim manje mase, a velike čvrstoće i krutosti kočnice, također se mora pomno odabrati materijal kućišta. Shodno tome ono se izrađuje od nekoliko vrsta materijala koje možemo podijeliti u dvije skupine:

1. Polu-metalni materijali
2. Nemetalni materijal

U polu-metalne materijale spadaju razna vlakna kao što su karbonska, aramidna, bakrena i čelična, a u nemetalne materijale spadaju keramika i sjeckano staklo. Glavna prednost polu-metalnih materijala jest svojstvo čvrstoće i krutosti jer vlaknasta struktura upravo to omogućuje te ovisno o nabavnoj cijeni, dostupnosti materijala na tržištu te ostalih svojstava materijala odlučuje se o konačnom materijalu izrade kućišta. Može se reći da je odabir materijala izrade kućišta kočnica delikatan proces uzimanja u obzir mnoštva faktora, a ponajviše uvjeta kojima će kočnica biti izložena. Može se primijetiti kako se prethodna rečenica također odnosi na konstrukciju čitavog kočionog sustava pa čak i čitavog bicikla. Međutim, to je i poanta načina razmišljanja u konstruiranju te jedini ispravan način invencije.

Daljnja razlika pojedinih vrsta materijala se očituje kako u svojstvima tako i u načinu dobivanja materijala, što je i najveća razlika u vrstama vlakana od kojih se izrađuje kućište. Kada je riječ o vlaknima treba naglasiti njihov osnovni obrazac izrade, jer su ona sama po sebi savitljiva.

Veoma tanke niti dimenzija oko deset mikrometara međusobno se vežu u snopove koji se zatim u određenim uzorcima isprepliću kako bi se dobila izrazito žilava i izdržljiva površina. Zatim se sloj tih vlakana potapa i lijepi epoksi smolom kako bi se međusobno bolje povezala i tvorila nepropusnu i žilavu površinu. U toj fazi izrade su osigurana navedena svojstva, ali i dalje nije postignuta čvrstoća. Ona se postiže nakon što se karbonski kompoziti lijepe, vakumiraju i peku

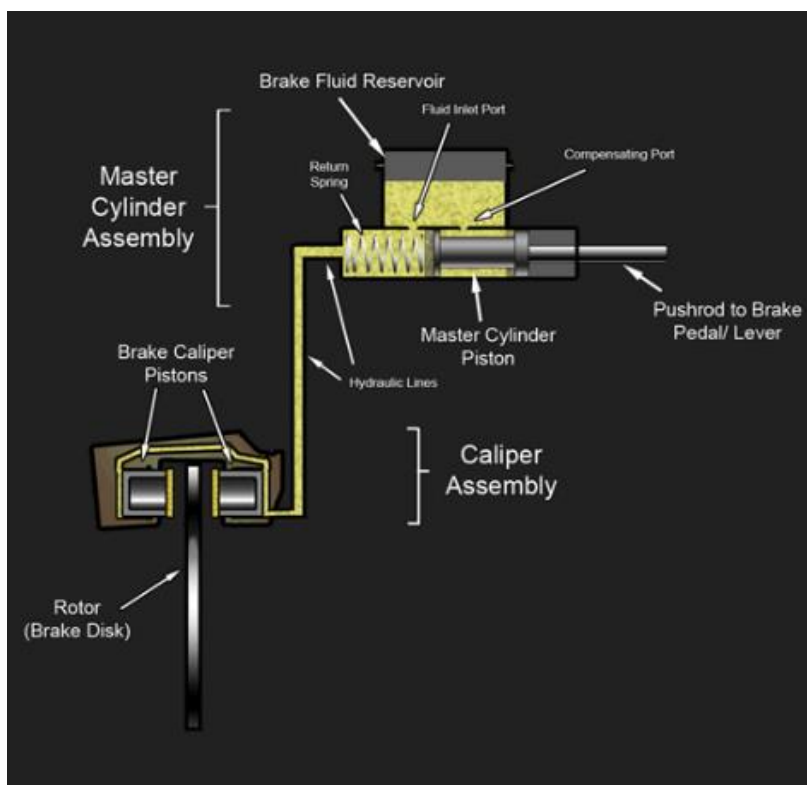


na temperaturama koje je moguće ostvariti u običnim pećnicama. Tada stvorena struktura poprima finalna svojstva iznimne čvrstoće, krutosti i izdržljivosti. Sličan postupak se odnosi na obradu ostalih navedenih vrsta vlakana zbog čega se umjesto polu-metalnih materijala izrade kućišta može koristiti izraz vlaknasta izrada.

Od preostalih nemetalnih materijala je najznačajnija keramika koja se ističe svojom krutošću i otpornošću na visoke temperature, trošenja i atmosferske uvjete.

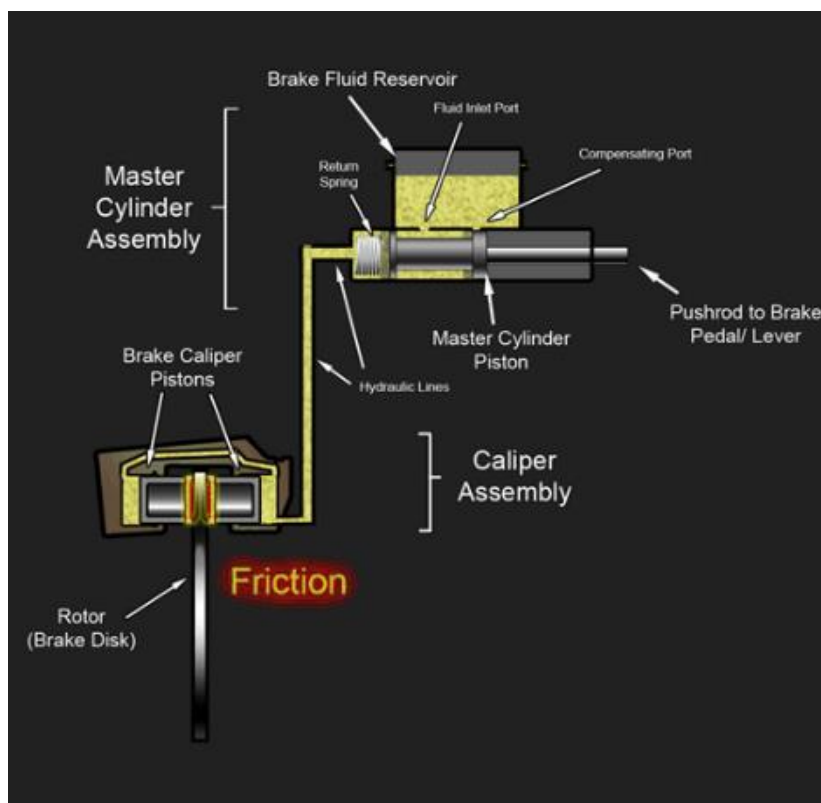
#### 4.2.2. Fizikalni principi hidrauličkog kočenja i kočiono ulje

