

Analiza havarije turbopunjača gospodarskog vozila

Ćorić, Zlatko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:516952>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zlatko Ćorić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Zlatko Čorić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Darku Landeku, dipl.ing. na stručnoj pomoći prilikom izrade ovog rada te obitelji na podršci tijekom studiranja.

Zlatko Ćorić



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 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Zlatko Čorić** JMBAG: **0035227978**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza havarije turbopunjača gospodarskog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of a commercial vehicle turbocharger breakdown**

Opis zadatka:

Primjena turbopunjača u motorima s unutrašnjim izgaranjem omogućuje povećanje snage, smanjenje potrošnje goriva i emisije štetnih plinova. Komponente turbopunjača izložene su u radu mehaničkim i toplinskim opterećenjima te procesima trošenja. U teorijskom dijelu rada treba opisati konstrukcijske karakteristike turbopunjača Diesel motora, materijale i proizvodne postupke za izradu rotora turbine i kompresora te najčešće kvarove i oštećenja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba analizirati oštećenja na izabranom primjeru istrošenog turbopunjača izuzetom iz gospodarskog vozila, ispitati kemijski sastav, mikrostrukturu i tvrdoću dijelova turbopunjača i opisati moguće uzroke trošenja i havarije. Na temelju rezultata provedenih ispitivanja preporučiti mjere za smanjenje trošenja i sprječavanje havarije turbopunjača.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	6
POPIS OZNAKA	7
SAŽETAK.....	8
SUMMARY	9
1. UVOD.....	11
2. POVIJEST RAZVOJA I PRIMJENE TURBOPUNJAČA	12
3. PRINCIP RADA TURBOPUNJAČA	15
3.1. Kompresija smjese usisnih plinova motora	15
3.2. Pogon kompresora turbinom na ispušne plinove	16
4. DIJELOVI TURBOPUNJAČA	18
4.1. Turbina	18
4.2. Kompresor.....	22
4.3. Kućište ležaja i ležaji	25
5. UZROCI KVAROVA TURBOPUNJAČA.....	27
5.1. Kvar zbog prodora stranog predmeta.....	27
5.2. Kvar zbog onečišćenog ulja	28
5.3. Kvar zbog lošeg podmazivanja	30
5.4. Kvar zbog visoke temperature ispušnih plinova	33
5.5. Kvar zbog prekomjerne brzine vrtnje	35
6. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA TURBOPUNJAČA.....	36
6.1. Ispitivanje tvrdoće materijala.....	36
6.2. Ispitivanje kemijskog sastava metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije...	37
7. ANALIZA ISTROŠENOG TURBOPUNJAČA	40
7.1. Sklop turbopunjača nakon havarije.....	40

8. ANALIZA TROŠENJA KOMPRESORA TURBOPUNJAČA.....	45
8.1. Kemijski sastav kompresora određen metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije	45
8.2. Mjerenje tvrdoće	47
8.3. Mikrostruktura kompresora.....	50
8.4. Trošenje kompresora.....	52
9. ANALIZA TROŠENJA TURBINE TURBOPUNJAČA.....	58
9.1. Kemijski sastav turbine određen metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije 58	
9.2. Mjerenje tvrdoće kućišta turbine.....	59
9.3. Mikrostruktura turbine turbopunjača	60
9.4. Trošenje turbine	61
9.5. Mikrostruktura i tvrdoća spojnog vratila	64
10. DISKUSIJA REZULTATA.....	66
11. ZAKLJUČAK.....	67

