

Materijali i zahtjevi za elemente ispušnog sustava motornih vozila

Samac, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:994175>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Samac

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Ivan Samac

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr. sc. Suzani Jakovljević na strpljenju, vodstvu i korisnim savjetima, laborantu Ivanu Vovku na pomoći pri ispitivanju te asistentu Matiji Živoderu na pomoći i korisnim savjetima.

Također se zahvaljujem servisu za ispušne sustave – Auspuh ISAP i vlasniku Borisu Milinkoviću na pomoći i što su mi izašli u susret prilikom izrade ovog rada i u nabavci ispitnog uzorka.

Zahvaljujem se i tvrtki Janser d.o.o., vlasniku Ismetu Turkoviću i kolegi strojarskom tehničaru Nusretu Turkoviću.

Najviše se zahvaljujem svome ocu, majci i bratu na kontinuiranoj pomoći i podršci.

Ivan Samac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Samac**

JMBAG: **0035228863**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Materijali i zahtjevi za elemente ispušnog sustava motornih vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Materials and requirements for elements of the exhaust system of motor vehicles**

Opis zadatka:

Današnje društvo je nezamislivo bez bilo kakvog oblika transporta, cestovnog, zračnog, željezničkog ili pomorskog. Vozilo kategorije M1 je proizvod koji povezuje mnoga znanja inženjera strojarstva, od izbora materijala, konstrukcije, razvoja, plana i provođenja proizvodnje do same isporuke vozila. Motori s unutarnjim izgaranjem jedan su od glavnih pokretača modernog industrijskog društva. Oni pripadaju grupi toplinskih strojeva, jer pretvaraju kemijsku energiju sadržanu u gorivu u toplinsku energiju, koja se zatim pretvara u koristan mehanički rad. Glavni zadatak ispušnog sustava je odvesti produkte izgaranja iz komore za izgaranje u okoliš.

U radu je potrebno:

- 1) Opisati ispušni sustav motornog vozila.
- 2) Opisati i prikazati konstrukcije pojedinih elemenata ispušnog sustava.
- 3) Istražiti koji se materijali najviše koriste za izradu pojedinih elemenata ispušnog sustava motornog vozila.
- 4) Na odabranom uzorku elementa ispušnog sustava provesti karakterizaciju materijala.
- 5) Navesti najčešće uzroke oštećenja kod elemenata ispušnog sustava.
- 6) Analizirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datum obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Suzana Jakovljević
prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

Damir Godec
prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. OPIS ISPUŠNOG SUSTAVA.....	2
2.1. Uloga i značaj ispušnog sustava	2
2.2. Dijelovi (komponente) ispušnog sustava	3
2.2.1. Ispušna grana	3
2.2.1.1. Uloga ispušne grane	4
2.2.1.2. Podjela ispušne grane	4
2.2.2. Katalizator	8
2.2.2.1. Konstrukcija katalizaotra.....	8
2.2.2.2. Kemijske reakcije u katalizatoru.....	9
2.2.3. Prednji ispušni lonac (rezonator)	10
2.2.3.1. Uloga rezonatora	10
2.2.3.2. Konstrukcija rezonatora.....	11
2.2.3.3. Materijali korišteni u rezonatoru.....	11
2.2.4. Lambda sonda.....	11
2.2.4.1. Uloga lambda sonde	12
2.2.4.2. Materijali i konstrukcija lambda sonde	13
2.2.4.3. Vrste reakcije koje se odvijaju	14
2.2.5. Ispušni lonac	15
2.2.5.1. Konstrukcija ispušnog lonca	15
2.2.5.2. Vrste ispušnog lonca	17
2.2.5.3. Materijali	20
3. Zakoni i norme	22
3.1. Emisijske norme	22
3.2. Propisi za buku	23
4. Uzroci oštećenja elemenata ispušnog sustava	24
4.1. Korozija.....	24
4.2. Trošenje.....	25
4.2.1. Uzroci trošenje.....	25
4.2.1.1. Područja najosjetljivija na trošenje	26
4.2.1.2. Posljedice trošenje.....	26
4.2.1.3. Preventivne mjere	26
4.2.2. Utjecaj topline na dijelove ispušnog sustava.....	27
4.2.2.1. Utjecaj visokih temperatura.....	27
4.2.2.2. Toplinska oksidacija i degradacija materijala.....	27

4.2.2.3. Termomehaničko umaranje	27
5. Eksperimentalni dio	28
5.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	28
5.2. Provedba eksperimenta	28
5.2.1. Izrezivanje uzorka.....	28
5.2.2. Priprema uzorka.....	28
5.2.3. Analiza mikrostrukture.....	29
5.2.4. Mjerenje tvrdoće.....	31
6. Zaključak	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI	39

POPIS SLIKA

Slika 1.	Ispušni sustav [3].....	2
Slika 2.	Konstrukcija ispušne grane sa kratkim i dugim cijevima [7]	5
Slika 3.	Konfiguracija ispušne grane za I4 motore [13].....	7
Slika 4.	Katalizator [4]	8
Slika 5.	Rezonator [19].....	10
Slika 6.	Materijali i konstrukcija lambda sonde [4].....	14
Slika 7.	Uloga lambda sonde [22].....	16
Slika 8.	Ispušni lonac [23].....	16
Slika 9.	Kombinirani refleskno-apsorbirajući ispušni lonac [4].....	20
Slika 10.	Opća korozija katalizatora [34].....	25
Slika 11.	Ispitni uzoraki, Mjesto rezanja i stroj Mecatome T260.....	28
Slika 12.	Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250 - Presi.....	29
Slika 13.	Mikroskop Olympus GX51	30
Slika 14.	Povećanje 500x	30
Slika 15.	Povećanje 1000x	31
Slika 16.	Tvrdomjer PMT-3U4.2.....	32
Slika 17.	Otisci indentora na ispitni uzorak	32
Slika 18.	Tablica za očitovanje tvrdoće za metodu HV0,2	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti Euro norme [27].....	23
Tablica 2. Vrijednosti d_1 i d_2	33
Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>g</i>	°C	Temperatura
<i>I</i>	W/m ²	Jakost zvuka
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
<i>α</i>	°	Kut između dijagonala indentora
<i>m</i>	kg	Masa
<i>F</i>	N	Sila opterećenja
<i>t</i>	s	Vrijeme utiskivanja

SAŽETAK

Završni rad bavi se detaljnim opisom i analizom ispušnih sustava, njihovom ulogom, značajem, komponentama i materijalima. Ispušni sustavi ključni su dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem jer omogućuju odvođenje ispušnih plinova, smanjuju emisije štetnih tvari i buku, te poboljšavaju performanse vozila. U radu je opisana povijest razvoja ispušnih sustava opis njihovih glavnih komponenti te njihov doprinos smanjenju zagađenja i optimizaciji rada motora.

Posebna pažnja posvećena je zakonima i normama koji reguliraju emisije, zvučne karakteristike te sigurnost i učinkovitost ispušnih sustava. U radu su navedeni najčešći uzroci oštećenja elemenata ispušnog sustava te su navedene metode prevencije i zaštite od ovih oštećenja. U eksperimentalnom dijelu rada provedena je karakterizacija uzorka ispušnog lonca.

Ključne riječi: Ispušni sustav, emisija štetnih plinova, norme, korozija, karakterizacija materijala

SUMMARY

The thesis focuses on a detailed description and analysis of exhaust systems, including their role, significance, components, and materials. Exhaust systems are critical components of internal combustion engines as they facilitate the removal of exhaust gases, reduce harmful emissions and noise, and improve vehicle performance. The paper outlines the history of exhaust system development, describes their main components, and discusses their contribution to reducing pollution and optimizing engine performance.

Special attention is given to the regulations and standards governing emissions, sound characteristics, safety, and efficiency of exhaust systems. The thesis also investigates the causes of damage to exhaust system components and presents methods for preventing and protecting against such damage. In the experimental section of the thesis, a material characterization of an exhaust muffler sample was conducted.

Keywords: Exhaust system, harmful emissions, standards, corrosion, material characterization

1. UVOD

Povijest ispušnih sustava motornih vozila započinje krajem 19. stoljeća, kada su se osobna vozila počela komercijalizirati. U to vrijeme, motori s unutarnjim izgaranjem (engl. *Internal combustion engine* – ICU) proizvodili su značajnu buku i ispušne plinove, što je predstavljalo ozbiljan problem za udobnost i sigurnost putnika. Rješavanje je tih izazova postalo ključno za napredak automobilske tehnologije. [1]

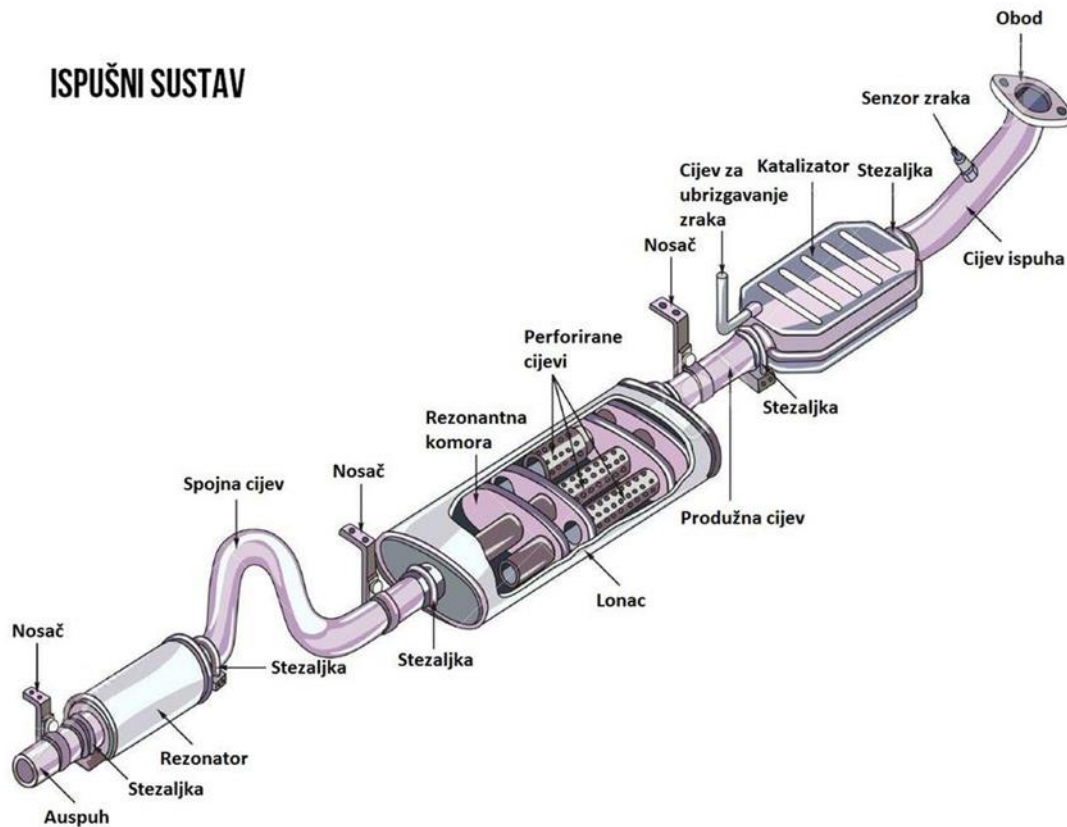
Jedan od pionira u rješavanju toga zadatka bio je Milton Reeves, američki izumitelj koji je značajno pridonio razvoju ispušnih sustava. Prvi prigušivač, koji je bio metalna cijev konstruirana za smanjenje buke, patentirao je Reeves 1896. godine. Ovaj izum označio je važan korak u razvoju tehnologija za kontrolu buke i ispušnih plinova, postavljajući temelje za daljnji napredak u ovom području. [1]

Sredinom 20. stoljeća, rastuća zabrinutost zbog zagađenja zraka i sve stroži ekološki standardi, doveli su do razvoja novih tehnologija za smanjenje emisija štetnih plinova. Eugene Houdry, francuski kemičar i inženjer, odigrao je ključnu ulogu u ovome razdoblju. Prvi je katalizator razvijen 1950-ih godina i omogućuje kemijske reakcije koje pretvaraju opasne ispušne plinove kao što su ugljični monoksid (CO), dušikovi oksidi (NO_x) i nezapaljeni ugljikovodici (HC) u manje štetne plinove poput ugljičnog dioksida (CO₂) i vodene pare (H₂O). Ova inovacija bila je presudna za smanjenje emisija štetnih plinova i pomogla da vozila ispune sve strože ekološke norme. [2]

U početku razvoja automobilske industrije, ispušni sustavi bili su relativno jednostavni, uglavnom metalne cijevi koje su služile za odvođenje ispušnih plinova i smanjenje buke. Razvijanjem motornih vozila ekološki zahtjevi postajali su sve stroži. Uvođenjem katalizatora, filtera čestica (engl. *Diesel particle filter* – DPF) i sustava za selektivnu katalitičku redukciju (engl. *Selective catalytic reduction* – SCR), značajno su smanjene emisije štetnih plinova i poboljšana je kvaliteta zraka. Današnji ispušni sustavi uključuju sofisticirane senzore i kontrolne jedinice koje omogućuju precizno upravljanje emisijama i optimizaciju ispušnog sustava, a time i samo vozilo. [2]