Osnovni fizikalni princip na kojem se temelji rad hidrauličkih disk kočnica, kako na biciklu tako i na ostalim vozilima je nestišljivost fluida odnosno kapljevina. Ona podrazumijeva nemogućnost kompresije fluida. Iako je zapravo to moguće postići u izrazito malom stupnju, može se reći da su fluidi uglavnom nestišljivi odnosno da im se ne može smanjiti volumen već samo mijenjaju oblik. Takvo svojstvo se može primijetiti kroz prizmu agregatnih stanja gdje je jasno da čvrsta tijela i kapljevine imaju konstantan volumen, pritom kapljevine mogu mijenjati oblik dok plinovi nemaju niti konstantan volumen niti oblik. Očito je da konstantnost volumena omogućuje nestišljivost, no pitanje jest zašto je ona toliko važna. Nestišljivost fluida odnosno hidrauličkog ulja u ovom slučaju znači da fluid ima sposobnost prenošenja sile. Kada biciklist pritisne ručice kočnice, tada vrši silu na hidrauličko ulje koje se nalazi u cilindru u ručki volana te ga potiskuje niz cijev do kućišta kočnice gdje ono pritišće čeljusti s obje strane i tako približava kočione pakne prema disku dok ne ostvare silu trenja. Navedeni princip je puno bolje razumljiv ukoliko se prikaže slikom (4.28.):



*Slika 4.22. Princip rada hidrauličke disk kočnice [18]*

Fizički gledano, hidraulička kočnica se može podijeliti na dva dijela. Dio koji se nalazi kod cilindra unutar volana i dio kod same kočnice. Kao što je vidljivo na gornjoj slici, spremnik hidrauličkog ulja se nalazi iznad cilindra te se kroz njega istače staro ulje. Ispod se nalazi glavni jednoradni cilindar koji je monostabilan što znači da vrši funkciju samo u jednom smjeru, a u početni položaj ga vraća torzijska opruga koja je montirana unutar cilindra. S desne strane cilindra se nalazi aktivacijska ručica koja, kada se pritisne, aktivira kočnicu. Ručica kočnice koju pritišće biciklist je ta koja je povezana na aktivacijsku ručicu i pritom ju gurne prema cilindru. U tom trenutku klipnjača cilindra vrši silu na hidrauličko ulje koje zatim prenosi tu silu preko hidrauličke cijevi do kućišta kočnice. Zatim se sila prenosi na čeljusti kočnice koje se mogu isključivo translirati prema disku ili od njega. Kako ih ulje tlači određenom silom, one se gibaju prema disku i time guraju kočione pakne koje se nalaze između čeljusti i diska sve dok se ne ostvari sila trenja između pakni i diska. Također, vrlo važno i očito svojstvo takvog principa kočenja je da fluid prenosi silu u trajanju djelovanja vanjske sile bez negativnih popratnih pojava, što znači da tek kada biciklist popusti ručice, opruga vraća klipnjaču u početni položaj i kočione pakne se odmiču. Sljedeća slika (4.29.) prikazuje kočioni sustav u trenutku kočenja gdje se može vidjeti nestišljivost fluida na djelu:



*Slika 4.23. Hidraulički sustav za vrijeme kočenja [18]*

Još jedan važan detalj u konstrukciji čitavog sustava je mogućnost konstantne sile kočenja što je osigurano spremnikom za ulje koji ima dva ulaza u cilindar. Kako se kočione pakne troše s vremenom, čeljusti kočnica trebaju prijeći dulji put kako si se ostvarila ista sila kočenja što podrazumijeva više ulja u sistemu koje se kompenzira i dobavlja iz spremnika iznad cilindra kako bi efikasno kočenje bilo konstantno osigurano.

#### Kočiono ulje i odzračivanje kočnica

Više puta spomenuto kočiono ulje zahtjeva svoju dozu pažnje pošto nije nimalo svejedno kakvo ulje se nalazi u sustavu. Na prvi pogled bi se moglo reći kako bilo kakav nestišljiv fluid dolazi u obzir, no to nije jedino potrebno svojstvo hidrauličkog medija. Nikako se ne smije dopustiti da ulje bude previše gusto, rijetko ili jako male viskoznosti. Također ne smije mijenjati svojstva povećanjem temperature koja je neizbježna ili jednostavno prolaskom vremena. Možda ne tako očito svojstvo jest hidrofobnost koje je potrebno osigurati kako se ne bi ulje miješalo s vodom.

Problematika leži u tome kako odabrati adekvatno ulje koje zadovoljava sve navedene uvjete odnosno sva navedena svojstva. Mnoga ulja se kemijski obrađuju i modificiraju im se svojstva ne bi li se postigla ona željena te na taj način se dobije ulje prilagođeno konkretnim uvjetima. Kod biciklističkih hidrauličkih kočnica se koriste dvije vrste ulja:

1. Mineralno ulje
2. DOT tekućina

Svaka vrsta ulja je strogo propisana od strane proizvođača te se mora ispoštovati kako bi se osigurala sigurnost i dugotrajnost kočnica.

#### Mineralno ulje

Mineralno ulje je većinom korištena vrsta ulja u kočionom sustavu zbog zadovoljavanja mnoštva uvjeta i vijeka trajanja. Ovisno o učestalosti vožnje, dovoljno ga je mijenjati jednom svake dvije godine. Ono ima hidrofobna svojstva što znači da se ne miješa s vodom. To znači da je omogućeno odzračivanje ( vađanje nastalih mjehurića zraka ili vodene pare u sustavu ) te jednom nakon što se boca s uljem otvori, nema problema s kontaminacijom i skladištenjem. Nedostatak hidrofobnosti mineralnog ulja je ta što ukoliko voda dospije u sustav, temperatura isparavanja, koja je inače preko 200°C, se snižava na temperaturu isparavanja vode te kako se zbog trenja generira toplina, voda počinje isparavati što stvara neželjene mjehuriće pare. U nastavku je dana tablica (4.1.) koja detaljnije prikazuje svojstva, prednosti i mane mineralnog ulja:

*Tablica 4.1. Prednosti i mane korištenja mineralnog ulja*

<b>Prednosti:</b>	<b>Mane:</b>
Visoka temperatura isparavanja	Cijena
Jednostavno uklanjanje mrlja	dostupnost
hidrofobnost	hidrofobnost
Dugi vijek trajanja	Nepostojanje standarda

## DOT tekućina

DOT tekućina je pored mineralnog ulja široko upotrebljavana kočiona tekućina u automobilske industriji, ali i u biciklističkoj. Očituje se svojom poli-glikolnom bazom uz koju se miješaju razni sastojci dajući joj konačna potrebna svojstva. Dodavanje sastojaka je opravdano razlogom poboljšanja svojstava u nekoliko aspekata od kojih su najvažniji podmazivanje, inhibicija za sprječavanje oksidacije i korozije te viskoznost i temperatura isparavanja koji moraju biti gotovo pa konstantnih vrijednosti. Još jedna razlika u odnosu na mineralno ulje je ta što je podvrgnuta striktnim pravilima upotrebe i standardima zbog sigurnosnih razloga te zahtjevnijeg održavanja. Također, u tablici (4.2.) ispod je dan detaljniji uvid prednosti i mana DOT tekućine:

*Tablica 4.2. Prednosti i mane korištenja DOT tekućine*

<b>Prednosti:</b>	<b>Mane:</b>
Visoka temperatura isparavanja	nagrizajuće
Niska cijena	Hidrofilna svojstva
standardizirano	Kratak vijek trajanja

Kao i kod ostalih dijelova i načina izrade kočnica, gdje god postoji više od jednog konstrukcijskog rješenja, ne postoji ono apsolutno ispravno već treba odvagati i pronaći najbolje rješenje za specifični problem.