POPIS SLIKA

Slika 1. Alfred Büchi.....	12
Slika 2. Turbopunjač [19].....	13
Slika 3. Chevrolet Corvair Monza [20].....	13
Slika 4. Mercedes-Benz 300 SD (W116) [21]	14
Slika 5. Turbopunjači za brodogradnju [34]	14
Slika 6. Princip rada turbopunjača [22].....	16
Slika 7. Dijelovi sustava turbopunjenja.....	17
Slika 8. Dijelovi turbopunjača [35].....	18
Slika 9. Rotor turbine i kompresora spojeni vratilom [31]	18
Slika 10. Rotori turbina i spojna vratila [36].....	19
Slika 11. Analiza raspodjele temperature rotora kompresora i rotora turbine primjenom metode konačnih elemenata [25].....	19
Slika 12. Mehanička svojstva superlegure Inconel 713C u ovisnosti u temperaturi [18].....	21
Slika 13. Kućišta turbine od nodularnog lijeva [15]	22
Slika 14. Rotor kompresora izrađen postupkom 5-osnog glodanja [26].....	22
Slika 15. Rotor kompresora s radijalnim lopaticama [15]	23
Slika 16. Rotor kompresora sa stalnim promjerom lopatica [15]	23
Slika 17. Rotor s naizmjenično kraćom lopaticom [15].....	24
Slika 18. Rotor s unatrag zakrivljenim lopaticama [15].....	24
Slika 19. Odljevnik kućišta kompresora prije strojne obrade [23].....	25
Slika 20. Ležajevi i brtve za turbopunjače hidrodinamičkog sustava podmazivanja [28].....	25
Slika 21. Kuglični sustav ležajeva za turbopunjače [27]	26
Slika 22. Kućište ležaja od sivog lijeva [30].....	26
Slika 23. Oštećenja lopatica na rotoru kompresora uzrokovana prodorom stranog tijela [15]	27
Slika 24. Abrazijska oštećenja čahure ležaja [11].....	28
Slika 25. Oštećeni rotor turbine nakon kontakta s kućištem [11]	29
Slika 26. Tragovi trošenja na spojnom vratilu [11].....	29
Slika 27. Animacija podmazivanja turbopunjača motornim uljem [24]	30
Slika 28. Začepljenje vodova uslijed karbonizacije ulja [11]	31

Slika 29. CFD analiza turbopunjača s prikazom raspodjele temperatura u radu turbopunjača	
[10]	34
Slika 30. Pukotine na kućištu turbine uslijed visokih temperatura [15].....	34
Slika 31. Oštećenja na rotoru kompresora	35
Slika 32. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [2]	36
Slika 33. Rendgenska fluorescencija [32]	37
Slika 34. Prijenosni ručni uređaj za metodu rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF)	
[29]	38
Slika 35. Turbopunjač gospodarskog vozila	40
Slika 36. Odmašćivanje kućišta kompresora u sredstvu za odmašćivanje.....	41
Slika 37. Oštećeni središnji dijelovi turbopunjača	41
Slika 38. Karakteristični lom spojnog vratila.....	42
Slika 39. Lom rotora kompresora.....	42
Slika 40. Dijelovi turbine istrošenog turbopunjača	43
Slika 41. Dijelovi turbopunjača za analizu.....	44
Slika 42. XRF analiza rotora kompresora	45
Slika 43. XRF analiza kućišta kompresora	46
Slika 44. Tvrdomjer INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B povezan s računalom	48
Slika 45. Mjerenje tvrdoće rotora kompresora metodom Vickers	49
Slika 46. Mikrostruktura kućišta kompresora, povećanje 200x	50
Slika 47. Mikrostruktura kućišta kompresora , povećanje 1000x	50
Slika 48. Mikrostruktura rotora kompresora, povećanje 200x.....	51
Slika 49. Mikrostruktura rotora kompresora, povećanje 1000x.....	51
Slika 50. Lom rotora kompresora.....	52
Slika 51. Lomna površina rotora kompresora (pogled po uzdužnoj osi)	52
Slika 52. Lomna površina rotora kompresora (pogled u tlocrtu)	53
Slika 53. Stereomikroskop Mantis Elite-Cam HD	53
Slika 54. Lomna površina rotora snimljena stereomikroskopom, povećanje 8x	54
Slika 55. Oštećenja na otvoru kućišta kompresora	54
Slika 56. Detalj A oštećenja na otvoru kućišta kompresora.....	55
Slika 57. Oštećene lopatice kompresora snimljene stereomikroskopom, povećanje 8x	55
Slika 58. Abrazija oko otvora na kućištu kompresora	56
Slika 59. Detalj abrazijskog oštećenja na kućištu kompresora	56
Slika 60. Površina kućišta kompresora s tragovima abrazijskog trošenja, povećanje 8x	57