2. Opis ispušnog sustava

Ispušni sustav motornog vozila ima ključnu ulogu u osiguravanju ekološke prihvatljivosti, sigurnosti i učinkovitosti vozila. Sastoji se od nekoliko međusobno povezanih komponenti [slika 1] te omogućava pravilno usmjeravanje i obradu ispušnih plinova nastalih tijekom rada motora. Kako bi vozila ispunila sve strože ekološke norme i propise, neophodno je razumjeti ulogu, konstrukciju i materijale koji se koriste u ispušnom sustavu. [3]



Slika 1. Ispušni sustav [3]

2.1. Uloga i značaj ispušnog sustava

Ispušni sustav motornog vozila ima nekoliko ključnih uloga koje su od vitalnog značaja za cjelokupno funkcioniranje vozila. Njegova primarna funkcija je odvođenje produkata izgaranja iz komore za izgaranje u okoliš, odnosno uklanjanje ispušnih plinova koji nastaju kao rezultat izgaranja goriva unutar motora. Ti plinovi, koji uključuju ugljični dioksid (CO_2), ugljični monoksid (CO), dušikove okside (NO_x) i ugljikovodike (HC), moraju se sigurno odvesti iz motora kako bi se spriječilo njihovo nakupljanje, što bi moglo oštetiti motor i imati negativan utjecaj na izvedbu vozila. [4]

Sustav za odvod ispušnih plinova ima ključnu ulogu u zaštiti motora od štetnih učinaka ovih plinova. Ako ispušni plinovi ne bi bili pravilno odvedeni, mogli bi uzrokovati probleme kao što su pregrijavanje motora, ubrzano trošenje dijelova ili smanjenje snage motora. Uz to, zbog nakupljanja štetnih tvari, može doći do korozije unutar motora, što dugoročno smanjuje njegovu trajnost i pouzdanost. Osim toga, nepravilno funkcioniranje ispušnog sustava može rezultirati povećanom potrošnjom goriva i višim emisijama štetnih plinova. [4]

Pored uklanjanja štetnih plinova, ispušni sustav također smanjuje razinu buke koju motor proizvodi tijekom rada. Smanjenje buke postiže se korištenjem specifičnih komponenti sustava koje apsorbiraju, reflektiraju i/ili prigušuju zvučne valove. Na primjer, u ispušnom loncu zvučni se valovi reflektiraju i poništavaju čime se smanjuje intenzitet buke. Time je osigurana ugodnija vožnja za putnike i ostale sudionike prometa, smanjena su zvučna onečišćenja u okolišu te usklađenost sa zakonima i normama koje ograničavaju razinu buke. [4]

Nadalje, sustav je konstruiran tako da osigurava najmanji mogući otpor strujanju ispušnih plinova, čime se osigurava optimalno izgaranje goriva i optimizira se izvedba motora, odnosno motor može učinkovitije obavljati svoj rad čime se poboljšava ekonomičnost goriva. Kroz optimizaciju protoka ispušnih plinova, proizvođači vozila nastoje uravnotežiti izvedbu motora i ekološke zahtjeve, osiguravajući da vozilo može isporučiti najbolje rezultate uz najmanji mogući utjecaj na okoliš. [4]

Sve ove uloge ispušnog sustava zajedno doprinose ne samo sigurnosti i učinkovitosti vozila, već i njegovom ekološkom otisku. Obzirom na sve strože standarde emisija i zahtjeve za smanjenje zagađenja, ispušni sustav postaje sve važnija, ali i kompleksnija komponenta u konstrukciji modernih vozila. [4]

2.2. Dijelovi (komponente) ispušnog sustava

Ispušni se sustav sastoji od nekoliko ključnih dijelova [slika 1]. Svaki dio ima specifičnu ulogu i koristi materijale koji su odabrani zbog vlastitih svojstava u vidu otpornosti na visoke temperature, koroziju i mehanička opterećenja. Ispušni sustav motornih vozila kategorije M1, kada se analizira prema udaljenosti od motora, obuhvaća: ispušnu granu (ispušni kolektor), ispušne cijevi, lambda sondu (senzor kisika), katalizator, prednji prigušivač (rezonator), ispušni lonac te krajnju ispušnu cijev. [4]

2.2.1. Ispušna grana

Ispušna grana ili ispušni kolektor ključna je komponenta ispušnog sustava. Njena je primarna uloga prikupljanje ispušnih plinova iz više cilindara motora i njihovo vođenje prema daljnjim

dijelovima ispušnog sustava. Kvaliteta dizajna i konstrukcija izravno utječe na izvedbu motora, potrošnju goriva i emisiju štetnih plinova.

Temperature unutar ispušne grane mogu doseći vrlo visoke vrijednosti ovisno o tipu motora, uvjetima rada i materijalu ispušne grane. Zbog visokih temperatura, koje se kreću između 400°C i 900°C, izbor materijala je ključan kako bi izdržao toplinska opterećenja bez deformacija ili gubitka strukturne cjelovitosti. [5]

2.2.1.1. Uloga ispušne grane

1. **Prikupljanje i vođenje ispušnih plinova:** Primarna je uloga ispušne grane prikupljanje ispušnih plinova iz više cilindara i njihovo usmjeravanje prema daljnjim dijelovima ispušnog sustava. Pravilna konstrukcija može smanjiti povratni tlak (otpor koji ispušni plinovi moraju prevladati da bi izašli iz cilindra i prošli kroz ispušni sustav), čime se poboljšava učinkovitost motora i njegova snaga. [6]
2. **Smanjenje emisija:** Dizajn može utjecati na brzinu protoka ispušnih plinova i njihovu temperaturu, što je ključno za učinkovit rad katalizatora i smanjenje emisija štetnih plinova. Na primjer, održavanje visokih temperatura pomaže katalizatoru da ostane u optimalnom rasponu radne temperature. [6]
3. **Poboljšanje učinkovitosti motora:** Dizajn ispušne grane može značajno poboljšati učinkovitost motora. Istovremenim smanjenjem povratnog tlaka, učinkovitijim uklanjanjem ispušnih plinova iz cilindara motora te poboljšanjem ulaza svježeg zraka i goriva u cilindar (popularno zvanog „scavenging“ efekt) povećavaju se snaga i reakcija motora. [6]
4. **Zvuk:** Ispušna grana utječe i na zvuk motora. Na primjer, sportski automobili često koriste ispušne grane koje omogućuju dublji i agresivniji zvuk, što doprinosi ukupnom doživljaju vožnje. [6]

2.2.1.2. Podjela ispušnih grana

1. Prema duljini cijevi [slika 2]
 - **Kratke cijevi:** Karakterizira ih dizajn s kraćim primarnim cijevima (engl. *Short tube headers*). Kraće cijevi omogućuju brži protok ispušnih plinova od cilindara motora do zajedničkog kolektora, čime se poboljšava izvedba motora pri nižim i srednjim okretajima. Jednostavan dizajn i smanjeni prostorni zahtjevi omogućuju lakšu instalaciju i smanjuju potrebu za dodatnom modifikacijom ispušnog sustava. [7]

- **Duge cijevi:** Nasuprot kratkim cijevima, duge cijevi ispušne grane (engl. *Long tube headers*) imaju produžene primarne cijevi koje omogućuju ispušnim plinovima duži i jednaki put od svakog cilindra motora do zajedničkog kolektora. Ovakva konstrukcija optimizira ispušni tok i smanjuje povratni tlak, što je izrazito važno pri visokim okretajima motora. Duge cijevi osiguravaju bolju izmjenu plinova i poboljšavaju učinkovitost motora, čime dolazi do povećanja snage i momenta. Međutim, one zahtijevaju više prostora u motornom sustavu i često zahtijevaju dodatne prilagodbe ispušnog sustava što ih čini zahtjevnijima i složenijima za instalaciju. [7]



Slika 2. Konstrukcija ispušne grane sa kratkim i dugim cijevima [7]

2. Prema materijalu izrade

- **Lijevano željezo:** Tradicionalni materijal za izradu ispušnih grana, poznat po svojoj otpornosti na visoke temperature i dugotrajnosti, relativno jeftino i često se koristi u standardnoj proizvodnji vozila. No, težak je i manje učinkovit u optimizaciji ispušnog toka u usporedbi sa modernijim materijalima. [8]
- **Nehrđajući čelik:** Pruža izvrsnu otpornost na koroziju i visoke temperature te omogućuje izradu složenijih dizajna za bolje performanse. Popularan je izbor u visokoperformansnim i trkaćim primjenama zbog svoje izdržljivosti i manje težine u odnosu sa lijevanim željezom. [8]
- **Aluminizirani čelik [9]:** Kombinira osnovu čelika s aluminijskom prevlakom kako bi se poboljšala otpornost na koroziju uz zadržavanje povoljnije cijene. Ovaj materijal nudi dobar omjer cijene i izvedbe te je čest izbor za zamjenske

ispušne grane u „aftermarket“ segmentu (dijelovi i oprema koji se proizvode i prodaju nakon što je vozilo proizvedeno, a koriste se kao poboljšane zamjene za originalne komponente nudeći bolju izdržljivost te bolje izvedbe od tvorničkih dijelova). [10]

- **Titanijeve legure:** Titanijeve legure pružaju značajne prednosti u konstrukciji ispušnih grana zbog svoje iznimne čvrstoće i otpornosti na visoke temperature. Titan smanjuje masu ispušnog sustava i poboljšava učinkovitost vozila i ekonomičnost potrošnje goriva, dok njegova visoka otpornost na toplinu produljuje vijek trajanja komponenti. Titanijeve legure, koje uključuju elemente poput aluminija, vanadija ili molibdena, nude dodatne mogućnosti prilagodbe materijalnih svojstava. One poboljšavaju otpornost na koroziju i toplinske cikluse, čime se povećava pouzdanost i dugovječnost ispušnih grana. Ovi materijali također smanjuju buku i vibracije. Iako je cijena titana i njegovih legura visoka, njihova dugotrajnost i poboljšana funkcionalnost u specijaliziranim aplikacijama kao što su trkaći automobili ili visoko performansni motori čine ih isplativim rješenjem za vrhunske inženjerske projekte. [10]

3. Prema konfiguraciji motora

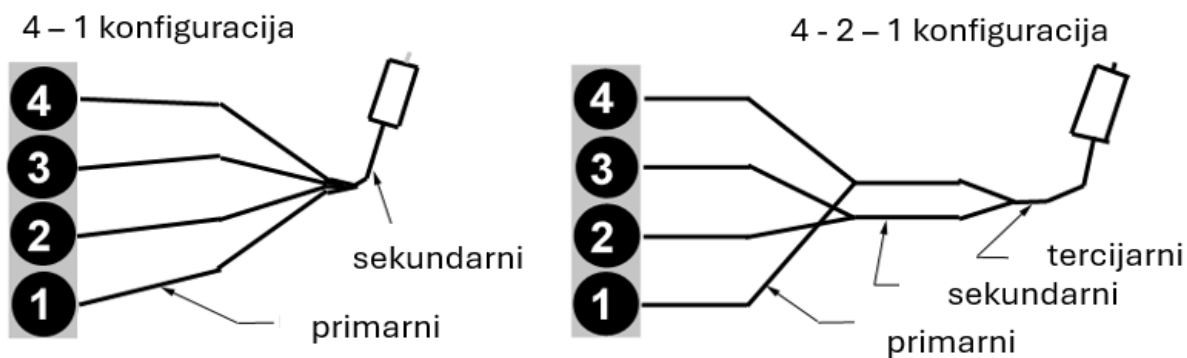
- **Za redne motore:** Za redne motore, ispušne grane su konstruirane za motore s cilindrima poredanim u liniji (engl. *Inline engines*), poput rednih četverocilindričnih (engl. *Inline 4 – I4*) ili šestercilindričnih motora (engl. *Inline 6 – I6*). Njihov je dizajn jednostavniji jer se svi ispušni otvori nalaze na istoj strani, što olakšava njihov raspored i omogućuje bolju optimizaciju toka ispušnih plinova. [10]
- **Za V-motore:** V-motori imaju dva reda cilindara postavljena u obliku slova V. Svaki red cilindara ima svoju ispušnu granu te dizajn mora uzeti u obzir različite kutove i duljine cijevi, kako bi se optimizirao ispušni tok i uravnotežila izvedba između oba reda cilindara. [10]
- **Za bokser motore:** Ispušne grane koje su dizajnirane za motore s nasuprot postavljenim cilindrima, primjerice bokser motori, moraju omogućiti optimalan protok ispušnih plinova za svaku stranu motora, često s dvije odvojene grane koje se spajaju dalje niz ispušni sustav. [10]

4. Prema dizajnu i namjeni ispušne grane

- **Standardne ispušne grane:** Standardne ispušne grane obično su izrađene od lijevanog željeza i dizajnirane za dugotrajnost i učinkovitost u svakodnevnoj vožnji. Usmjerene su na smanjenje troškova i osiguravanje dugovječnosti motora, a ne na optimizaciju izvedbe motora. [10]
- **Sportske ispušne grane (engl. *Performance headers*):** Sportske ispušne grane izrađene su od naprednijih materijala poput nehrđajućeg čelika ili titanijevih legura i dizajnirane su za poboljšanje izvedbe motora. Sportske ispušne grane optimizirane su za smanjenje povratnog tlaka i poboljšanje protoka ispušnih plinova, što rezultira povećanom snagom i boljim odzivom motora. [11]
- **Ekstraktorske ispušne grane:** Ekstraktorske ispušne grane, poznatije kao ekstraktori (engl. *Extractor headers*), dizajnirane su za efikasan proces uklanjanja ispušnih plinova iz cilindra motora i istovremeno poboljšanje ulaza svježeg zraka i goriva u cilindar. [12]