### 4.2.3. Geometrija kočionih pakni

Površina kočionih pakni je, dakako, važan aspekt efikasnosti kočnica jer što je ona veća, bit će i veća površina na kojoj se stvara sila trenja, no to ne znači da je geometrija odnosno oblik irelevantan. Većina njih je istoga oblika, ali postoje i drugačije izvedbe.

Pravokutni izduženi oblik kočionih pakni dominira disk kočnicama jer ima visoku efikasnost odnosno efektivna površina kočenja je velika. Takve izvedbe imaju po jednu čeljust sa svake

strane koje guraju pakne i pritišću disk. Druga česta vrsta izvedbe je okruglog oblika. Također se nalazi po jedna čeljust i pakna sa svake strane, ali je površina pakne krug te se može izračunati površina znajući isključivo promjer što je vrlo bitno radi izračuna tlaka na disk dok je za pravokutni oblik pakne potrebno poznavati duljinu i visinu pakne. Na slici (4.32.) ispod je vidljiv spektar različitih oblika površina pakni koje se koriste kod hidrauličkih disk kočnica.



*Slika 4.24. Različiti oblici kočionih pakni [19]*

Važno je naglasiti da nisu svi oblici kočionih pakni kompatibilni sa svakom izvedbom geometrije diska već su neki više zastupljeniji od drugih. To ovisi o koncentraciji površine na tarnom dijelu diska odnosno o rasporedu rupica za hlađenje diska. Ukoliko su rupice postavljene kao uzdužni rezovi tada kompatibilnost s raznim vrstama pakni raste, ali ako su rupe postavljene radijalno onda je poželjniji izduženiji oblik pakni. Tome je tako jer kontaktna površina između diska i pakni mora u svakom trenutku kočenja biti što veća, a kako disk ima rupe za hlađenje, ta površina varira od minimalne do maksimalne vrijednosti. Stoga je potrebno paziti na omjere površine pakni i kontaktne površine s diskom te sukladno tome odabrati najbolje rješenje, a ono se ostvaruje kada je prosječna kontaktna površina po obodu diska s paknom najveća.

#### 4.2.4. Materijal i otpornost kočionih pakni

Uzevši u obzir da sila trenja između diska i kočionih pakni izaziva trošenje materijala, samouvjerenost u trošenje materijala pakni, a ne diska, omogućuje spoznaja da je napravljen od mekšeg materijala nego disk. Logika leži u ekonomičnosti jer je znatno lakše i jeftinije zamijeniti kočionu paknu nego čitav disk. Stoga se raspolaže s materijalima mekšim od nehrđajućeg čelika od kojih se ističu dvije dominantne skupine:

1. Sinterirane metalne kočione pakne
2. Organske kočione pakne

Sinterirane metalne kočione pakne su načinjene od sitnih metalnih čestica koje su međusobno prešane te u pravilu imaju veliku otpornost. Mekoća materijala pakni u odnosu na materijal diska ne smije zavarati mišlju da je on objektivno mekan. Težnja ka što većoj otpornosti na trošenje itekako postoji. Ona je jedna od vrlina sinteriranih metalnih pakni. Izvrsno podnose ekstremne uvjete vožnje što podrazumijeva dugačke nizbrdice te dugotrajno kočenje gdje se generiraju visoke temperature. Iako im je potrebno određeno vrijeme zagrijavanja prije nego što postignu maksimalnu učinkovitost, te su za to vrijeme relativno bučne, kada je postignu, funkcioniraju briljantno. U ostalim ekstremnim uvjetima kao što su kiša, vlaga i mulj također uspijevaju zadržati svoju iznimnost te se shodno tome i koriste u takvim uvjetima. Kako niti jedan materijal nije savršenstvo bez mana, najveći nedostatak takvih pakni je veliko provođenje topline te prenošenje na kočnicu što u konačnici zagrijava kočiono ulje. Tome se da doskočiti koristeći tehnologiju o kojoj će biti riječ u sljedećem poglavlju.

Druga vodeća vrsta kočionih pakni su organske. Moglo bi se reći kako su one potpuna suprotnost sinteriranim metalnim paknama jer većina prednosti i mana su zamijenjene. One su najčešće sačinjene od gume, kevlar i silicijevog dioksida koji su međusobno povezani sa smolom. Zbog organskih sastojaka imaju tendenciju slabog provođenja topline što znači da u manjoj mjeri zagrijevaju kočiono ulje te se više topline zadržava na disku. Ali su zato sklonije manjoj otpornosti na trošenje te se upotrebljavaju više za ravničarski reljef zbog odsustva nizbrdica. Nije im potrebno vrijeme zagrijavanja već trenutno postižu maksimalnu snagu kočenja te su puno tiše u radu. Ekstremni uvjeti nisu na njihovoj strani jer zbog organskih

komponenti doživljavaju znatnije trošenje zbog vlage, mulja i kiše te tada dolazi do promjena svojstava materijala kao što su smanjena tvrdoća i otpornost na trošenje.

Kao i kod mnogih komponenti i elemenata kočionog sustava, nema apsolutnog materijala pobjednika već je riječ o različitim rješenjima koja odgovaraju različitim zadanim uvjetima.

Sljedeća tablica (4.3.) prikazuje usporedbu opisanih vrsta materijala:

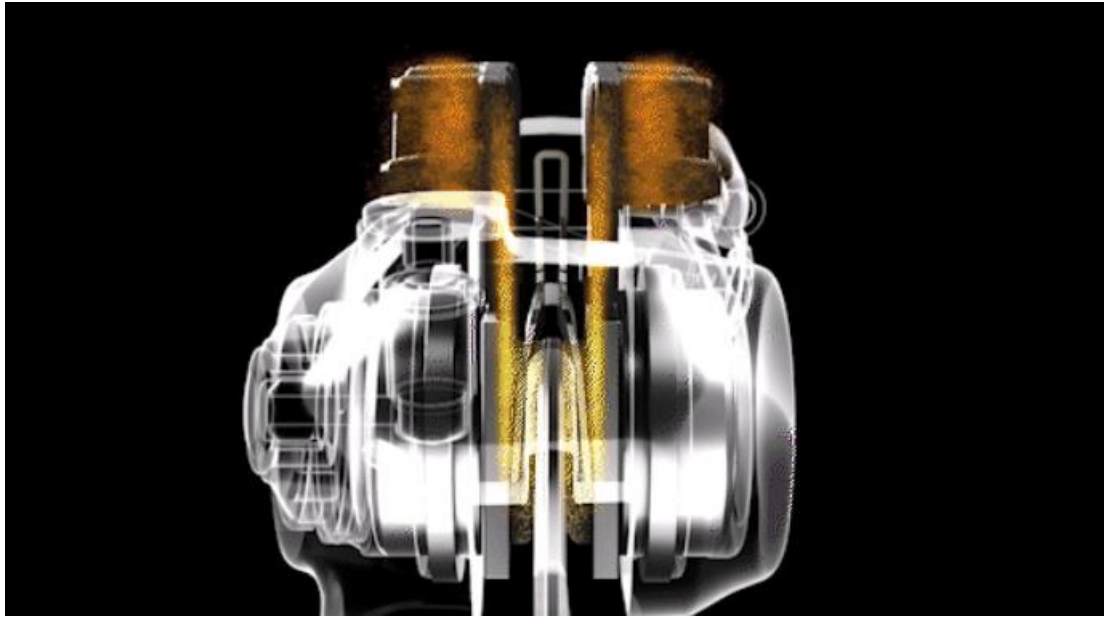
*Tablica 4.3. Usporedba dvaju promatranih materijala kočionih pakni*

<b>Organski materijal:</b>	<b>Metalni materijal:</b>
Prilagodljiva smjesa	Čvrsta smjesa
Tiši rad	dugovječnost
Kontrolirani rad kočenja	Velika snaga pri ekstremnim uvjetima
Dizajniran za suhe i mokre uvjete	Dizajniran za blatne i pješčane uvjete

#### 4.2.5. „Ice technology“ tehnologija odvođenja topline

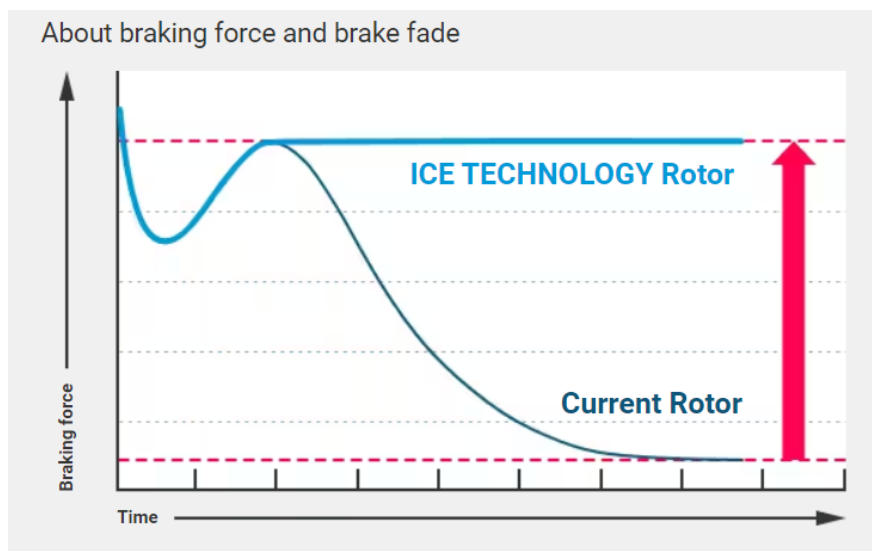
„Ice technology“ tehnologija odvođenja topline je dobila pažnju kada je bila riječ o sustavu odvođenja topline na disku. Međutim njezin značaj ne iščezava ondje već je prisutan i kod konstruiranja kočnice. Postoji nezamjenjivi dio na kočnici po kojem je navedena tehnologija prepoznatljiva, a to su aluminijska rebra postavljena na vrh obje pakne. Dvojaka uloga im se može pripisati od čega je prva znatno važnija, a to je odvođenje topline. Generiranje topline prilikom kočenja osim što zagrijava elemente kočionog sustava, zagrijava i okolni zrak konvekcijom koji ima svoj tok te ako se ne odvodi adekvatno rezultira višom radnom temperaturom kočnice. Ovdje se nadovezuje „Ice technology“ tehnologija koja usmjerava toplu zračnu struju kroz kočnicu te preko rebra je izbacuje van. Opisan princip je dan slikom (4.34.) u nastavku:



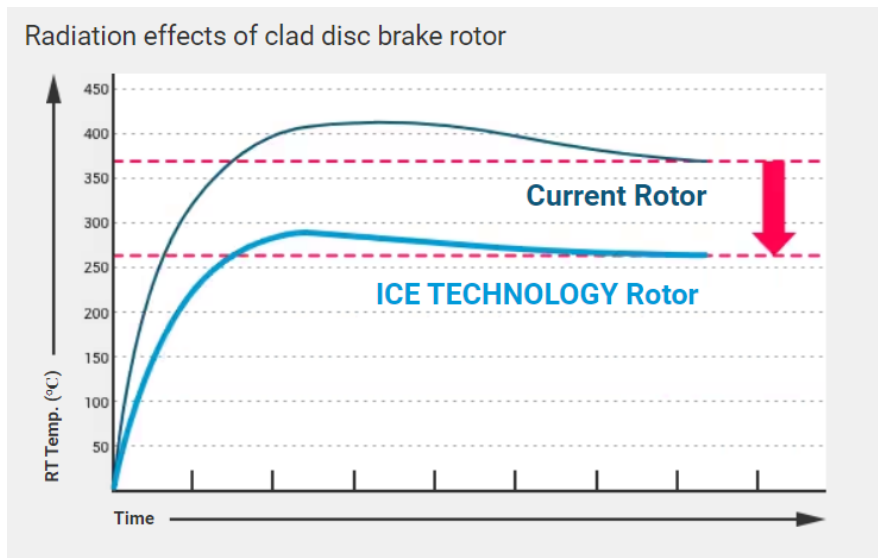


*Slika 4.25. Cirkulacija toplog zraka kroz kočnicu [20]*

Zbog višestruke povezanosti svih elemenata sustava, ovakav način odvođenja topline utječe na mnoge aspekte efikasnosti kočenja od kojih su najznačajniji niža temperatura rada što ide ruku pod ruku s organskim kočionim paknama jer one ne podnose visoke temperature. Također smanjuje trošenje pakni, omogućuje tiše i pouzdanije kočenje. Slike (4.35.) i (4.36.) ukazuju na prednosti „Ice technology“ tehnologije:



*Slika 4.26. Ovisnost sile kočenja i trošenja kočnica [20]*



Slika 4.27. Ovisnost temperature kočenja o proteklom vremenu [20]

Slika 4.35. ukazuje na superiornost „Ice technology“ tehnologije po pitanju trošenja kočnica ovisno o sili kočenja. Kod obje varijante je prisutan inicijalni pad u vremenu, ali plava krivulja potom postaje konstantna čineći znatan iskorak u odnosu na običnu izvedbu rotora i kočnice.