Slika 61. Mikrostruktura kućišta turbine, povećanje 200x.....	60
Slika 62. Mikrostruktura kućišta turbine, povećanje 1000x.....	60
Slika 63. Trošenje lopatica turbine.....	61
Slika 64. Trošenje lopatica turbine snimljeno stereomikroskopom	61
Slika 65. Lomna površina spojnog vratila.....	62
Slika 66. Lomna površina vratila snimljena stereomikroskopom, povećanje 8x.....	62
Slika 67. Abrazijska oštećenja spojnog vratila.....	63
Slika 68. Abrazija spojnog vratila snimljena stereomikroskopom, povećanje 8x	63
Slika 69. Martenzitna mikrostruktura spojnog vratila, povećanje 200x	64
Slika 70. Martenzitna mikrostruktura spojnog vratila, povećanje 1000x	65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav superlegure Inconel 713C na bazi nikla [6]	20
Tablica 2. Kemijski sastav superlegure GMR 235 (UNS) na bazi nikla [5]	20
Tablica 3. Kemijski sastav nodularnog lijeva GJSA – XNiSiCr 35-5-2 [33]	21
Tablica 4. Područje primjene multigradnih motornih ulja u ovisnosti o temperaturi [3].....	33
Tablica 5. Rezultati analize kemijskog sastava rotora kompresora XRF metodom.....	46
Tablica 6. Rezultati XRF analize kućišta kompresora	47
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na kućištu kompresora.....	48
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti tvrdoće rotora kompresora	49
Tablica 9. Rezultati XRF analize rotora turbine	58
Tablica 10. Rezultati XRF analize kućišta turbine.....	59
Tablica 11. Izmjerene vrijednosti tvrdoće spojnog vratila.....	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	m/s	brzina svjetlosti
d	mm	srednja vrijednost dijagonala baze piramide
h	J·s	Planckova konstanta
m_{ref}	kg	referentna masa zraka
$m_{z,izg}$	kg	masa svježeg zraka u cilindru
n	s^{-1}	brzina vrtnje
p_e	Pa	srednji efektivni tlak
ν	mm^2/s	kinematička viskoznost
z	-	broj cilindara
F	N	primijenjena sila
H_d	J/kg	donja ogrijevna vrijednost goriva
HV	-	tvrdoća po Vickersu
P_e	kW	efektivna snaga motora
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	konvencionalna granica razvlačenja
S	s^{-1}	brzina smicanja pokretnih ravnina u tekućini
S	mm^2	površina šuplje piramide otisnute u materijal
T	-	broj taktova
V_H	m^3	radni volumen cilindra
Z_o	-	stehiometrijska količina zraka za izgaranje
η_e	-	efektivni stupanj učinkovitosti
λ_{pu}	-	stupanj punjenja
$\rho_{z,o}$	kg/m^3	gustoća zraka kod stanja okolne atmosfere
η	$Pa \cdot s$	dinamička ili apsolutna viskoznost
λ	-	faktor zraka za izgaranje
λ	m	karakteristična valna duljina
ρ	kg/m^3	gustoća ulja
τ	N/mm^2	smično naprezanje

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana je povijest razvoja i primjene turbopunjača, princip rada motora s turbopunjačem te dijelovi turbopunjača, s naglaskom na materijalima i proizvodnim postupcima za njihovu izradu i najčešćim kvarovima.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je havarija turbopunjača izuzetog iz gospodarskog vozila. Na istrošenim dijelovima kompresora i turbine turbopunjača provedena je kemijska analiza metodom fluorescentne spektrometrije, ispitivanje tvrdoće metodom Vickers te analiza mikrostrukture svjetlosnom mikroskopijom.