5. Prema konfiguraciji ispušne grane [Slika 3]:

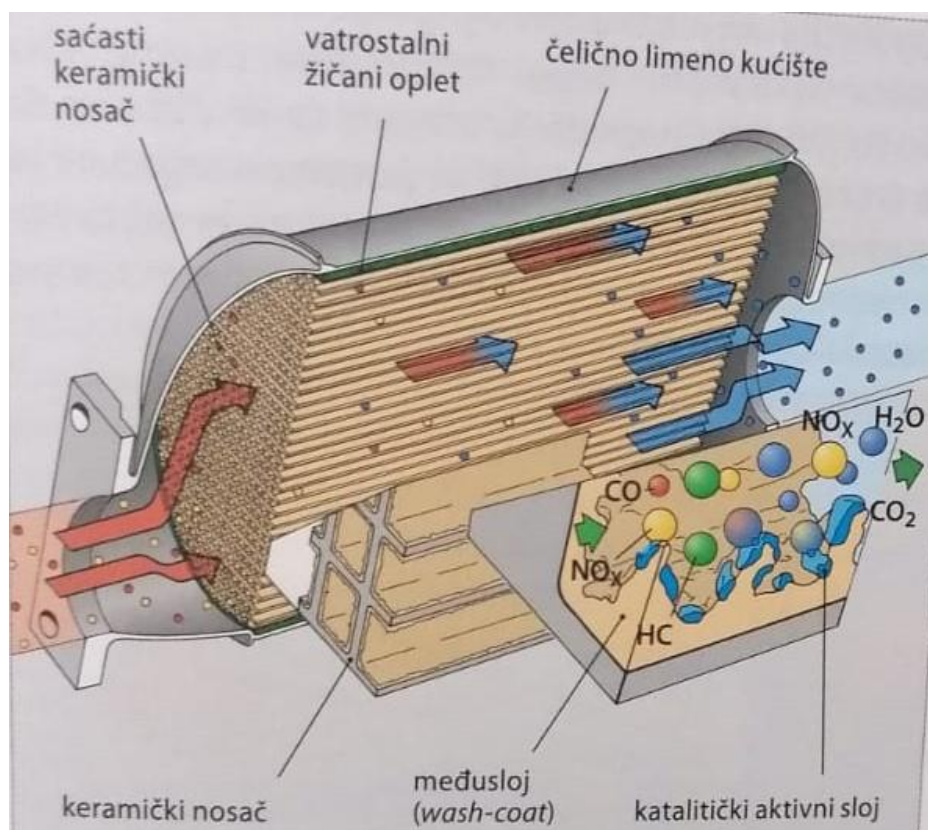
- **4 – 1 konfiguracija:** Ova konfiguracija spaja četiri primarne cijevi iz svakog cilindra u jedan zajednički kolektor. Ovaj dizajn popularan je u trkaćim primjenama jer pruža najveću snagu pri visokim okretajima te omogućava učinkovitiji tok ispušnih plinova i povećava performanse motora. [10]
- **4 - 2 - 1 konfiguracija:** U ovoj konfiguraciji prvo se četiri primarne cijevi spajaju u dva sekundarna kolektora, a zatim u jedan završni. Ovaj dizajn omogućava bolji moment pri nižim i srednjim okretajima uz održavanje dobre snage pri visokim okretajima. Primjenjuje se kod potrebe za širokim rasponom okretaja i boljom fleksibilnosti izvedbe. [10]



Slika 3. Konfiguracija za I4 motore [13]

2.2.2. Katalizator

Katalizator je ključan dio ispušnog sustava vozila koja primjenom redoks reakcija (kemijski proces prijenosa elektrona između dvije tvari, pri čemu se jedna oksidira, tj. gubi elektrone, dok se druga reducira, odnosno prihvaća te elektrone) u kojoj smanjuje emisiju štetnih plinova nastalih u procesu izgaranja goriva. Ovaj uređaj može pretvoriti do 98% štetnih tvari iz ispušnih plinova u manje opasne spojeve, čime značajno doprinosi smanjenju onečišćenju zraka. Detaljan prikaz kemijskih reakcija, materijala i same uloge prikazan je na slici 4. [4]



Slika 4. Katalizator [4]

2.2.2.1. Konstrukcija katalizatora

Katalizator se sastoji od nekoliko ključnih elemenata, svaki s posebnom ulogom u njegovom učinkovitom radu:

- 1. Kućište:** Vanjski dio katalizatora izrađuje se od nehrđajućeg čelika zbog njegove otpornosti na visoke temperature, koroziju i mehaničke čvrstoće. Štiti unutarnje dijelove katalizatora od vanjskih oštećenja i osigurava dugotrajnost cijelog sustava. [15]
- 2. Jezgra (monolitni substrat):** Obično je izrađena od keramike, najčešće kordijerita, ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), zbog njegove izuzetne otpornosti na toplinske šokove.

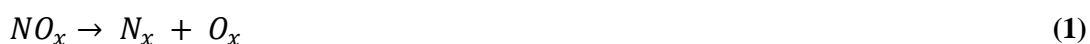
Njegova strukturna stabilnost omogućuje rad u ekstremnim uvjetima unutar ispušnog sustava. Alternativno, jezgra može biti izrađena od metalne folije. Oblikovana u strukturu sličnu pčelinjeg saća, s velikim brojem šesterokutnih ili cilindričnih kanala s izolacijskim slojevima. Ovi kanali prekriveni su slojem aluminijskog oksida poznatim kao „washcoat“, koji je porozan i time povećava površinu dostupnu za kemijske reakcije. [15]

- 3. Katalitički sloj:** Površina jezgre obložena je katalitičkim slojem koje se sastoji od plemenitih metala poput platine, paladija i rodija. Ovi metali djeluju kao katalizatori u kemijskim reakcijama koje se odvijaju unutar katalizatora, odnosno ključni su katalitički materijali zbog svoje kemijske otpornosti i sposobnosti poticanja reakcija pri relativno niskim temperaturama. Platina i paladij najčešće se koriste za oksidaciju ugljikovodika i ugljikovog monoksida, dok rodij omogućuje redukciju dušikovih oksida. Količina tih metala u jednom katalizatoru obično se kreće između 4 i 9 grama, čime se osigurava visoka učinkovitost pretvorbe štetnih tvari. [15]
- 4. Slojevi za pojačavanje stabilnosti katalitičkih materijala:** Ispod katalitičkog sloja nalaze se dodatni slojevi za pojačanje stabilnosti katalitičkih materijala koji pomažu pri održavanju stabilnosti katalitičkih materijala na površini jezgre, čak i pri visokim temperaturama i tijekom dugotrajnog rada. [15]

2.2.2.2. *Kemijske reakcije u katalizatoru*

Katalizator pretvara štetne ispušne plinove poput dušikovih oksida (NO_x), ugljikovodika (HC) i ugljikovog monoksida (CO) u manje štetne plinove poput dušika (N_2), ugljikovog dioksida (CO_2) i vode (H_2O) koristeći osnovne redoks reakcije. Redoks reakcije koje slijede, iako termodinamički povoljne, odvijaju se vrlo sporo bez prisutnosti katalizatora jer je za njihovo pokretanje potrebna određena količina energije. Navedena energija, poznata kao energija aktivacije (E_a), nužna je za prevladavanje početne energetske barijere koja sprječava reakciju. Katalizator ubrzava reakciju snižavanjem energije aktivacije. Međutim, katalizator sam po sebi ne stvara proizvode već značajno utječe na brzinu i količinu nastajanja produkata. [16]

1. Redukcija dušikovih oksida (NO_x) u elementarni dušik (N_2) i kisik (O_2):



2. Oksidacija ugljikovog monoksida

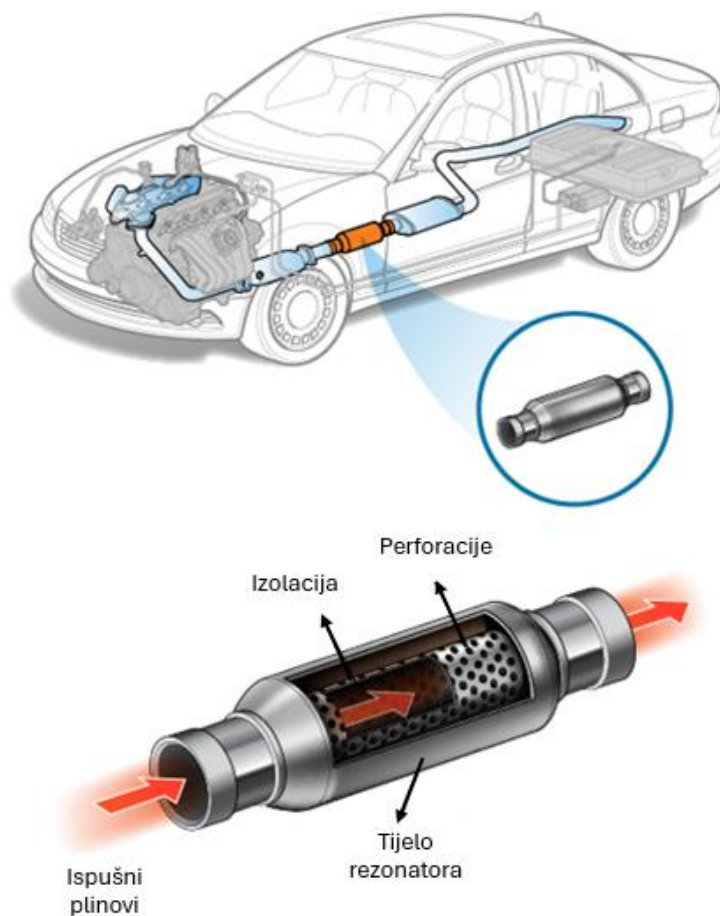


3. Redukcija ugljikovodika (C_xH_{4x}) u ugljikov dioksid (CO_2) i vodu (H_2O)



2.2.3. Prednji ispušni lonac (rezonator)

Rezonator, iako nije uvijek prisutna komponenta ispušnog sustava motornog vozila, može značajno utjecati na smanjenje buke i regulaciju zvučnog profila vozila. Dok glavni prigušivač (ispušni lonac) obično preuzima zadatak smanjenja buke, rezonator može dodatno optimizirati zvuk i izvedbu sustava. [17] Opis rezonatora prikazan je na slici 5.



Slika 5. Rezonator [19]

2.2.3.1. Uloga rezonatora

Rezonator obavlja nekoliko uloga unutar ispušnog sustava: [17]

- **Smanjenje buke:** Rezonator koristi princip akustičkog poništavanja za smanjenje određenih frekvencija buke. Njegova unutarnja struktura omogućuje zvučnim valovima određene frekvencije da se reflektiraju unutar komore i time ponište. [17]

- **Regulacija zvučnog tona:** Rezonator može utjecati na ton ispušnog sustava, prilagođavajući zvuk motora prema željama proizvođača ili korisnika. Omogućeno je stvaranje specifičnog zvučnog profila, što može biti važno za vozila koja traže određeni estetski zvuk. [17]
- **Poboljšanje izvedbe:** Iako nije primarna funkcija, rezonator može pomoći u optimizaciji protoka ispušnih plinova, čime se može smanjiti povratni tlak i poboljšati učinkovitost motora. Učinak može oscilirati ovisno o dizajnu i specifičnostima vozila [17]

2.2.3.2. Konstrukcija rezonatora

Konstrukcija rezonatora ključna je za njegovu funkcionalnost, a uključuje analizu akustičkih svojstava i protoka ispušnih plinova:

- **Akustična komora:** Većina rezonatora ima unutarnje akustične komore koje su projektirane za određene frekvencije. One pomažu u poništavanju zvučnih valova određene frekvencije refleksijom unutar komore. [18]
- **Perforirane cijevi:** Cijevi koje imaju niz malih rupa raspoređenih duž svog vanjskog zida koje omogućuju prolaz valova u akustičnu komoru. Perforacije pomažu smanjenju buke bez značajnog utjecaja na protok ispušnih plinova. [18]
- **Rezonantne šupljine:** Neki dizajni rezonatora uključuju rezonantne šupljine koje su specifično dimenzionirane za ciljanje određenih frekvencija te djeluju na principu akustičnog poništavanja tih frekvencija. [18]
- **Oblik i dimenzije:** Vanjski oblik i dimenzije rezonatora mogu značajno utjecati na njegovu učinkovitost. Veći rezonatori mogu pružiti bolje smanjenje buke, ali zahtijevaju više prostora, što je važno pri konstrukciji ispušnog sustava, posebno u vozilima s ograničenim prostorom. [18]

2.2.3.3. Materijali za izradu rezonatora

Materijali korišteni za izradu rezonatora moraju ispunjavati zahtjeve za otpornost na visoke temperature i koroziju, kao što su nehrđajući čelik, aluminizirani čelik i keramički materijali [18]

2.2.4. Lambda sonda

Lambda (λ) sonda ili senzor kisika, ključna je komponenta ispušnog sustava u motorima koji su pogonjeni na benzin, dizel i plin. Njena je glavna uloga mjerenje koncentracije kisika u

ispušnim plinovima i omogućavanje optimizacije izgaranja goriva, kako bi se postigle minimalne emisije štetnih plinova i maksimalna učinkovitost motora. [20]