Drugi graf na slici 4.36. prikazuje porast temperature rotora u vremenu pri intenzivnom kočenju gdje promatrana tehnologija ostvaruje čak i do 100°C manje konačne temperature zbog prethodno navedenih konstrukcijskih razlika kako na disku koji je troslojne građe tako i na kočnici koja ima rebra za bolje odvođenje topline.

#### 4.2.6. Montaža kočnice na prednju vilicu

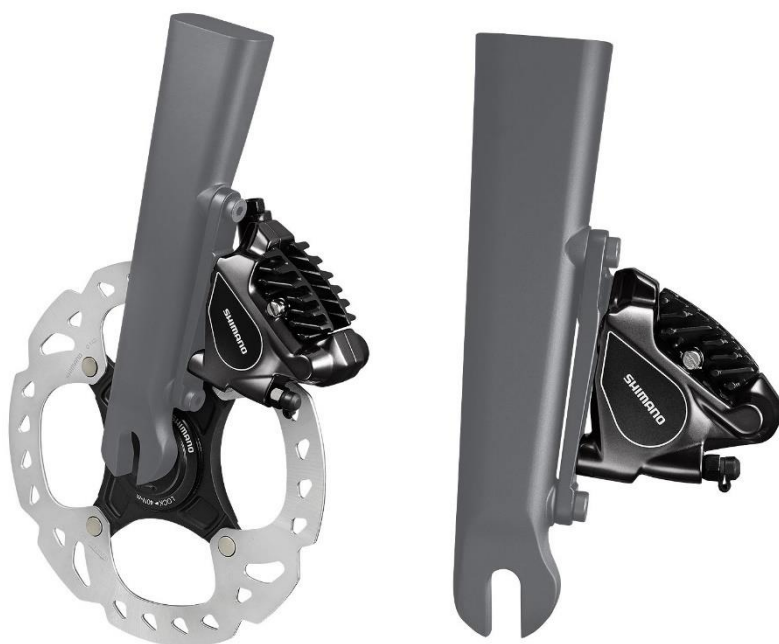
Nakon provedene konstrukcije kočnice slijedi njezina montaža na prednju vilicu. Postoji nekoliko vrsta montaže što se razlikuje od proizvođača do proizvođača te ovisi o geometriji same kočnice. Nije moguće bilo kakvu kočnicu montirati na bilo kakav način već to ovisi o izvedbi prihvata kućišta za vilicu te predviđenom međusobnom položaju diska i kočnice. Sukladno tome razlikujemo dva glavna načina montaže prikazana slikom (4.37.) ispod:



*Slika 4.28. Montaža prednje disk hidrauličke kočnice dodatnim nosačem [21]*

Prvi način je pomoću dodatnog nosača koji omogućuje potreban položaj diska i kočnice jer udaljava kočnicu od prednje vilice što namješta kočione pakne posred tarne površine diska. Ukoliko disk promatramo kao analogni sat, tada kočnica pritišće disk otprilike na petnaest do tri sata. Takva izvedba uključuje modifikaciju prednje vilice koja treba imati izdanke koji postavljaju kočnicu u pravilan položaj. Kako je prednja vilica na cestovnim biciklima gotovo uvijek izrađena od karbonskih vlakana, nužno je geometriju vilice prilagoditi izvedbi kočnice. Montažni vijci se stežu momentom koji iznosi otprilike 10 Nm te prolaze kroz izdanke na kočnici, kroz dodatni nosač te ulaze u karbonsku vilicu. Svi navedeni elementi imaju unutarnji navoj, a jedni od mnogih standardnih korištenih vijaka su M6 duljine 20 mm pa na više.

Drugi način montaže je pomoću ravnoga nosača. Time je jednostavnija izrada prednje vilice jer nema izbočenih dijelova već je ona plosnata sa stražnje strane kako bi se mogao umetnuti plosnati nosač na koji se također montažnim vijcima montira kočnica. Tada je ona pozicionirana tik uz vilicu te pakne pritišću disk znatno više od prethodnog načina montaže. U tom slučaju se koriste nešto kraći montažni vijci jer je ravni nosač ponešto tanji. Opisani način je prikazan sljedećom slikom (4.38.):



*Slika 4.29. Montaža prednje disk hidrauličke kočnice ravnim nosačem [22]*

Pomalo je irelevantno koji način montaže je bolji jer niti jedan od njih ne pruža znatno povećanje performansi bicikla, niti je jedan puno sigurniji od drugoga stoga on isključivo ovisi o odabiru dizajna kočionog sustava i geometrije bicikla. Aerodinamičnost je jedini plus za montažu ravnim nosačem što nije značajno u ovom slučaju. Međutim, ono što jest bitno je preciznost izrade montažnih nosača, podloge na prednjoj vilici, i kućišta kočnice. Tome je tako jer između diska i pakni vlada izrazito malo prostora te kako bi bio očuvan, preciznost izrade svakog dijela kočionog sustava je od presudne važnosti. Pod pojmom preciznost izrade ne smatram isključivo strojnu obradu svakog elementa nego i međusobne geometrijske točnosti diska i svakog dijela kočnice. U protivnom bi prostor između diska i kočionih pakni postao nejednolik po duljini pakne te bi u najgorem slučaju došlo do neželjenog trenja diska i pakni što bi rezultiralo njihovim nejednolikim mehaničkim trošenjem.

Kako je bila riječ o geometriji i konstrukciji čitavog bicikla te je izvedeni zaključak bio da dizajn mora biti takav da bude čim aerodinamičniji i čim lakši uz zadovoljene uvjete čvrstoće i funkcionalnosti, tako disk i kočnica isto prate navedene uvjete. Ukoliko se oni razmotre s drugog kuta gledišta, moglo bi se reći da dizajn ( i kočionog sustava i bicikla ) mora biti takav da umanjuje djelujuće sile na njih. Razjašnjen princip mehaničkog naprezanja na disku se može preslikati i na kočnicu te uvidjeti kako položaj kočnice iza prednje vilice navodi sile koje se javljaju tijekom kočenja da djeluju prema vilici te kočnica i njezini nosači nastoje tlačiti vilicu

stoga montažni vijci koji su shodno rečenom opterećeni tlačnom aksijalnom silom ne zahtijevaju zaseban proračun već se koriste iskustvom usvojeni standardni vijci. A ostali dijelovi unutar kočnice također uspješno izdržavaju djelujuće kočione sile zbog dobre međusobne prisnosti elemenata koja je omogućena kvalitetnim dizajnom i preciznom izradom.