U diskusiji rezultata je opisan slijed događaja koji su prethodili havariji turbopunjača i glavni uzrok, lom spojnog vratila koji je u konačnici rezultirao havarijom i prestankom rada turbopunjača.

Ključne riječi: turbopunjač, havarija, analiza trošenja, analiza loma

SUMMARY

The theoretical part of the paper describes the history of the development and application of turbochargers, the principle of operation of engines with turbochargers, and parts of turbochargers, with an emphasis on materials and production procedures for their manufacture, and the most common failures of turbochargers.

In the experimental part of the work, the failure of a turbocharger removed from a commercial vehicle was analyzed. Chemical analysis using the fluorescence spectrometry method, hardness testing using the Vickers method, and microstructure analysis using light microscopy were performed on the worn parts of the compressor and turbocharger turbine.

In the discussion of the results, the sequence of events preceding the turbocharger failure and the main cause, the fracture of the connecting shaft, which ultimately resulted in the failure and cessation of operation of the turbocharger, are described.

Keywords: turbocharger, breakdown, analysis of wear, analysis of fracture

TEORIJSKI DIO

1. UVOD

Današnja industrija proizvodnje motornih vozila nudi široki izbor vrsta, tipova i kategorija vozila. s velikom složenošću mehanizama i sklopova, koji se kontinuirano usavršavaju kako bi njihovi proizvođači održali konkurentnost na tržištu.

Konkurentnost vozila na tržištu uvjetovana je karakteristikama, pouzdanošću, ekonomičnošću i sigurnosti vozila. Proizvođači vozila nastoje ostvariti konkurentnost uvođenjem novih mehaničkih, elektroničkih i mehatroničkih sustava u svakoj novoj seriji vozila. Jedan od takvih mehaničkih sustava, koji je omogućio značajno poboljšanje karakteristika (povećanje snage, smanjenje potrošnje goriva i emisije štetnih plinova) motornih cestovnih vozila je turbopunjač.

Turbopunjač omogućuje povećanje snage motora bez promjene brzine vrtnje. Suvremene konstrukcije turbopunjača se odlikuju visokim stupnjem pouzdanosti i dugotrajnim eksploatacijskim vijekom. Kao i ostali sklopovi u motornom vozilu, turbopunjač je podložan kvarovima koji se, uz upute proizvođača i pravilnim održavanjem, mogu izbjeći ili u krajnjem slučaju smanjiti.

U radu će se analizirati havarija turbopunjača dostavnog cestovnog vozila, slijed događaja koji je doveo do kvara i svojstva materijala glavnih dijelova turbopunjača.

2. POVIJEST RAZVOJA I PRIMJENE TURBOPUNJAČA

Povijest turbopunjača je duga koliko i povijest motora s unutarnjim izgaranjem. Krajem 20. stoljeća njemački izumitelji Gottlieb Daimler i Rudolf Diesel istraživali su mogućnosti povećanja snage motora i smanjenje potrošnje goriva pomoću kompresije zraka.

Turbopunjač pogonjen strujnom ispušnih plinova, izumio je švicarski inženjer strojarstva Alfred Büchi (slika 1.), čiji se patent počeo koristiti 1905. godine. Prvi prototip turbopunjača dovršen je 1915. godine s ciljem prevladavanja gubitka snage motora zrakoplova zbog smanjene gustoće zraka na velikim visinama.



Slika 1. Alfred Büchi

Još jedan rani patent za turbopunjače prijavio je 1916. francuski izumitelj Auguste Rateau, za ugradnju na motorima Renault koje su tada koristili francuski borbeni zrakoplovi.

Prva komercijalna primjena turbopunjača bila je 1925. godine kada je Alfred Büchi razvio turbopunjač za 10-cilindrični dizelski motor koji se ugradio u njemačke putničke brodove Preussen i Hansestadt Danzig. Dodavanje turbopunjača znatno je povećalo snagu brodskih motora. Atmosferske verzije motora razvijale su 1750 KS, dok je verzija s turbopunjačem razvijala oko 2500 KS.