2.2.4.1. Uloga lambda sonde

- 1. Kontrola omjera zrak-gorivo:** Lambda sonda omogućuje precizno mjerenje omjera zrak-gorivo u motoru. Omjer zrak-gorivo označava količinu zraka u odnosu na količinu goriva koja ulazi u motor. Idealni omjer, poznat kao stehiometrijski omjer, za benzin je otprilike 14,7:1, što znači da za svaku jedinicu goriva ide 14,7 jedinica zraka. Održavanje ovog omjera osigurava učinkovito izgaranje goriva, čime se povećava učinkovitost motora i smanjuje emisija štetnih plinova. [20]
- 2. Optimizacija izgaranja:** Korištenjem signala koje šalje lambda sonda, kontrolna jedinica motora (engl. *Engine control unit* - ECU) može prilagoditi količinu goriva koja se ubrizgava u motor. Ako lambda sonda otkrije da je smjesa goriva i zraka previše bogata (previše goriva u odnosu na zrak), ECU će smanjiti količinu goriva. Ukoliko je smjesa previše siromašna (premalo goriva u odnosu na zrak), ECU će povećati količinu goriva. Navedene prilagodbe omogućuju optimalno izgaranje goriva, čime se poboljšava učinkovitost motora i smanjuje potrošnja goriva. [20]
- 3. Smanjenje emisije štetnih plinova:** Lambda sonda pomaže pri smanjenju emisije štetnih plinova kao što su ugljični monoksid (CO), dušikovi oksidi (NO_x) i neizgoreni ugljikovodici (HC). To se postiže održavanjem optimalnog omjera zrak-gorivo. Kada je omjer pravilno postavljen, katalizator u ispušnom sustavu može učinkovito pretvoriti ove štetne plinove u manje štetne tvari, kao što su dušik, ugljični dioksid i voda. [20]
- 4. Poboljšanje izvedbe motora:** Osim što smanjuje emisije, lambda sonda također doprinosi poboljšanju performansi motora. Precizno upravljanje omjerom zrak-gorivo može povećati snagu motora i odziv na gas, čime se unaprjeđuje opće iskustvo vožnje. Optimalan rad motora omogućava i dugotrajnost komponenti motora, smanjujući troškove održavanja i popravaka. [20]
- 5. Dijagnostika i praćenje:** Lambda sonda također ima dijagnostičku funkciju. U modernim vozilima može postojati više lambda sonde: jedna prije katalizatora (prednja sonda) i jedna iza katalizatora (stražnja sonda). Prednja lambda sonda pruža podatke za optimizaciju omjera zrak-gorivo, dok stražnja lambda sonda služi za praćenje učinkovitosti katalizatora i može ukazivati na probleme s ispušnim sustavom ili s radom

motora. Ovi podatci omogućuju održavanje sustava u optimalnom stanju i pravovremeno otkrivanje mogućih kvarova. [20]

2.2.4.2. Materijali i konstrukcija lambda sonde

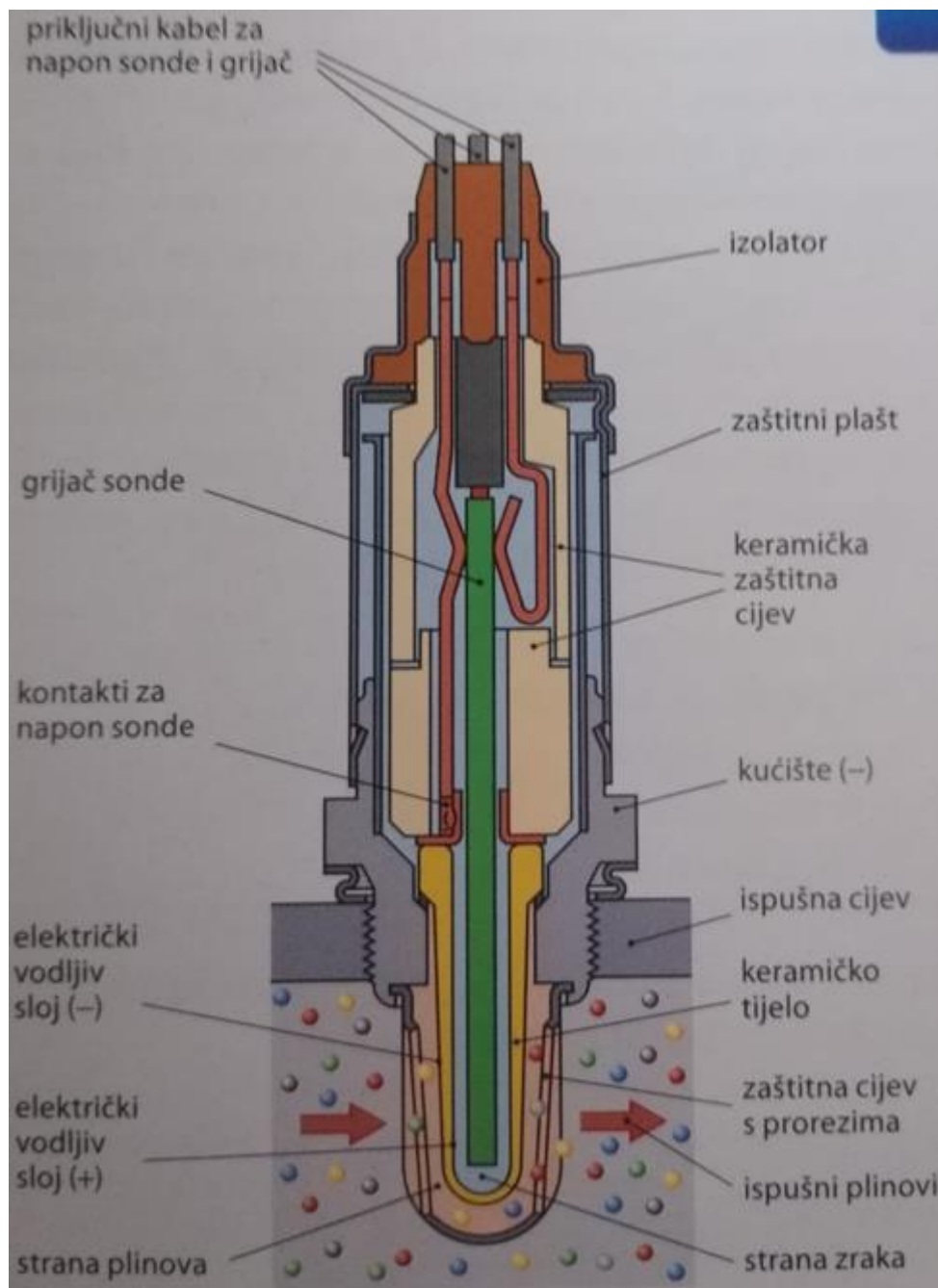
Lambda sonda se izrađuje od specijaliziranih materijala koji osiguravaju njezinu dugovječnost i učinkovitost u ekstremnim uvjetima ispušnog sustava. Glavni materijali uključuju:

- **Keramika:** Glavna komponenta lambda sonde keramički je element napravljen od cirkonijevog dioksida (ZrO_2) i titanijevog dioksida (TiO_2). Ovi su materijali odabrani zbog svoje otpornosti na visoke temperature i sposobnosti preciznog mjerenja koncentracije kisika. Keramički element može izdržati temperature do $900^\circ C$, što je ključno za precizno mjerenje. [4]
- **Platina:** Na površini keramičkog elementa nalazi se sloj platine koja djeluje kao katalitički materijal. Prevlaka platine omogućava stvaranje električnog signala koji odražava količinu kisika u ispušnim plinovima, zahvaljujući svojoj otpornosti na visoke temperature i koroziju. [4]
- **Nehrđajući čelik:** Ovi materijali se koriste za izradu kućišta sonde. Nehrđajući čelik osigurava otpornost na koroziju i mehanička opterećenja te pruža zaštitu od visokih temperatura i kemijskih korozivnih tvari. Kućište, također, ima navoj koji omogućuje pričvršćivanje sonde u ispušni sustav. [4]

Lambda sonda sastoji se od nekoliko ključnih komponenti:

- **Keramički element (cirkonijev dioksid ili titanijev dioksid):** Ovaj keramički element, češće izrađen od cirkonijevog, a rjeđe od titanijevog dioksida, prekriven slojem platine, sadrži pore koje osiguravaju kontakt između ispušnih plinova i senzora, omogućujući precizno mjerenje koncentracije kisika. [4]
- **Kućište lambda sonde:** Izrađeno od nehrđajućeg čelika, kućište lambda sonde pruža zaštitu od visokih temperatura i kemijskih utjecaja. Ima navoj za pričvršćivanje sonde u ispušni sustav. [4]
- **Elektroničke komponente lambda sonde:** Lambda sonda uključuje električne kontakte i kabelsku vezu za prijenos signala sa senzora do kontrolne jedinice motora. Ovi dijelovi moraju biti otporni na visoke temperature i kemikalije. [4]

Ova kombinacija materijala i konstrukcije osigurava da lambda sonda učinkovito funkcionira u zahtjevnim uvjetima ispušnog sustava te optimalnom radu motora i smanjenju emisije štetnih plinova, što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Materijali i konstrukcija lambda sonde [4]

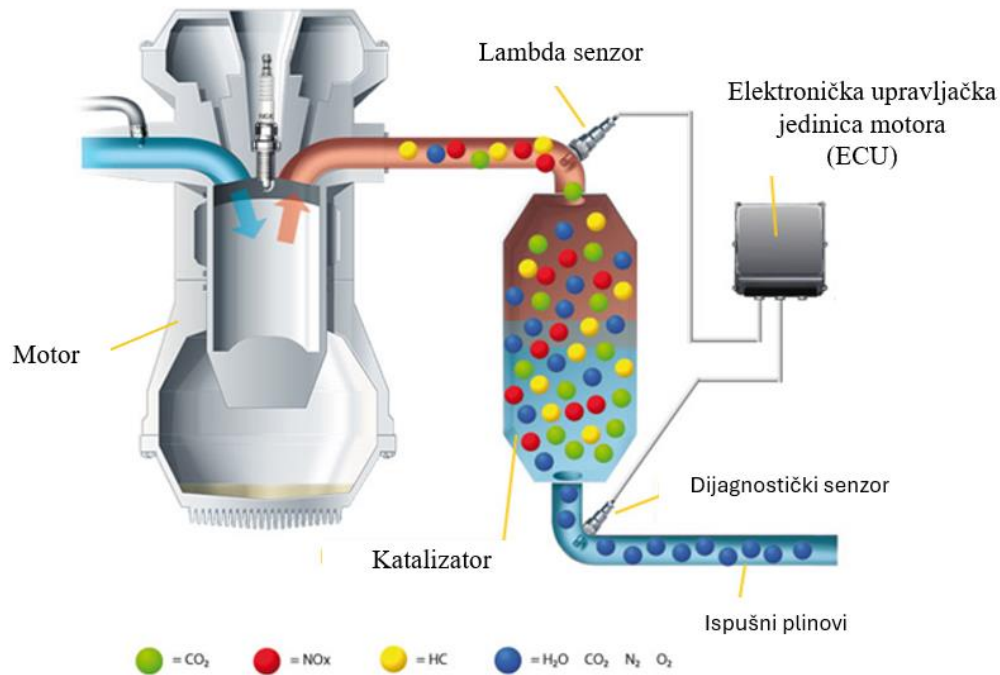
2.2.4.3. Vrste reakcija koje se odvijaju u lambda sondi

1. **Reakcija kisika:** Lambda sonda, osobito ona s čvrstom elektrodom, koristi cirkonijev dioksid (ZrO_2) koji je čvrsti elektrolit. Ovaj materijal vodi ionizirane kisikove ione na visokom naponu i pri visokim temperaturama. Kad ispušni plinovi s različitim

koncentracijama kisika prolaze kroz keramički element, dolazi do kemijske reakcije između kisika i platine na površini senzora. [21]

- **Unutarnja kemijska reakcija:** Unutar lambda sonde, dolazi do kemijske reakcije između kisika u ispušnim plinovima i kisika u atmosferi. Kad je koncentracija kisika u ispušnim plinovima različita od koncentracije u atmosferi, javlja se razlika u naponu između dvije strane keramičkog elementa (senzor vs. referentni zrak). Navedena razlika u naponu koristi se za generiranje električnog signala. [21]
2. **Reakcija s prevlakom platine:** Prevlaka platine na keramičkom elementu lambda sonde katalizira reakciju između kisika i drugih komponenti u ispušnim plinovima. Spomenuta reakcija pomaže u stvaranju električnog signala koji odražava količinu kisika u ispušnim plinovima. Sloj platine djeluje kao katalizator, što omogućava kemijske reakcije da se odvijaju pri relativno niskim temperaturama i smanjuje vrijeme reakcije. [21]
 3. **Redoks reakcije:** Na površini platine mogu se odvijati redoks reakcije između tvari u plinovima i kisika u ispušnim plinovima. Ove reakcije omogućuju precizno mjerenje i interpretaciju koncentracije kisika u ispušnim plinovima. [21]