## 5. RAZLIKE PREDNJE I STRAŽNJE HIDRAULIČKE DISK KOČNICE

Dosada provedena konstrukcija hidrauličkih disk kočnica se odnosila na prednju kočnicu. Tome je tako jer se konstrukcije prednje i stražnje kočnice uvelike isprepliću. Toliko jako da je prirodnije objasniti konstrukcijske i funkcionalne razlike nego zasebno provoditi njihovu konstrukciju. Naočigled, prva upečatljiva razlika je u mjestu montaže kočnice za okvir bicikla. Važno je ne pomiješati način montaže i mjesto montaže. Načini su identični uz male preinake u obliku nosača kako bi se pratila geometrija okvira, ali mjesto montaže je uvelike drugačije. Zbog šiljastog završetka okvira gdje je umetnuta stražnja osovina, logika nalaže da kočnica mora biti postavljena horizontalno tako da se montažni vijci stežu prema dolje. Ta logika je bazirana na raspoloživim mjestima za ugradnju te na osnovu djelovanja sila prilikom kočenja. Zbog rotacije diska prema naprijed, sile kočenja guraju kočnicu u okvir bicikla kako bi svi montažni dijelovi bili opterećeni tlačno. Radi lakše vizualizacije priložena slika (5.1.) prikazuje upravo to:



*Slika 5.1. Stražnja hidraulička disk kočnica cestovnog bicikla [23]*

Druga najvažnija razlika se odnosi na dinamiku vožnje i potrebne performanse kočnica. Naime, kada biciklist naglo počne kočiti kako je opisano u početku rada, pod uvjetom da koči jednoliko

prednjom i stražnjom kočnicom, znatno važnija je prednja kočnica zbog raspodjela masa. Iskustveno znamo kako stražnji kotač veoma brzo blokira ukoliko se jako pritisne kočnica i počne klizati po cesti umjesto da se kotrlja. Tome je tako jer ostatak bicikla odnosno masa koje su koncentrirane ispred njega vuku stražnji kotač koji nema jaku pritisnu silu na podlogu. S druge strane, prednji kotač je ispred svih masa koje su raspoređene na biciklu ( s tim da najveći udio mase otpada na biciklista ) te kada se njegova rotacija smanji, odnosno kada počnemo kočiti, zbog inercije sve mase iza kotača se nastoje i dalje gibati prema naprijed što rezultira zanošenjem bicikla, ili u najgorem slučaju, potpunom blokadom kotača, prebacivanjem bicikla preko kotača. To je ekstremni slučaj koji spada u nesigurno kočenje kada kotač počne klizati umjesto da se kotrlja, ali je odličan primjer razlike utjecaja kočenja prednjom kočnicom od kočenja stražnjom kočnicom na dinamiku gibanja bicikla.

Shodno navedenom prirodnom ponašanju gibajućeg bicikla moraju se napraviti konstrukcijske razlike u izvedbama prednje i stražnje kočnice jer je očito da nemaju isti efekt na zaustavljanje bicikla. Te razlike se uglavnom odnose na osnovne dimenzije diska kao što su vanjski i unutarnji promjeri. Smanjivanjem vanjskog promjera diska opada moment kočenja jer se pod djelovanjem iste sile smanjio krak ( što predstavlja udaljenost od centra diska do sredine kočione površine ) odnosno polumjer diska. Sukladno tome opada i snaga kočenja jer ona ovisi o brzini zaustavljanja, a što je manji moment to je više vremena potrebno biciklu do potpunog zaustavljanja. Zato standardni vanjski promjer stražnjeg diska najčešće iznosi 140 mm, ukoliko je na prednjem kotaču montiran onaj promjera 160 mm.

## 6. ZAKLJUČAK

Provedenom analizom i opisom konstrukcije hidrauličkih disk kočnica na cestovnom biciklu obasjavaju se fundamentalni principi načina razmišljanja u inženjerstvu što zahtjeva ravnotežu između kreativnosti, konzistentnosti i stručnosti. Isključivo takvom kombinacijom je moguće osmisliti optimalno rješenje što je ultimativni cilj procesa konstruiranja i invencije. Moglo bi se reći kako taj proces opisuje mnoštvo međusobno zavisnih faktora i prirodnih zakona koje konstruktor mora razumjeti i neprestano prilagođavati dok se ne postigne dovoljno dobro rješenje. Kako se vidi iz provedene konstrukcije, proces konstruiranja nije putovanje s jednim mogućim ciljem već čitavo polje mogućnosti od kojih optimalno rješenje podrazumijeva zadovoljavanje čim više početnih uvjeta u što boljoj mjeri. Time je jasno ukazana jedinstvenost pojedinog procesa konstruiranja što zahtijeva sposobnost inovacije i improvizacije u konstruktora. Konkretni primjer jasno potvrđuje iznesene zaključke jer kako ne postoji univerzalna hidraulička kočnica, potrebno je konstantno dirigitirati početnim uvjetima, utjecajnim faktorima te prateći prirodne zakone dinamike, ponašanja materijala, čvrstoće, matematike i mnogih drugih područja osmisliti jedinstvenu funkcionalnu cjelinu kod koje ćemo imati na umu međusobne ovisnosti pojedinih elemenata i komponenti.

Time možemo zaključiti kako se većina pažnje pridaje snazi kočenja kao najvažnijoj karakteristici koja najvećim dijelom ovisi o promjeru diska (što je veći to je veća snaga kočenja), kontaktnoj površini kočione pakne i diska što se odnosi na geometrijske karakteristike. Nehrđajući čelik, aluminij, titanij ili pak karbonska vlakna dolaze u obzir kao utjecajni faktori snage s aspekta materijala izrade koji moraju precizno zadovoljiti uvjete čvrstoće, krutosti i izdržljivosti kako bi bila osigurana pouzdanost i trajnost kočnica. Kombinacija geometrije i materijala izrade pri kočenju rezultira nevidljivim termičkim efektima koji se nastoje umanjiti upravo istim faktorima koji ih stvaraju, a to su geometrija i materijali izrade gdje prevladava spiralno elegantna geometrija blagih prijelaza zbog smanjenja sila te od materijala aluminij i nehrđajući čelik (navedeni materijali se odnose na izradu disk rotora). Troslojna građa diska navedenim materijalima te rebrasta struktura izlaznog dijela kočionih pakni je zavladao kao optimalno rješenje odvođenja topline kroz kočioni sustav. Na svjetlo dana time izlazi višestruka zavisnost svih gradivnih elemenata koji utječu na snagu i trajnost kočnica. Ostali neizostavni zaključci se odnose na vječna zlatna pravila aerodinamičnosti i mase elemenata gdje aerodinamičnost mora biti što veća, a masa što manja.



Postavljanje kočnice iza prednje vilice te njezina trokutasta geometrija omogućuje prvi uvjet, a drugi omogućuje razvijenost inženjerstva materijala, izrade čvrstih vlakana raznih vrsta od kojih se izrađuju kočnice ili čak i diskovi. Ograničenje smanjivanja mase leži u uvjetima čvrstoće, krutosti i izdržljivosti materijala kako pod utjecajem mehaničkog tako i pod utjecajem termičkog naprezanja.

Ostali utjecajni faktori se odnose na hidrauličko ulje i njegova svojstva koja moraju biti čim više postojana te na preciznost strojne izrade pojedinih elemenata i međusobne geometrijske točnosti. Prije bi ponestalo riječi nego što bi popis zaključaka o načinu izrade i raznih konstrukcijskih rješenja bio gotov jer uvijek postoji više od jednog valjanog konstrukcijskog rješenja što je još jedno zlatno pravilo u konstruiranju.