Tijekom Drugog svjetskog rata brojni lovci i bombarderi bili su opremljeni turbopunjačima što ih je učinilo još bržima i učinkovitijima.

Švicarska tvrtka pod nazivom Schweizer Maschinenfabrik Saurer 1930-ih razvila je prve turbopunjače za komercijalne dizelske kamione, ali nisu bili posebno uspješni.

Tek su 1960-ih turbopunjači za kamione postali značajno zastupljeni u primjeni, a tipičan izgled turbopunjača prikazan je na donjoj slici (slika 2.).

Tijekom 1950-ih, tehnologija turbopunjenja se razvijala i dalje usavršavala, što je dovelo do sve veće upotrebe turbopunjenih motora na teškim vozilima poput bagera, buldožera i sl..



Slika 2. Turbopunjač [19]

Prvi osobni automobili s turbopunjačem pojavili su se tek 60-ih godina, a to su modeli Chevrolet Corvair Monza (slika 3.) i Oldsmobile Jetfire koji su predstavljeni 1962. Zbog problema s pouzdanošću, vrlo brzo su povučeni s tržišta.



Slika 3. Chevrolet Corvair Monza [20]

Prvi putnički automobil s dizelskim motorom s pouzdanim turbopunjačem bio je Mercedes Benz 300 SD (tvornička oznaka W116) s 5-cilindričnim OM617 motorom, predstavljen u SAD-u 1978. godine za sjevernoameričko tržište (slika 4.). Zahvaljujući turbopunjaču, model se odlikovao niskim emisijama štetnih plinova te boljim voznim karakteristikama.



Slika 4. Mercedes-Benz 300 SD (W116) [21]

Turbopunjači su danas široko raspostranjeni pa se osim u automobilskoj industriji (automobili, dostavna vozila, kamioni, autobusi) primjenjuju i u zrakoplovstvu, brodogradnji (slika 5.) kao i za industrijske motore.



Slika 5. Turbopunjači za brodogradnju [34]

3. PRINCIP RADA TURBOPUNJAČA

3.1. Kompresija smjese usisnih plinova motora

Svrha kompresije usisnih plinova (tzv. nabijanja) motora je povećanje snage bez promjene radnog volumena i brzine vrtnje. Primjena kompresije plinova u usisnoj grani motora kod vožnje automobila ili leta aviona na većim nadmorskim visinama kompenzira malu gustoću zraka i omogućuje razvijanje normalne snage motora.

Snaga motora definira se prema jednadžbi [1]:

$$P_e = z \cdot V_H \cdot p_e \cdot \frac{2n}{T} \quad (1)$$

gdje je P_e – efektivna snaga motora (kW), z - broj cilindara, V_H – radni volumen cilindra (m^3), p_e – srednji efektivni tlak (Pa), n – brzina vrtnje (s^{-1}) i T – broj taktova (2 ili 4).

Iz jednadžbe (1) se vidi da pri konstantnoj brzini vrtnje, efektivna snaga motora ovisi samo o srednjem efektivnom tlaku. Srednji efektivni tlak kod Diesel motora definira se prema slijedećoj jednadžbi [1]:

$$p_{e,diesel} = \eta_e \cdot \lambda_{pu} \cdot \rho_{Z,o} \cdot \frac{H_d}{\lambda Z_o} \quad (2)$$

gdje je: η_e – efektivni stupanj učinkovitosti, λ_{pu} – stupanj punjenja, $\rho_{Z,o}$ – gustoća zraka kod stanja okolne (standardne) atmosfere, H_d – donja ogrijevna vrijednost goriva, λ – faktor zraka za izgaranje, Z_o – stehiometrijska količina zraka za izgaranje.