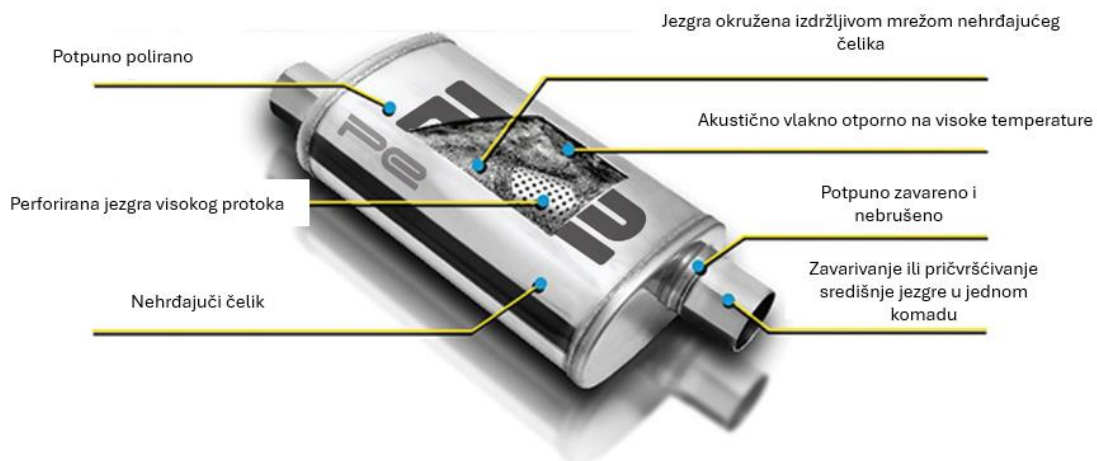
Na slici 7 prikazan je rad katalizatora i lambda sonde. Motor s unutarnjim izgaranjem proizvodi ispušne plinove, a senzor kisika i dijagnostički senzor koji se nalaze na cijevima prije i poslije katalizatora mjere razinu kisika u ispušnim plinovima i šalju informacije motoru kako bi se optimiziralo sagorijevanje goriva. [22]



Slika 7. Uloga lambda sonde [22]

2.2.5. Ispušni lonac

Ispušni lonac ili prigušivač ima zadatak smanjiti razinu buke koju motor proizvodi tijekom rada. Unutar ispušnog lonca nalaze se različiti materijali i konstrukcije, prikazano na slici 8, koji apsorbiraju i prigušuju zvučne valove. [4]



Slika 8. Ispušni lonac [23]

2.2.5.1. Konstrukcija ispušnog lonca

Vanjsko kućište ispušnog lonca:

- **Materijali vanjskog kućišta ispušnog lonca:** Vanjski dio ispušnog lonca često se izrađuje od materijala kao što su nehrđajući čelik, aluminizirani čelik ili titanijeve legure. Navedeni materijali odabrani su zbog svoje otpornosti na visoke temperature i korozijske utjecaje. [18]
- **Uloga vanjskog kućišta:** Kućište pruža zaštitu unutarnjim komponentama i osigurava strukturnu stabilnost ispušnog lonca. [18]

Unutarnja struktura ispušnog lonca

- **Komore i pregrade ispušnog lonca:** Unutar ispušnog lonca nalaze se različite komore i pregrade koje usmjeravaju protok ispušnih plinova. Komore mogu biti različitih oblika i veličina ovisno o tipu lonca. [4]
- **Uloga ispušnog lonca:** Pomažu u reguliranju toka ispušnih plinova i smanjuju razinu buke kroz različite metode. [4]

Zvučno-apsorbirajući materijali:

- **Materijali:** Prirodna (pamuk) i sinterička (staklena) vlakna često se koriste za apsorpciju zvuka. [24]
- **Uloga:** Smanjuju intenzitet buke omogućujući ispušnim plinovima da prolaze kroz materijale koji upijaju zvuk. [24]

2.2.5.2. Vrste ispušnih lonaca

1. Ispušni lonac s izravnim protokom (engl. *Straight-through muffler*) [25]

- **Konstrukcija i opis:** Ispušni lonac s izravnim protokom karakterizira jednostavan dizajn koji omogućuje ispušnim plinovima da teku ravno kroz lonac bez ikakvih pregrada ili zavoja. Najčešće se sastoji od jednog dugog kanala unutar kućišta kroz koji plinovi prolaze neometano.
- **Uloga:**
 - *Protok plinova:* Dizajn omogućuje besprijekoran protok ispušnih plinova, čime se smanjuje otpor i potencijalno poboljšava performansa motora.
 - *Buka:* Zbog svoje jednostavnosti, često ne pruža značajnu kontrolu buke, što može rezultirati povećanom razinom zvuka.

- **Primjena:** Koristi se u vozilima visokih performansi, poput trkaćih automobila, gdje je prioritet maksimalna snaga motora i optimizacija protoka ispušnih plinova, dok razina buke nije primarni faktor.

2. Ispušni lonac s komorama (engl. *Chambered muffler*) [25]

- **Konstrukcija i opis:** Ispušni lonac sa komorama sadrži niz komora i pregrada unutar svog kućišta. Komore su dizajnirane da usmjere ispušne plinove kroz različite putanje, stvarajući refleksiju zvučnih valova koji smanjuju buku.
- **Uloga:**
 - *Protok plinova:* Komore usmjeravaju plinove kroz različite kanale čime istovremeno uzrokuju blagi povratni pritisak i smanjenje buke, što može uzrokovati blagi povratni pritisak, ali istovremeno pomaže u smanjenju buke.
 - *Buka:* Učinkovit je u smanjenju buke kroz refleksiju zvučnih valova unutar komora.
- **Primjena:** Često se koristi u standardnim vozilima, gdje se želi postići dobar kompromis između smanjenja buke i održavanja pristupačne razumne cijene i složenosti sustava.

3. Dvostruki ispušni lonac (engl. *Dual exhaust muffler*) [25]

- **Konstrukcija i opis:** Dvostruki ispušni lonac ima dva izlaza umjesto jednog, čime je omogućen veći kapacitet za ispušne plinove. Lonac može imati različite unutarnje dizajne, uključujući komore i pregrade, za poboljšanje performansi i smanjenje buke.
- **Uloga:**
 - *Protok plinova:* Omogućuje bolji protok ispušnih plinova kroz dvije cijevi, što može poboljšati performanse motora i smanjiti povratni pritisak.
 - *Buka:* Može smanjiti buku na sličan način kao standardni lonac, ali s dodatnim mogućnostima za estetiku i performanse.
- **Primjena:** Koristi se u vozilima sa sportskim ili estetskim naglaskom, kao i u vozilima koja zahtijevaju poboljšanje protoka ispušnih plinova.

4. Ispušni lonac s obrnutim protokom (engl. *Reverse flow muffler*) [25]

- **Konstrukcija i opis:** Ispušni lonac s obrnutim protokom omogućava ispušnim plinovima da teku kroz lonac u suprotnom smjeru prije nego što izađu. Samim dizajnom omogućena je dodatna kontrola nad protokom plinova kroz unutarnje komore i kanale.

- **Uloga:**
 - *Protok plinova:* Unaprjeđuje raspodjelu ispušnih plinova kroz lonac, smanjujući povratni pritisak i poboljšavajući učinkovitost sustava.
 - *Buka:* Učinkovit u smanjenju buke kroz dodatne komore i putanje koje pomažu u kontroliranju zvučnih valova.
- **Primjena:** Koristi se u vozilima gdje su važni specifični zahtjevi za smanjenje buke i poboljšanje performansi, kao što su luksuzni automobili ili specijalizirana vozila.

5. Refleksni ispušni lonac [24]

- **Konstrukcija i opis:** Refleksni ispušni lonac je konstruiran s unutarnjim komorama koje variraju u veličini, zajedno s perforiranim cijevima. Ove komore i cijevi su dizajnirane da usmjeravaju i reflektiraju zvučne valove. Cijevi su postavljene na način da nisu paralelne, već su pomaknutog smjera u odnosu jedna na drugu. Ovaj dizajn prisiljava ispušne plinove da skreću i prolaze kroz različite unutarnje komore, što uzrokuje da se zvučni valovi reflektiraju i smanjuju svoju snagu. Primarni cilj ovog dizajna je smanjiti intenzitet buke kroz destruktivnu interferenciju i rezonanciju, gdje se zvučni valovi sudaraju i smanjuju svoju energiju. Refleksni ispušni lonci posebno su učinkoviti u prigušivanju niskih i srednjih frekvencija.
- **Primjena:** Refleksni ispušni lonci se često koriste u vozilima namijenjenim za svakodnevnu uporabu, gdje je ključno postići dobru ravnotežu između smanjenja buke i očuvanja izvedbe samog vozila. Ovi lonci omogućuju učinkovito smanjenje buke dok istovremeno održavaju adekvatne performanse vozila.

6. Apsorpcijski ispušni lonac [24]

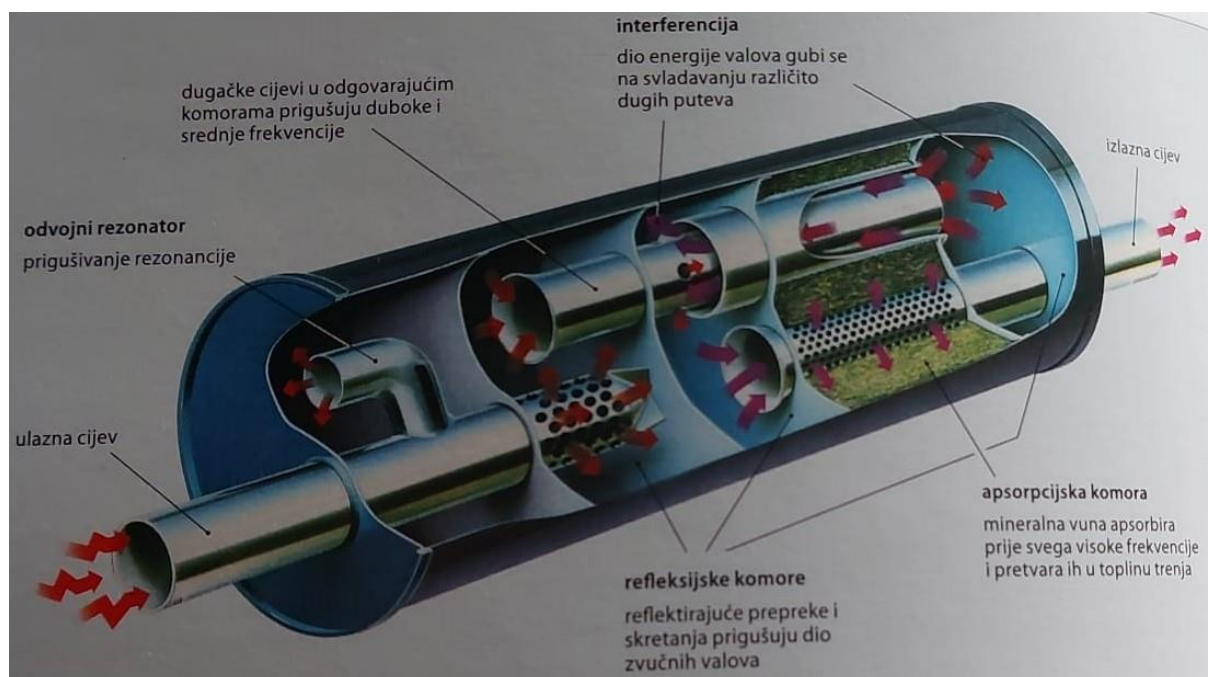
- **Konstrukcija i opis:** Apsorpcijski ispušni lonac sastoji se od šupljeg cilindra koji je držan oko svoje osi, dok su otvori postavljeni koncentrično, slično filtru za ulje i zrak. Vanjska površina lonca potpuno je prekrivena materijalom za apsorpciju zvuka, kao što su staklena vlakna, mineralna vuna ili pamuk. Iznad ovog materijala postavljen je zaštitni sloj od materijala otpornog na visoke temperature i koroziju, koji štiti apsorpcijski materijal i ostale dijelove lonca od oštećenja i produžuje njihov vijek trajanja. Kada visoki signal buke uđe u ispušni lonac s jedne strane, zvučni valovi se kreću kroz lonac prema suprotnoj strani. Tijekom tog kretanja, valovi se sudaraju s unutarnjim površinama lonca i prolaze kroz perforirane otvore. Ovi zvučni valovi dolaze u kontakt s materijalom za apsorpciju zvuka, koji je smješten unutar lonca.

Materijal za apsorpciju zvuka upija dio energije zvučnih valova, čime se smanjuje intenzitet buke koja izlazi iz lonca.

- **Primjena:** ApSORPCIJSKI ispušni lonci su česti u vozilima koja se koriste za svakodnevnu vožnju te se obično koriste u glavnim ispušnim loncima. Ovi lonci pružaju dobar nivo tišine unutar kabine vozila i često se koriste u vozilima namijenjenim za udobnost putnika. Također su prisutni u vozilima u kojima je cilj minimizirati buka iz ispušnog sustava, poput osobnih automobila i kamiona.

7. Kombinirani refleksno-apsorpcijski ispušni lonac [4]

Refleksni ispušni lonac učinkovito prigušuje niske i srednje frekvencije, dok apsorpcijski ispušni lonac smanjuje visoke frekvencije. Kombinirani ispušni lonac [slika 9], koji integrira oba pristupa, pruža iznimno učinkovito rješenje za upravljanje bukom i često se koristi u praksi. U nekim slučajevima, može se naći i kao zaseban uređaj koji sadrži obje vrste prigušenja, čime se optimizira kontrola buke u različitim frekvencijskim rasponima.