Ali ono što se može naglasiti je važnost principa prilikom svakog načina izvedbe. Iz dobivenih rezultata i opisanih procesa konstruiranja se može zaključiti kako se sigurnost nikada ne smije kompromitirati. Zato svaki proračunati element, svaki korak u procesu izrade mora imati uračunat faktor nepredvidivosti (u proračunu poznat kao faktor sigurnosti) kako bi konačna konstrukcija bila besprijekorno funkcionalna i pouzdana pri predviđenim uvjetima rada, a dovoljno izdržljiva pri nepredviđenim okolnostima. Svaki odabrani materijal, svaki odabrani element, osmišljeni dizajn i princip rada mora podlijegati takvom uvjetu.

Zaključno, kako je izneseno u uvodu i sažeto tijekom zaključka, hidrauličke disk kočnice na cestovnom biciklu su izvrstan primjer balansiranja višestrukosti konstrukcijskih rješenja, geometrije, nauke o čvrstoći, inženjerstva materijala, matematike, dinamike i termodinamike što je objedinjeno multidisciplinarnim područjem konstruiranja.

## 7. LITERATURA

- [1] Cyclists hub.com.: „What Is a Road Bike? Pros & Cons Explained”, s interneta,  
<https://www.cyclistshub.com/what-is-a-road-bike/>, 30.08.2024.
- [2] We Love Cycling.: „What’s the Best Bike Frame for Ultra-Distance Cycling”, s interneta,  
<https://www.welovecycling.com/wide/2017/08/29/whats-best-bike-frame-ultra-distance-cycling/>, 30.08.2024.
- [3] Bianchi.: „Racing Oltre Comp”, s interneta,  
<https://www.bianchi.com/bikes/bikes/road/racing-road/oltre/>, 30.08.2024.
- [4] Shimano Road.: „For those who never compromise”, s interneta,  
<https://road.shimano.com/dura-ace/#components>, 30.08.2024.
- [5] Shimano, s interneta,  
<https://bike.shimano.com/en-AU/product/component/duraace-9000/CS-9000.html>,  
30.08.2024.
- [6] bike radar.: „Bike cassettes explained”, s interneta,  
<https://www.bikeradar.com/advice/workshop/bike-cassettes>, 30.08.2024.
- [7] River city bicycles., s interneta,  
<https://www.rivercitybicycles.com/product/sram-mth-716-front-hub-227406-1.htm>,  
30.08.2024.
- [8] ICAN.: „6 Bolt Disc Rotors vs. Centerlock Disc Brake Rotors”, s interneta,  
<https://icancycling.com/blogs/articles/6-bolt-disc-rotors-vs-centerlock-disc-brake-rotors>,  
30.08.2024.
- [9] Prime bike components, s interneta,  
<https://primebikecomponents.com/products/lightweight-road-thru-axle>, 30.08.2024.

[10] Naveed, Nida.; Whitford, Michael.; “Design Analysis of Bicycle Brake Disc for Carbon Fibre - Lightweight Material”, The International Journal of Integrated Engineering, No. 8, 20, University of Sunderland, St Peters Campus, St Peters Way, Sunderland, SR6 0DD, UK, 2019.

[11] Research Gate.: „Microstructure of AISI 410 stainless steel”, s interneta,

[https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-AISI-410-stainless-steel-Vilellas-etching\\_fig3\\_256913755](https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-AISI-410-stainless-steel-Vilellas-etching_fig3_256913755), 30.08.2024.

[12] Research Gate.: „The initial microstructure of the as-received Ti-6Al-4V alloy bar ”, s interneta,

[https://www.researchgate.net/figure/The-initial-microstructure-of-the-as-received-Ti-6Al-4V-alloy-bar\\_fig1\\_273517414](https://www.researchgate.net/figure/The-initial-microstructure-of-the-as-received-Ti-6Al-4V-alloy-bar_fig1_273517414), 30.08.2024.

[13] Research Gate.: „Microstructure of carbon-fibre epoxy composite”, s interneta,

[https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-carbon-fibre-epoxy-composite\\_fig3\\_225357421](https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-carbon-fibre-epoxy-composite_fig3_225357421), 30.08.2024.

[14] Accu components.: “Metric Thread Chart For Metric Bolt Sizes.”, s interneta,

<https://www.accu.co.uk/p/117-iso-metric-thread-dimensions>, 29.08.2024.

[15] Konstrukcijski elementi I; predavanje – vijčani spojevi, 2023.

[16] Shimano.: „ICE TECHNOLOGIES FREZZA”, s interneta,

<https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies-freeza.html>, 30.08.2024.

[17] Alibaba, s interneta,

[https://www.alibaba.com/product-detail/Low-Price-Aluminum-Bike-Parts-Type\\_62297695924.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Low-Price-Aluminum-Bike-Parts-Type_62297695924.html), 30.08.2024.

[18] Wikipedia.: „Hydraulic brake”, s interneta,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_brake](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_brake), 30.08.2024.

[19] Bike Roar.: „Choosing the best MTB disc brake pads”, s interneta,

<https://www.bikeroar.com/tips/choosing-the-best-mtb-disc-brake-pads>, 30.08.2024.

[20] Shimano.: „ICE TECHNOLOGIES”, s interneta,

<https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies.html>, 30.08.2024.

[21] Walmart.: „Bike Disc Brake Caliper Adapter Flat Mount to Post Mount Bicycle Accessories”, s interneta,

<https://bikerumor.com/first-look-shimano-flat-mount-hydraulic-road-disc-brakes-debut-new-11-speed-105-level-hydro-shifter-more/>, 30.08.2024.

[22] Bike Rumor.: „First Look – Shimano Flat Mount hydraulic road disc brakes debut, new 11-speed 105 Level hydro shifter & more!”, s interneta,

<https://bikerumor.com/first-look-shimano-flat-mount-hydraulic-road-disc-brakes-debut-new-11-speed-105-level-hydro-shifter-more/>, 30.08.2024.

[23] Cycling magazine.: „First Ride: Shimano Dura-Ace R9100 hydraulic disc brakes”, s interneta,

<https://cyclingmagazine.ca/sections/gear-reviews/components/shimano-dura-ace-r9100-hydraulic-disc-brakes/>, 30.08.2024.

[24] Katavić, Ivan.; “Uvod u materijale“, Fintrade & Tours, Rijeka, 2008.

[25] Brnić, Josip.; Turkalj, Goran.; “Nauka o čvrstoći 2”, Zigo, Rijeka, 2006.

[26] F.I.V. Edoardo Bianchi S.p.A.: “Technical Book 2021 Collection - Bianchi”, s interneta, [https://www.bianchi.com/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalBook\\_EuropeCollection.pdf](https://www.bianchi.com/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalBook_EuropeCollection.pdf), 12.08.2024.

[27] Carpenter Technology Corporation.: “Titanium Alloy Ti 6Al-4V”, s interneta, <https://www.carpentertechnology.com/hubfs/7407324/Material%20Safety%20Data%20Sheet%20Ti%206Al-4V.pdf>, 12.08.2024.