Za zadano gorivo, srednji efektivni tlak ovisi o stupnju punjenja koje se definira prema jednadžbi (3):

$$\lambda_{pu} = \frac{m_{z,izg}}{m_{ref}} \quad (3)$$

gdje je $m_{z,izg}$ – masa svježeg zraka u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila, m_{ref} – referentna masa zraka koja bi stala u radni volumen cilindra kod stanja standardne atmosfere. Povećanjem tlaka na usisu (nabijanjem) motora povećava se masa zraka u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila te posljedično dolazi do povećanja stupnja punjenja.

Prema jednadžbi za srednji efektivni tlak (2), veći stupanj punjenja donosi i veći srednji efektivni tlak te veću efektivnu snagu motora.

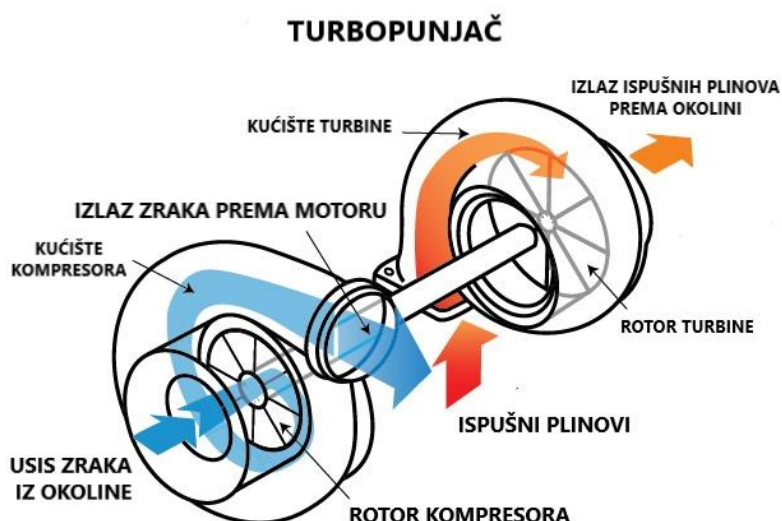
Kod svih vrsta nabijanja motora pomoću kompresora zraka, komprimirani se zrak nakon kompresora u pravilu vodi kroz međuhladnjak, da bi mu se snizila temperatura. Na taj se način povećava punjenje cilindra i smanjuje toplinsko opterećenje motora.

Razlikuju se četiri načina povećanja tlaka na usisu motora:

1. Rezonantno nabijanje ili inercijsko natpunjenje
2. Mehanički pogon kompresora
3. Pogon kompresora turbinom pogonjenom ispušnim plinovima (turbopunjač)
4. Comprex-nabijanje

3.2. Pogon kompresora turbinom na ispušne plinove

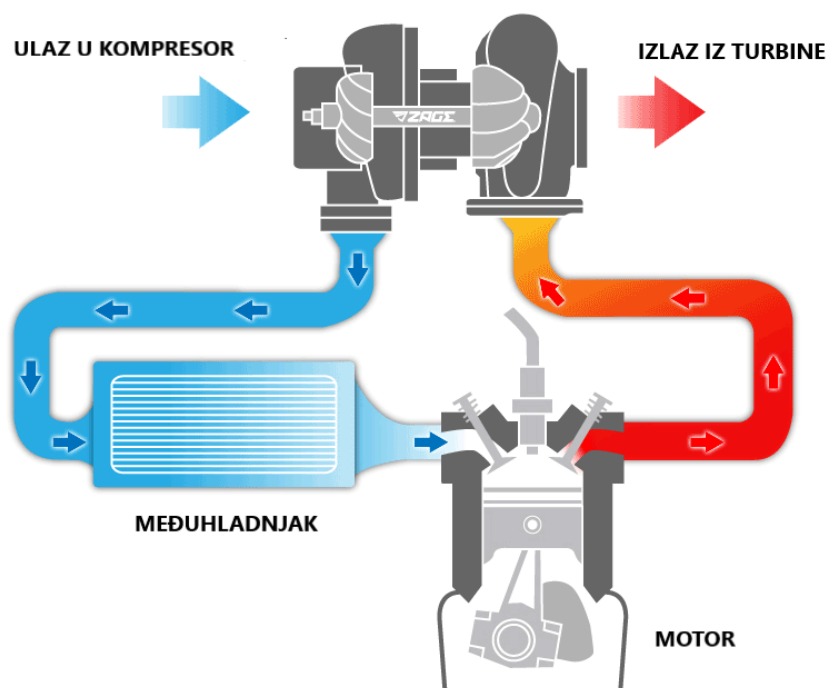
Kod današnjih cestovnih motornih vozila uglavnom se primjenjuje pogon kompresora usisne grane turbinom pogonjenom ekspanzijom ispušnih plinova (slika 6.). Zbog masovne proizvodnje cijena turbopunjača je mala, a njegova jednostavna konstrukcija je dostigla visok stupanj pouzdanosti. Za povećanje tlaka usisnih plinova primjenjuju se tri vrste turbopunjača: turbopunjači sa statičkim tlakom, turbopunjači s dinamičkim tlakom te turbopunjači sa statičkim i dinamičkim tlakom.