Slika 9. Kombinirani refleksno-apsorbirajući ispušni lonac [4]

2.2.5.3. Materijali

Za izradu ispušnih lonaca koriste se različiti materijali, a odabir materijala ovisi o specifičnim zahtjevima, kao što su otpornost na koroziju, otpornost na visoke temperature i trajnost. [15]

1. **Nehrđajući čelik:** Nehrđajući čelik je vrlo čest materijal u modernim ispušnim sustavima zbog svojih izvanrednih svojstava otpornosti na visoke temperature i koroziju. Krom, koji se nalazi u sastavu nehrđajućeg čelika, stvara zaštitni sloj oksida

na površini, čime se sprječava daljnja oksidacija i produžuje vijek trajanja materijala. Dodatak nikla dodatno povećava stabilnost na visokim temperaturama i poboljšava otpornost na koroziju. Najčešće korišteni nehrđajući čelici za ispušne lonce su feritni (tip 409) i austenitni (304 i 316) nehrđajući čelici. [26]

2. **Aluminizirani čelik:** Čelik obložen slojem aluminija koji mu pruža povećanu otpornost na koroziju, u odnosu na obični ugljični čelik. Materijal nudi dobar kompromis između troškova i performansi pa se često koristi u serijskoj proizvodnji vozila. Aluminizacija pomaže u zaštiti čelika od oksidacije pri visokim temperaturama, ali je manje trajan od nehrđajućeg čelika. [26]
3. **Keramički materijali:** Koriste se u specifičnim dijelovima ispušnog sustava, posebno kod visokoperformansnih automobila. Keramika je izuzetno otporna na visoke temperature i korozivne plinove, što je čini idealnim materijalom za izolaciju topline i smanjenje emisija štetnih plinova. Međutim, keramika je krhka i može biti osjetljiva na mehanička oštećenja. [26]
4. **Ugljični čelik:** Obični ugljični čelik rijetko se koristi u modernim ispušnim sustavima zbog niske otpornosti na koroziju. Ipak, u starijim vozilima ili jeftinijim primjenama, ugljični čelik se može koristiti uz dodatne premaze ili tretmane kako bi se smanjila korozija. [26]

3. Zakoni i norme

Ispušni sustav vozila ima ključnu ulogu u smanjenju emisije štetnih plinova, buke te u optimizaciji performansi vozila. Kako bi se omogućile sigurnost, učinkovitost i ekološka prihvatljivost, ispušni sustavi moraju zadovoljiti niz tehničkih normi i zahtjeva koji su definirani zakonskim propisima i industrijskim standardima. [4]

3.1. Emisijske norme

Jedan od najvažnijih aspekata regulacije ispušnih sustava odnosi se na emisiju štetnih plinova. Emisijske su norme propisane kako bi se smanjio utjecaj motornih vozila na okoliš. Najvažnije emisijske norme uključuju:

- **Euro emisijske norme:** U Europi su emisijske norme regulirane Euro standardima koji su progresivno postajali stroži od uvođenja Euro 1 normi 1992. godine. Trenutno važeća norma je Euro 6d koja propisuje maksimalno dopuštene razine emisija dušikovih oksida (NO_x), ugljičnog monoksida (CO), ugljikovodika (HC) i čestica (PM). Ispušni sustav mora biti dizajniran u cilju smanjenja emisije navedenih štetnih tvari unutar dopuštenih granica. Detaljan prikaz dan je u tablici 1. [27]
- **EPA norme:** U Sjedinjenim Američkim Državama emisijske norme regulirane su od strane Agencije za zaštitu okoliša (engl. *Environmental Protection Agency* - EPA). Norme EPA-a slične su europskim, međutim razlikuju se u nekim specifičnostima i testnim procedurama. Ispušni sustavi koji se koriste na američkom tržištu moraju zadovoljiti ove standarde. [28]
- **CARB norme:** Kalifornijska agencija za zračne resurse (engl. *California Air Resources Board* - CARB) postavlja strože standarde od onih na saveznoj razini SAD-a, posebno u vidu emisije NO_x i čestica. Vozila koja se prodaju u Kaliforniji moraju ispunjavati navedene standarde, što zahtijeva dodatne prilagodbe ispušnog sustava. [29]

Tablica 1. Vrijednosti Euro normi [27]

Norma	Godina uvođenja	Vrsta Goriva	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	HC + NO _x (g/km)	PM (mg/km)	PN (broj/km)
Euro 1	1992	Benzin	2,72	0,97	0,50	-	-	-
		Dizel	2,72	-	0,97	0,70	140	-
Euro 2	1996	Benzin	2,20	0,50	0,50	-	-	-
		Dizel	1,00	-	0,90	0,70	80	-
Euro 3	2000	Benzin	2,30	0,20	0,15	-	-	-
		Dizel	0,64	-	0,50	0,56	0,50	-
Euro 4	2005	Benzin	1,00	-	,10	0,08	-	-
		Dizel	0,50	-	0,25	0,30	25	-
Euro 5	2009	Benzin	1,00	0,10	0,06	-	5	-
		Dizel	0,50	-	0,18	0,23	5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 6b	2015	Benzin	1,00	0,10	0,06	-	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
		Dizel	0,50	-	0,08	0,17	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 6c	2017	Benzin	1,00	0,10	0,06	-	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
		Dizel	0,50	0,08	0,17	4,5	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 6d- TEMP	2019	Benzin	1,00	0,10	0,06	-	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
		Dizel	0,50	-	0,08	0,17	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
Euro 6d	2021	Benzin	1,00	0,10	0,06	-	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$
		Dizel	0,50	-	0,08	0,17	4,5	$6,0 \cdot 10^{11}$

3.2. Propisi za buku

Osim emisijskih normi, današnji ispušni sustavi moraju zadovoljiti stroge zahtjeve za buku vozila u pokretu i stacionarnu buku. Ovi zahtjevi za buku vozila propisani su u ECE pravilnicima ili EC direktivama da vozila što manje ometaju okolinu i ljude. [30] Navedeni pravilnici i direktive su EC pravilnik R51 i EC direktiva 70/157.

- **Motorna vozila:** Za osobna vozila maksimalna dopuštena razina buke obično iznosi 74 dB(A) u kretanju vozila. Kod gospodarskih vozila poput kamiona, granica je viša (do 80 dB(A)), ovisno o vrsti i namjeni vozila. [31]
- **Mjerenje i kontrola:** Mjerenja se provode u standardiziranim uvjetima, uključujući određene udaljenosti između vozila i mikrofona te određenu brzinu motora.

4. Uzroci oštećenja elemenata ispušnog sustava

Zbog izloženosti ekstremnim uvjetima rada (visoka temperatura, agresivne kemikalije, kontinuirane vibracije i mehaničkih opterećenja) ispušni sustav vozila često postaje podložan različitim vrstama oštećenja. Kod takvih oštećenja može doći do smanjenja učinkovitosti sustava, ali i do povećane emisije štetnih plinova i potencijalno ozbiljnih kvarova. Kvarovi mogu imati dalekosežne i opasne posljedice, uključujući smanjenje sigurnosti vozila i povećanje njegovog negativnog utjecaja na okoliš. Najčešći uzroci oštećenja su korozija, trošenje (termička degradacija, vibracije) te mehanička opterećenja. [32]

4.1. Korozija

Korozija ispušnog sustava automobila predstavlja značajan problem zbog izloženosti ekstremnim uvjetima uključujući visoke temperature, vlagu, sol i kiseline koje se nalaze u ispušnim plinovima. U okviru ispušnog sustava mogu se pojaviti različite vrste korozije od kojih su najznačajnije sljedeće: [33]

1. **Korozija u procjepu:** Nastaje u područjima pukotina ili na mjestima koncentriranih napreznja gdje se vlaga i kemikalije mogu zadržati i ubrzati proces korozije.
2. **Korozija uslijed visokih temperatura (oksidacijska korozija):** Visoke temperature dovode do reakcije metala s kisikom iz zraka pri čemu nastaju oksidi koji mogu oslabiti metalnu površinu i smanjiti njezinu otpornost na daljnje korozivne procese.
3. **Atmosferska korozija:** Ispušni sustav automobila izložen je vanjskim uvjetima kao što su kiša, snijeg i sol korištena na cestama. Sol može ubrzati koroziju metala i smanjiti vijek trajanja ispušnog sustava, što se posebno ističe zimi.
4. **Opća korozija:** Pojavljuje se ravnomjerno po cijeloj površini metala i uglavnom je uzrokovana dugotrajnom izloženosti agresivnim kemikalijama ili visokoj vlažnosti.



Slika 9. Opća korozija katalizatora [34]

4.2. Trošenje

Trošenje ispušnog sustava vozila proces je koji se odvija tijekom vremena, a rezultat je kombinacije različitih mehaničkih, kemijskih i toplinskih čimbenika. Ispušni sustav ima ključnu ulogu u smanjenju emisija štetnih plinova i optimizaciji rada motora te njegovo trošenje može imati ozbiljne posljedice na učinkovitost vozila, okoliš i sigurnost. [35]

Trošenje ispušnog sustava vozila odnosi se na postupno propadanje i oštećenje njegovih komponenti uzrokovano mehaničkim naprezanjima, vibracijama i fizičkim udarcima tijekom vožnje. Trošenjem dolazi do smanjenja učinkovitosti ispušnog sustava, povećanja emisija štetnih plinova i, u konačnici, do ozbiljnih kvarova koji mogu utjecati na sigurnost i performanse vozila. Detaljno razumijevanje trošenja omogućava bolje održavanje i prevenciju potencijalnih problema.

4.2.1. Uzroci trošenja

Trošenje nastaje zbog nekoliko čimbenika:

1. **Vibracije:** Motori s unutarnjim izgaranjem tijekom rada zbog neujednačenosti rada klipova i rotacijskih elemenata te kretanje po neravnim površinama stvaraju stalne vibracije koje se prenose kroz cijeli ispušni sustav. Vibracije mogu uzrokovati smanjenje čvrstoće spojeva, vijaka i priborica te posljedično do propuštanja ispušnih plinova ili u najgorem slučaju, do potpunog odvajanja dijelova sustava. [36]
2. **Udarci i fizička oštećenja:** Tijekom vožnje ispušni sustav može biti izložen udarcima od kamenčića, krhotina s ceste ili u kontaktu s neravnim površinama (na primjer ležeći

policajci, rupe na cesti ili neravni tereni). Udarci mogu uzrokovati deformacije, udubljenja ili puknuća na cijevima i ispušnim loncima.

3. **Napreznja uzrokovana masom ispušnog sustava:** Ispušni je sustav relativno težak i ugrađen ispod vozila. Njegova vlastita masa, u kombinaciji s vibracijama, stvara dodatno napreznje za nosače i spojeve. S vremenom, ovo napreznje može dovesti do umora materijala i lomova. [36]

4.2.1.1. Područja najosjetljivija na trošenje

- **Spojevi i prirubnice:** Spojevi između različitih dijelova ispušnog sustava, kao što su cijevi, ispušni lonci i katalizatori, često su najosjetljiviji na trošenje. Navedeni spojevi podložni su vibracijama i napreznjima koje mogu uzrokovati njihovo popuštanje i u najgorem slučaju potpuno odvajanje. [35]
- **Zavareni spojevi:** Zavareni spojevi predstavljaju kritične točke unutar ispušnog sustava, gdje su komponente međusobno povezane postupkom zavarivanja. Ove zone izložene su napetosnoj koroziji, te slabljenjem zavara, bilo zbog materijalnog umora ili nepravilne izvedbe, može rezultirati pukotinama, lomovima ili čak potpunim odvajanjem pojedinih dijelova ispušnog sustava [37].

4.2.1.2. Posljedice trošenja

Trošenje može imati nekoliko ozbiljnih posljedica:

- **Smanjena učinkovitost sustava:** Propuštanje ispušnih plinova zbog slabljenja spojeva ili puknuća cijevi smanjuje učinkovitost sustava te posljedično do povećane emisije štetnih plinova.
- **Sigurnosni rizici:** Odvajanje dijelova ispušnog sustava tijekom vožnje može predstavljati ozbiljan sigurnosni rizik, kako za vozilo i vozača u kojem je došlo do kvara, tako i za druge sudionike u prometu.

4.2.1.3. Preventivne mjere protiv trošenja

Važno je provoditi redovne kontrole dijelova vozila i održavanje s ciljem smanjenja trošenja ispušnog sustava:

- **Redovito pregledavanje spojeva i nosača:** Potrebno je pregledati sve spojeve, prirubnice, zavarene dijelove i nosače kako bi se na vrijeme uočile pukotine, korozija i/ili slabljenje spojeva.

- **Pravilno učvršćivanje:** Osiguravanje pravilnog učvršćivanja i zatezanja pričvrstnih elemenata može spriječiti labavljenje (slabljenje spojeva) i smanjiti naprezanja uzrokovana vibracijama.
- **Korištenje kvalitetnih materijala:** Pri zamjeni dijelova ispušnog sustava važno je koristiti kvalitetne materijale koji su otporni na vibracije i udarce.