[28] MakeItFrom.com.: “AISI 410 (S41000) Stainless Steel”, s interneta, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-410-S41000-Stainless-Steel>, 12.08.2024.

[29] T. J. Mackin et al., (2002). Thermal cracking in disc brakes, Engineering Failure Analysis, vol. 9, no. 1, pp. 63 76.

## 8. POPIS SLIKA

<i>Slika 3.1. Vrste cestovnih bicikala .....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3.2. Razlika u geometriji „endurance“ i „racing (aero)“ vrste bicikla.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 3.3. Bianchi Oltre comp s trkaćom geometrijom.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 3.4. Pogonski sustav cestovnog bicikla .....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 3.5. Lančanici stražnje kazete.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 3.6. Prikaz stražnje kazete odozgo.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 3.7. Glavčina prednjeg kotača.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 3.8. Razlika montaže pomoću šest vijaka i centralnog zaključavanja.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 3.9. Prolazna osovina prednjeg kotača .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 4.1. 3D model diska hidrauličke kočnice na cestovnom biciklu.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 4.2. Izometrijski prikaz diska.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 4.3. Dimenzije unutarnjeg dijela diska.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 4.4. Dimenzije tarne površine diska .....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 4.5. Dimenzije ploha za odvođenje topline.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 4.6. Mehanička i termička svojstva tri promatrana materijala .....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 4.7. Mikrostruktura nehrđajućeg čelika .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 4.8. Mikrostruktura legure titana Ti-6Al-4V .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 4.9. Mikrostruktura karbonskih vlakana .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 4.10. Prikaz fizikalnih svojstava diska.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 4.11. Poprečni presjek zakovice .....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 4.12. Konačne dimenzije zakovice.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 4.13. Skica sila u vijku kada je osigurana samokočnost vijčanog spoja.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 4.14. Rezultati mehaničkog naprezanja prva tri dizajna.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.15. Rezultati mehaničkog naprezanja druga tri dizajna.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.16. Rezultati termičkog naprezanja prva tri dizajna .....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 4.17. Rezultati termičkog naprezanja druga tri dizajna.....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 4.18. Krivulja hlađenja diska nakon intenzivnog kočenja.....</i>	<i>50</i>

<i>Slika 4.19. Trodijelna građa tarne plohe diska .....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.20. Usporedba redukcije topline u različitim tehnologija izrade diska .....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 4.21. Osnovni dijelovi hidrauličke kočnice .....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 4.22. Princip rada hidrauličke disk kočnice.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 4.23. Hidraulički sustav za vrijeme kočenja.....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 4.24. Različiti oblici kočionih pakni .....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 4.25. Cirkulacija toplog zraka kroz kočnicu.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 4.26. Ovisnost sile kočenja i trošenja kočnica.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 4.27. Ovisnost temperature kočenja o proteklom vremenu .....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 4.28. Montaža prednje disk hidrauličke kočnice dodatnim nosačem .....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 4.29. Montaža prednje disk hidrauličke kočnice ravnim nosačem.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 5.1. Stražnja hidraulička disk kočnica cestovnog bicikla.....</i>	<i>70</i>

## **9. POPIS TABLICA**

<i>Tablica 4.1. Prednosti i mane korištenja mineralnog ulja.....</i>	<i>60</i>
<i>Tablica 4.2. Prednosti i mane korištenja DOT tekućine .....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 4.3. Usporedba dvaju promatranih materijala kočionih pakni.....</i>	<i>64</i>

## 10. SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je bio provesti konstrukciju hidrauličke disk kočnice na cestovnom biciklu. Kako je ona kompleksna i tehnološki napredna konstrukcija bilo je potrebno uzeti u obzir mnogo aspekata tehničkih znanosti i parametara kako bi se ispravno odredili ulazni podaci za proračun kao što su npr. brzina gibanja, ukupna masa, vrijeme zaustavljanja i faktori trenja. Znajući te parametre kao i uvjete kojima je izložena kočnica proveden je proračun ključnih dijelova i opis konstruiranja čime su dobiveni rezultati prihvatljivih dimenzija, materijala izrade kao i njihovih svojstava te ostalih karakteristika. Rezultati idu u prilog tomu da je optimalno rješenje kočnica vrlo male mase, aerodinamičnog izgleda, visoke čvrstoće i krutosti koja ima veliku sposobnost odvođenja topline. Takve uvjete zadovoljavaju M5 montažni vijci, zakovice od nehrđajućeg čelika promjera 2,4 mm, disk vanjskog promjera 160 mm i debljine 1,5 mm izrađen od jednog aluminijskog sloja i dva sloja nehrđajućeg čelika. Drugi vitalan aspekt konstruiranja kočionog sustava su oblik i dizajn koji čim više nastoje smanjiti djelujuće sile na disk i kočnicu pametnom geometrijom, odabirom materijala i sustavom odvođenja topline. Kako bi bio zadovoljen što veći broj utjecajnih faktora uzima se u obzir dinamika gibanja i kočenja što ukazuje na važnost prednje kočnice povrh stražnje te utječe na njezine dimenzije i snagu. Ovi i svi ostali rezultati potvrđuju zagovaran obim procesa konstruiranja hidrauličkih disk kočnica te dokazuju velik broj različitih konstrukcijskih rješenja.

**Ključne riječi:** hidraulička disk kočnica, disk rotor, geometrija diska, geometrija kočnice, izrada 3D modela disk rotora, odvođenje topline



## 10. SUMMARY

The goal of this final thesis was to construct a hydraulic disc brake system on a road bike. As it is a complex and technologically advanced system it was crucial to consider plenty of technical aspects as well as relevant factors for proper estimation of beginning variables such as velocity, total mass, stopping time and friction factors. Knowing such factors and other driving conditions it was possible to make a calculation of the key elements and the description of all of them. In doing so, the results of optimal dimensions, best materials and their properties were gotten. They speak for themselves showing the best possible solution for a hydraulic disc brake construction which is a brake with the lowest possible mass, aerodynamic shape and high strength as well as the stiffness altogether with high degree of heat dissipation. In such conditions M5 bolts are commonly used for disc mounting, stainless steel rivets with diameter of 2,4 mm have shown to be more than enough to withstand the stress, Main disc dimensions are 160 mm which is the outer diameter and 1,5 mm of thickness made out of middle aluminium layer and two thicker stainless steel layers. Another vital aspect of construction is the geometry that needs to be made in such a way to minimize the inevitable forces acting upon it. Materials and heat dissipating system are also able to minimize them. For further precision of calculations, even more factors need to be considered. Dynamics is one of the most important ones that shows the importance of front brake over the rear which dictates the difference in disc dimensions as well as the power on the rear brake. These and all other results strongly indicate the complexity of constructing hydraulic disc brakes on a road bike and show the variety of different optimal solutions.

**Key words:** hydraulic disc brake, disc rotor, disc geometry, brake geometry, making of 3D disc digital model, heat dissipation