Slika 6. Princip rada turbopunjača [22]

U uobičajenoj izvedbi turbopunjač se sastoji od kompresora i turbine povezanih vratilom. Princip rada turbopunjača je sljedeći (slika 7.). Zrak ulazi u kompresor gdje dolazi do politropske kompresije zraka, a porastom tlaka raste i temperatura. Zbog toga se danas u turbopunjače ugrađuje međuhladjak (eng. *intercooler*). Hlađenjem zraka povećava se gustoća, a to posljedično znači veću masu zraka u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila, što dodatno povećava stupanj punjenja.

Nakon izgaranja ispušni plinovi izlaze iz cilindra s visokom temperaturom i kinetičkom energijom i politropno ekspanziraju u turbini. Politropna ekspanzija ispušnih plinova pokreće rotor turbine i preko vratila povezani rotor kompresora. Nakon politropne ekspanzije tlak i temperatura ispušnih plinova se smanjuju.

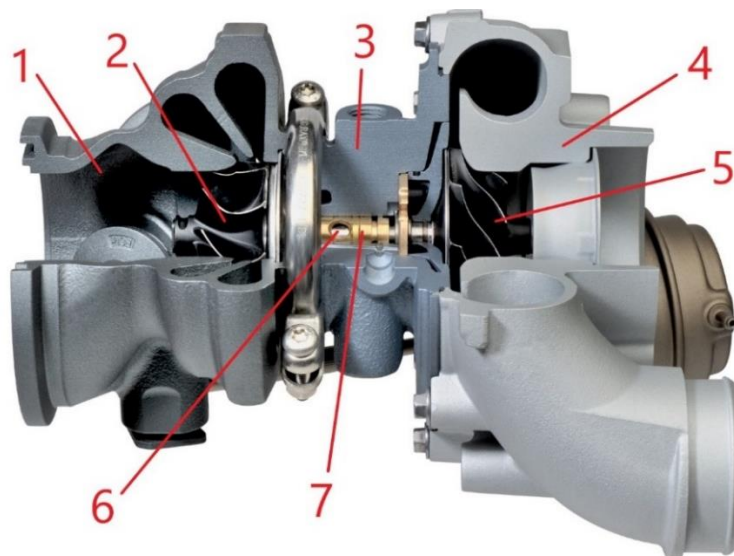


Slika 7. Dijelovi sustava turbopunjenja

Za optimalan rad motora od velike je važnosti ispravan odabir turbopunjača, optimalne veličine turbine i kompresora.

4. DIJELOVI TURBOPUNJAČA

Glavni dijelovi turbopunjača prikazani su i označeni na slici 8.: 1- kućište turbine, 2 – rotor turbine, 3 - kućište ležaja, 4 - kućište kompresora, 5 – rotor kompresora, 6 – ležajevi i 7 - spojno vratilo. Pomoćni dijelovi su ležajevi, brtve i komponente za kontrolu protoka ulja.