4.2.2. Utjecaj topline na dijelove ispušnog sustava

Toplinsko trošenje proizlazi iz neprekidne izloženosti visokim temperaturama koje su neizbježne zbog procesa sagorijevanja unutar motora s unutarnjim izgaranjem. Ispušni sustav mora učinkovito odvoditi vruće ispušne plinove iz motora, ali u tom procesu dolazi do značajnog opterećenja materijala, koje može dovesti do različitih vrsta degradacije. [38]

4.2.2.1. Utjecaj visokih temperatura

Ispušni sustav motornih vozila izložen je ekstremnim temperaturama koje mogu doseći do 900°C pa čak i više, posebno kod visokoučinkovitih motora ili u uvjetima sportskog vođenja. Vrlo visoke temperature uzrokuju toplinsko širenje materijala, a kad se sustav ohladi, dolazi do kontrakcije. Proces širenja i skupljanja materijala dovodi do naprezanja materijala koje s vremenom može rezultirati stvaranjem mikropukotina. Mikropukotine kroz određeno vrijeme mogu narasti i dovesti do ozbiljnijih oštećenja, i konačno, do kvara cijeloga sustava. [38]

4.2.2.2. Toplinska oksidacija i degradacija materijala

Visoke temperature također ubrzavaju proces oksidacije materijala. U prisutnosti kisika, materijali poput čelika od kojeg su izrađeni mnogi dijelovi ispušnog sustava, oksidiraju stvarajući oksidne slojeve. Iako neki oksidni slojevi mogu djelovati kao zaštitni, kod visokih temperatura često dolazi do stvaranja krhkih oksida koji smanjuju mehaničku čvrstoću materijala i čine ga podložnijim daljnjoj degradaciji. [38]

4.2.2.3. Termomehanički umor

Osim oksidacije, kombinacija visokih temperatura i mehaničkog naprezanja može uzrokovati termomehanički umor (engl. *Termomechanical fatigue*). Prilikom termomehaničkog umora materijal postaje krhak i sklon pucanju zbog ponavljajućih ciklusa opterećenja i temperaturnih promjena. U ispušnom sustavu, umor može rezultirati stvaranjem pukotina na zavarenim spojevima, prijelomima na tankim stijenkama cijevi ili čak pucanjem cijelih komponenti te posljedično dovesti do ispuštanja ispušnih plinova i smanjenja učinkovitosti sustava. [39]

5. Eksperimentalni dio

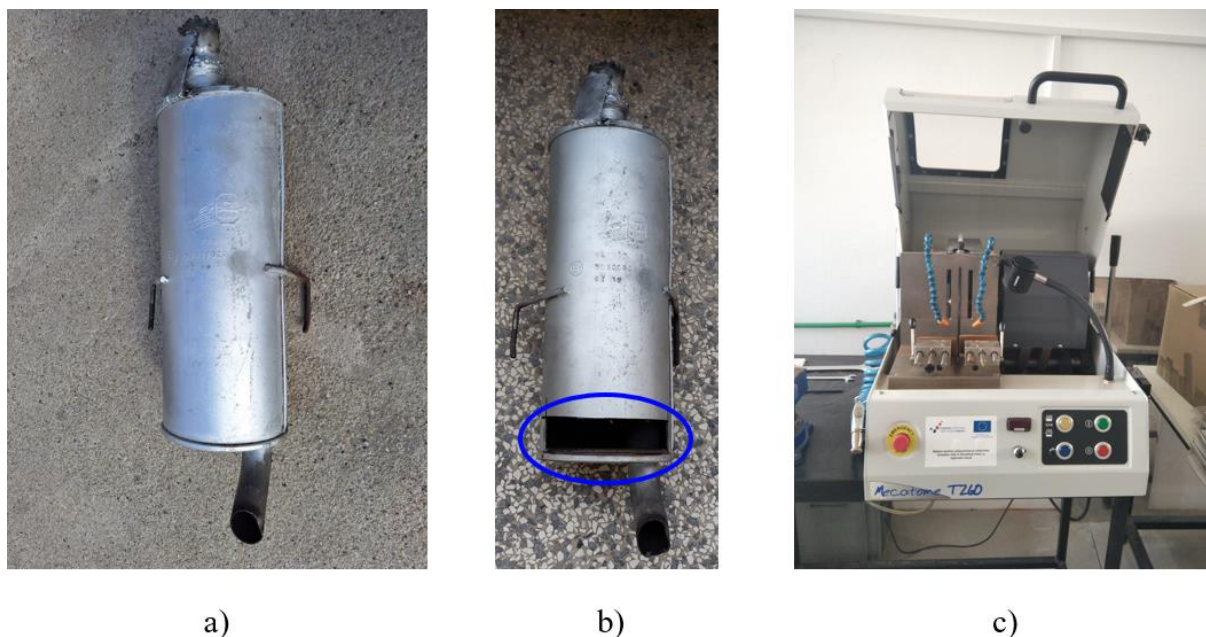
5.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Eksperimentalni dio rada obuhvaća karakterizaciju uzorka materijala ispušnog lonca motornog vozila. Karakterizacija materijala obuhvaćala je rezanje uzorka i njegovu pripremu, analizu njegove mikrostrukture te mjerenja tvrdoće uzorka. Mjerenja su provedena u Laboratoriju za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Zavodu za materijale. Nakupljanje čađe i sitnih otpadnutih dijelova, koji uzrokuju neželjene zvukove unutar ispušnog lonca, te korozija, razlozi su zbog kojih je ispušni lonac uklonjen s vozila.

5.2. Provedba eksperimenta

5.2.1. Izrezivanje uzorka

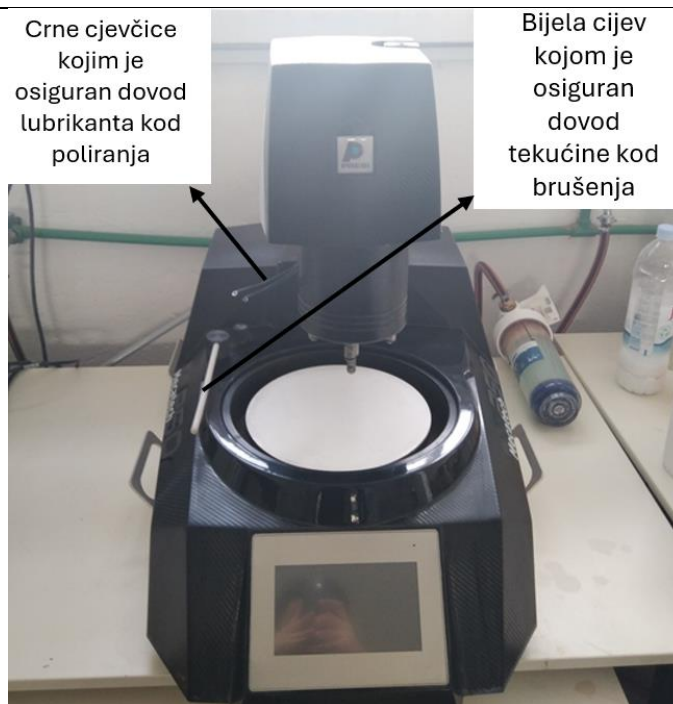
U prvom koraku, ispitni uzorak prikazan na slici 11a, izrezan je u servisu za ispušne sustave ISAP auspuh koristeći kutnu brusilicu, a mjesto rezanja prikazano je na slici 11b. Dodatno rezanje uzorka na dimenzije potrebne za njegovu analizu provedeno je u Laboratoriju za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na uređaju Mecatome T260 [slika 11c].



Slika 10. a) Ispitni uzorak, b) Mjesto rezanja ispitnog uzorka, c) Mecatome T260

5.2.2. Priprema uzorka

Uzorak je zaliven u polimernu masu, kako bi se olakšalo rukovanje tijekom procesa brušenja, poliranja i mikroskopske analize. Priprema uzorka za analizu mikrostrukture započela je brušenjem izrezanog dijela ispušnog lonca na uređaju Mecatech 250 – Presi, prikazanom na slici 12.



Slika 11. Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250 - Presi

Proces brušenja izveden je u šest faza, pri čemu su korišteni brusni papiri različitih granulacija, počevši od najgrubljeg prema najfinijem: P80, P320, P600, P1000, P2400 i P4000. U svakoj fazi brušenja, brzina rotacije glavne ploče bila je konstantna i iznosila je 300 okretaja u minuti. Za hlađenje i podmazivanje tijekom brušenja korištena je voda čiji je dovod bio osiguran bijelom cijevi [slika 11]. Nakon brušenja provedeno je poliranje. Poliranje je obavljeno na istome uređaju kao i brušenje [slika 12] s brzinom rotacije glavne ploče od 150 okretaja u minuti. Umjesto vode, za hlađenje i podmazivanje korišten je lubrikant čiji je dovod bio osiguran crnim crijevima prikazanim na slici 12. Za poliranje uzorka korištena je tkanina; u prvom koraku korištena je dijamantna pasta s granulacijom od 3 μm , dok je u drugom koraku primijenjena tekućina za poliranje s granulacijom od 0,03 μm .

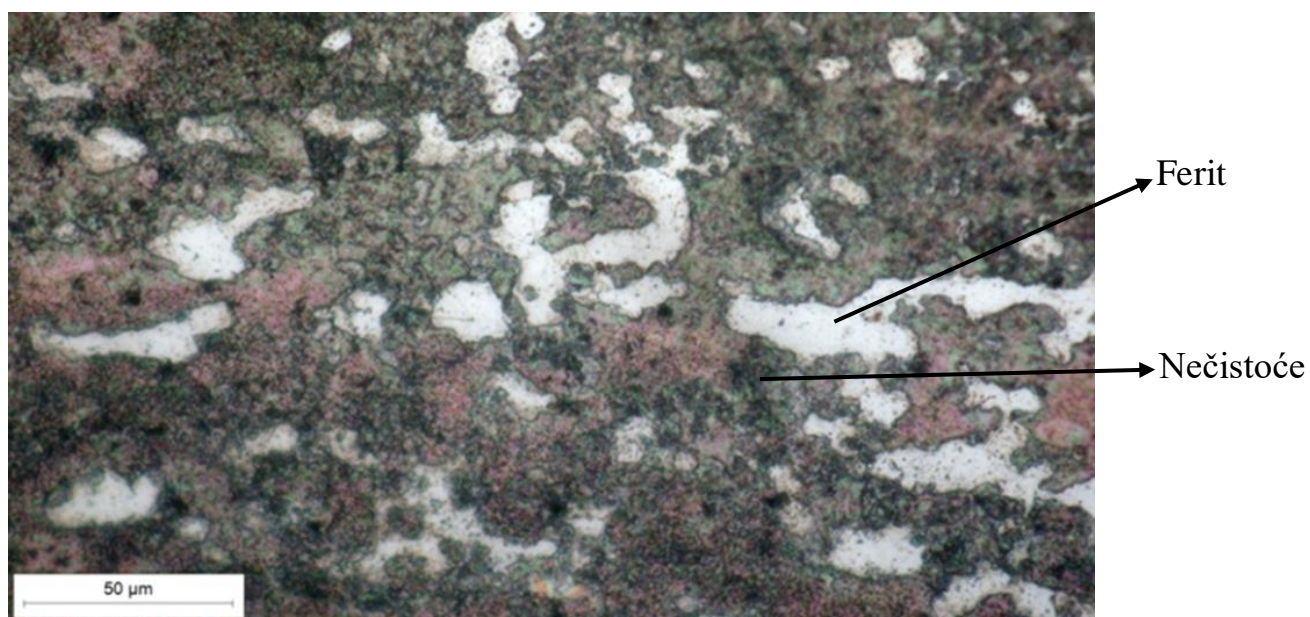
5.2.3. Analiza mikrostrukture

Mikrostrukturna analiza uzorka provedena je pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 [slika 13].

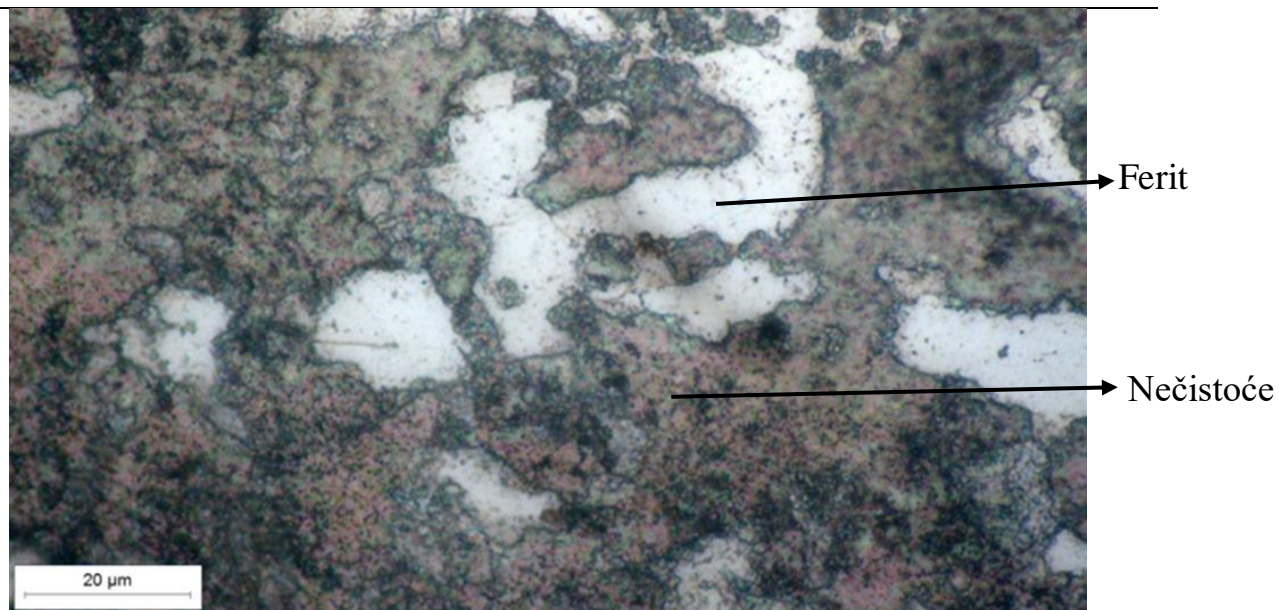


Slika 12. Mikroskop Olympus GX51

U analizi su korištena različita povećanja mikroskopa: 50x, 100x, 200x, 500x i 1000x. Pregledana su i dva različita područja uzorka kako bi se temeljito prikazale specifične karakteristike mikrostrukture. Snimanje i prijenos slika na računalo provedeni su zahvaljujući integriranoj kameri povezanoj sa svjetlosnim mikroskopom. Ova kamera omogućava neprekidno snimanje u stvarnom vremenu i visoku kvalitetu prijenosa slika na računalo.



Slika 14. Povećanje 500x



Slika 15. Povećanje 1000x

Na slikama 14 i 15 vidljiva je feritna mikrostruktura i nečistoće uslijed rada ispušnog lonca.

5.2.4. Mjerenje tvrdoće

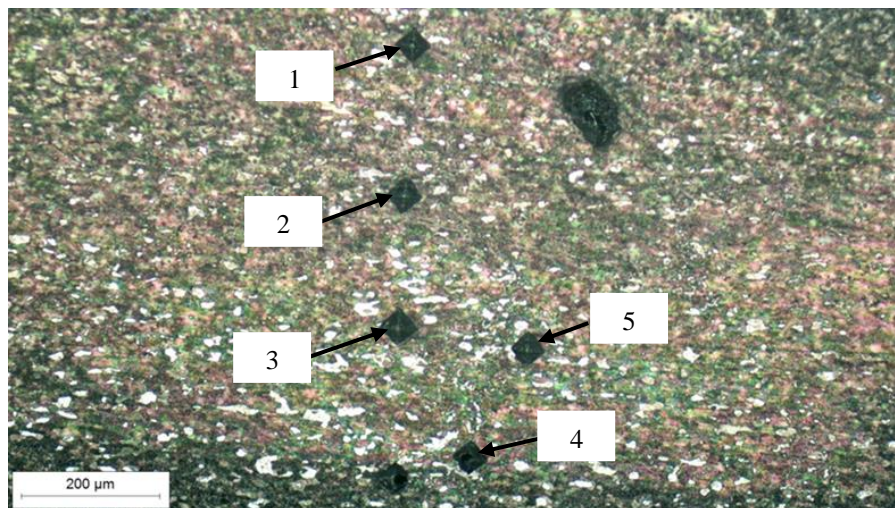
Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickers metodom – HV0,2 na ispitnom uzorku. Vickers metoda temelji se na primjeni opterećenja preko dijamantne piramide koja ima vrh pod kutom od 136° između nasuprotnih strana. Tijekom ispitivanja, piramida se pritisne na površinu uzorka s odabranim opterećenjem, u ovom slučaju 200 grama.

Za mjerenje semi- i mikrotvrdoće, koje zahtijevaju rad s malim opterećenjima, korišten je tvrdomjer tvrtke Lomo model PMT-3U4.2 prikazan na slici 16.



Slika 16. Tvrdomjer PMT-3U4.2

Otiske koje je indentor ostavio na ispitnom uzorku primjenom HV0,2 metode vidljivi su na slici 17, a dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 3.



Slika 17. Otisci indentora na ispitni uzorak

Tablica 2. Vrijednosti d_1 i d_2

d_1 (μm)	d_2 (μm)
309	483
310	480
306	483
310	480
311	479

gdje su:

$d_1 \rightarrow$ vrijednosti lijevog ruba,

$d_2 \rightarrow$ vrijednosti desnog ruba.

Nakon što su izmjerene vrijednosti dijagonale otiska d_1 i d_2 , nastalog utiskivanjem indentora, srednja vrijednost d izračunata je prema sljedećoj formuli (4):

$$(d_2 - d_1) \times 0,302 \quad (4).$$

Na temelju dobivene vrijednosti d , očitana je tvrdoća materijala prema Vickersovoj metodi za opterećenje od 200 g koristeći tablicu prikazanu na slici 18.

TAFEL 5
Belastung P = 200 g

Vickershärte HV

d in mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	1027	1017	1006	996	985	975	965	955	946	937
20	927	918	909	900	891	883	874	866	857	849
21	841	833	825	817	810	802	795	788	780	773
22	766	759	753	746	739	733	726	720	713	707
23	701	695	689	683	677	672	666	660	655	649
24	644	639	633	628	623	618	613	608	603	598
25	593	589	584	579	575	570	566	562	557	553
26	549	544	540	536	532	528	524	520	516	512
27	509	505	501	498	494	490	487	483	480	476
28	473	470	466	463	460	457	453	450	447	444
29	441	438	435	432	429	426	423	420	418	415
30	412	409	407	404	401	399	396	394	391	388
31	386	383	381	379	376	374	371	369	367	364
32	362	360	358	355	353	351	349	347	345	343
33	341	339	336	334	332	330	329	327	325	323
34	321	319	317	315	313	312	310	308	306	304
35	303	301	299	298	296	294	293	291	289	288
36	286	285	283	281	280	278	277	275	274	272
37	271	269	268	267	265	264	262	261	260	258
38	257	255	254	253	252	250	249	248	246	245
39	244	243	241	240	239	238	237	235	234	233
40	232	231	229	228	227	226	225	224	223	222
41	221	220	218	217	216	215	214	213	212	211
42	210	209	208	207	206	205	204	203	202	202
43	201	200	199	198	197	196	195	194	193	192
44	192	191	190	189	188	187	186	186	185	184
45	183	182	182	181	180	179	178	178	177	176
46	175	175	174	173	172	172	171	170	169	169
47	168	167	166	166	165	164	164	163	162	162
48	161	160	160	159	158	158	157	156	156	155
49	154	154	153	153	152	151	151	150	150	149
50	148	148	147	147	146	145	145	144	144	143
51	143	142	141	141	140	140	139	139	138	138
52	137	137	136	136	135	135	134	134	133	133
53	132	132	131	131	130	130	129	129	128	128
54	127	127	126	126	125	125	124	124	124	123
55	123	122	122	121	121	120	120	120	119	119
56	118	118	117	117	116	116	116	115	115	115
57	114	114	113	113	112	112	112	111	111	111
58	110	110	109	109	108	108	108	108	107	107
59	107	106	106	105	105	105	104	104	104	103
60	103	103	102	102	101	101	101	100	100	100

Slika 18. Tablica za očitavanje tvrdoće za HV0,2 metodu

Izračunate i očitane vrijednosti [slika 18] dane su u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu

Otisak	Vrijednost
1	135
2	141
3	130
4	141
5	144
Srednja vrijednost	138

Izmjerena srednja vrijednost tvrdoće je 138 HV0,2.

6. Zaključak

Analizom mikrostrukture i mjerenjem tvrdoće utvrđeno je da je ispušni lonac izrađen od feritnog nehrđajućeg čelika. Osim što analiza mikrostrukture i izmjerena tvrdoća potvrđuju prisutnost feritnog nehrđajućeg čelika, dodatni pokazatelj je i magnetski ispitnog uzorka, koja ukazuje na feritnu strukturu materijala. Ovaj materijal, poznat po svojoj visokoj otpornosti na koroziju i dobrim mehaničkim svojstvima, pokazuje se kao izuzetno prikladan za primjenu u ispušnim sustavima koji su izloženi visokim temperaturama i agresivnim okolišnim uvjetima. Prosječna izmjerena tvrdoća od HV 138 odgovara karakteristikama feritnih nehrđajućih čelika, što potvrđuje otpornost i trajnost ovog materijala u zahtjevnim uvjetima rada ispušnih sustava. Korištenje feritnog nehrđajućeg čelika u ispušnim sustavima donosi brojne prednosti, uključujući povećanu otpornost na koroziju i trošenje te produženi vijek trajanja komponenti, što rezultira manjim potrebama za održavanjem i zamjenom dijelova. Ovi faktori ne samo da smanjuju operativne troškove, već pridonose i održivosti vozila smanjenjem potrebe za proizvodnjom zamjenskih dijelova i nižim ukupnim emisijama CO₂ tijekom životnog vijeka vozila.

LITERATURA

- [1] Richard Gunderman: Auto innovator in the Racing Capital of the World: Milton Reeves, Special to Indianapolis Business Journal – IBJ, 2021
- [2] <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/eugene-houdry/>, datum pristupa: 17.9.2024
- [3] Ikpe Aniekan E., Orhorhoro Ejiroghene Kelly, Gobir Abdulsamad: Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software, Department of Mechanical Engineering Coventry University, Priory Street, CV15FB, West Midlands, UK, International journal of engineering technologies – IJET, 2017
- [4] Richard Fischer, Rolf Gscheidle, Tobias Gscheidle, Uwe Heider, Berthold Hohmann, Achim van Huet, Wolfgang Keil, Rainer Lohuis, Jochen Mann, Bernd Schlögl, Alois Wimmer, Günter Wormer: Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, 30. neubearbeitete Auflage, 2013
- [5] <https://koolwrap.com.au/how-hot-does-my-exhaust-get/>, datum pristupa: 28.7.2024
- [6] <https://autoprotoway.com/car-exhaust-manifold/>, 28.7.2024.
- [7] <https://tundraheadquarters.com/short-vs-long-tube-headers/>, datum pristupa: 29.7.2024.
- [8] Yamagata, H. (2005). The turbocharger and the exhaust manifold. The Science and Technology of Materials in Automotive Engines, 248–260.
- [9] D. Babić, Karakterizacija aluminiziranih slojeva nehrđajućih čelika, Diplomski rad, FSB, 2015
- [10] <https://partsavatar.ca/blog/exhaust/the-ultimate-exhaust-manifold-buying-guide/>, datum pristupa: 31.7.2024
- [11] <https://www.bar-tek.com/exhaust-manifolds>, datum pristupa: 2.8.2024.
- [12] <https://exhaustsystemsdirect.com.au/blogs/news/manifold-vs-extractors>, datum pristupa: 3.8.2024
- [13] Dan Cordon; Charles Dean; Judi Steciak, Steven Beyerlein: One-dimensional engine modeling and validation using ricardo wave, National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho, Final Report KLK434-BN07-09, 207
- [14] <https://catsays.blogspot.com/2018/06/is-catalytic-converter-important-how.html>, datum pristupa: 3.8.2024
- [15] https://www.as-sl.com/pdf/en/info_catalizador.pdf, datum pristupa: 4.8.2024.

- [16] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Kinetics/07%3A_Case_Studies-_Kinetics/7.01%3A_Catalytic_Converters](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/07%3A_Case_Studies-_Kinetics/7.01%3A_Catalytic_Converters), datum pristupa: 5.8.2024
- [17] <https://www.motortrend.com/how-to/resonator-vs-muffler/>, datum pristupa: 9.8.2024.
- [18] Shubham Pal, Tejpreet Singh Golan, Vinod Kumar, Virag Jain, Nilesh Ramdas, O. P. Sharma: Design of a Muffler & Effect of Resonator length for 3 Cylinder SI Engine, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2014
- [19] Mia Bevacqua :Symptoms of a Failing Exhaust Resonator, datum pristupa: 12.8.2024.
- [20] <https://autoportal.hr/servis/savjeti/lambda-sonda-najvazniji-senzor-motora-mozak-ubrizgavanja-i-katalizatora-ovo-je-5-bitnih-cinjenica/>, datum pristupa: 12.8.2024.
- [21] <https://synergist.aiha.org/201605-the-chemistry-of-oxygen-sensors>, datum pristupa: 18.8.2024.
- [22] <https://www.my-cardictionary.com/electronics/oxygen-sensor.html>, datum pristupa: 21.8.2024.
- [23] <https://www.profusionexhausts.com/exhaust-muffler-silencer-304-stainless-steel-4-inch-5-x-8-oval-x-14-inch/>, datum pristupa: 21.8.2024.
- [24] A.Ajaykanth, G.Aravinth, C.Bharath, G.Gokulnath and R. Govindaraj: Design and Fabrication of Car Exhaust Muffler, Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 8, No. 2, 2018
- [25] <https://roberts.com.ph/blog/7-common-types-mufflers/>
- [26] <https://autoprotoway.com/car-muffler/>, datum pristupa: 24.8.2024.
- [27] <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards>, datum pristupa: 26.8.2024.
- [28] <https://www.epa.gov/greenvehicles/smog-vehicle-emissions>, datum pristupa: 30.8.2024.
- [29] <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-emission-vehicle-program/about>, datum pristupa: 30.8.2024.
- [30] <https://sohatoos.com/EN/EMARK>, datum pristupa: 4.9.2024.
- [31] <https://www.zakon.hr/z/125/Zakon-o-za%C5%A1titi-od-buke>
- [32] <https://autoexhaustandtyres.co.uk/news/common-exhaust-problems/>, datum pristupa: 6.9.2024
- [33] Cramer, Stephen D.; Covino, Bernard S., Jr. ASM Handbook, Volume 13C - Corrosion: Environments and Industries, ASM International, 2006
- [34] <https://www.tacomaworld.com/threads/catalytic-converter-exhaust-pipe-repair-options.759499/>

-
- [35] <https://autoexhaustandtyres.co.uk/news/common-exhaust-problems/>, datum pristupa: 6.9.2024.
- [36] The Motor Company: How do I know if my exhaust needs repair or replacement, datum pristupa: 6.9.2024.
- [37] <https://www.samsweldinginc.com/3-common-reasons-why-weld-integrity-can-weaken-prematurely117d4c94>, datum pristupa: 7.9.2024.
- [38] Madeleine Ekström: Oxidation and corrosion fatigue aspects of cast exhaust manifolds, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, 2015
- [39] K. Yogesh, Ananthesha, N. C. Mahendra Babu: Assessment of Thermo-Mechanical Fatigue Performance of an Exhaust Manifold through Simulation, Indian Journal of Science and Technology, Vol 10(12), 2017

PRILOZI

I. CD-R disc