Slika 8. Dijelovi turbopunjača [35]

4.1. Turbina

Turbina je središnji dio turbopunjača, a sastoji se od dva glavna dijela, rotora i statora s kućištem. Rotor turbine spojen je preko vratila s rotorom kompresora. Sklop rotor turbine – spojno vratilo - rotor kompresora (slika 9.) često jedan je od najkritičnijih te posljedično i najskupljih dijelova turbopunjača.



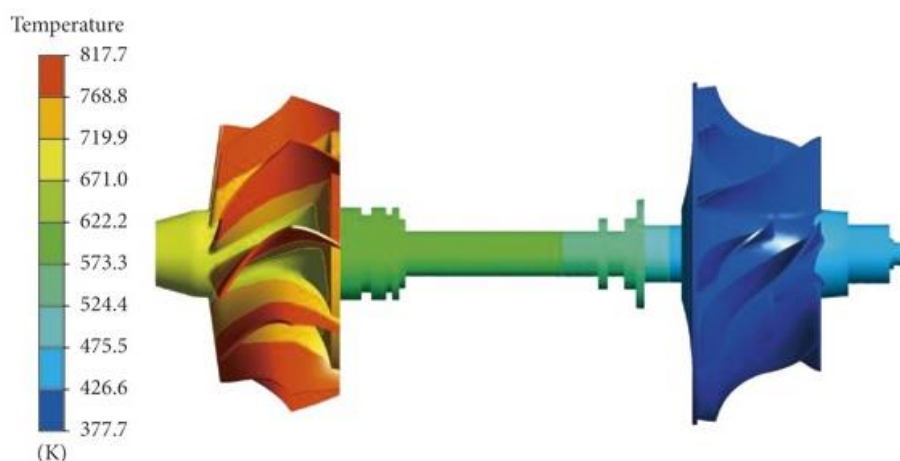
Slika 9. Rotor turbine i kompresora spojeni vratilom [31]

Turbinsko vratilo je indukcijski kaljeno u području rukavca ležaja. Kod primjena u zrakoplovstvu, rotor turbine i vratilo su izrađeni iz jednog komada, a kod turbopunjača za automobilsku industriju i za ostale primjene, vratilo i rotor turbine (slika 10.) su spojeni postupkom zavarivanja (postupcima zavarivanja elektronskim snopom ili zavarivanja trenjem). U današnjoj praksi, uglavnom se koristi zavarivanje trenjem zbog visoke proizvodnosti postupka [15].



Slika 10. Rotori turbina i spojna vratila [36]

Na kraju turbinskog vratila se izrađuje navoj za spajanje rotora kompresora. Navoj se izrađuje isključivo postupkom valjanja kako bi se održala sitnozrnata mikrostruktura materijala pri čemu dolazi i do povećanja čvrstoće materijala deformacijom u hladnom stanju.



Slika 11. Analiza raspodjele temperature rotora kompresora i rotora turbine primjenom metode konačnih elemenata [17, 25]

Rotor turbine se najčešće izrađuju postupkom lijevanja, a budući da je izloženo iznimno visokim temperaturama ispušnih plinova (slika 11.), za izradu se koriste precipitacijske očvrstljive superlegure na bazi nikla, poput legura Inconel 713C ili GMR 235.

Superlegure su višekomponentni sustavi na osnovi Ni, Co, odnosno Fe i Ni s visokim udjelima Cr, te s manjim udjelima visokotaljivih Mo, W te Ti i Al. Superlegure se koriste pri izradi rotora turbine zbog otpornosti na puzanje, visokotemperaturne oksidacije te povoljnih mehaničkih svojstava na povišenim i visokim temperaturama. Tablica 1. prikazuje kemijski sastav superlegure Inconel 713C, a tablica 2. prikazuje kemijski sastav superlegure GMR 235.

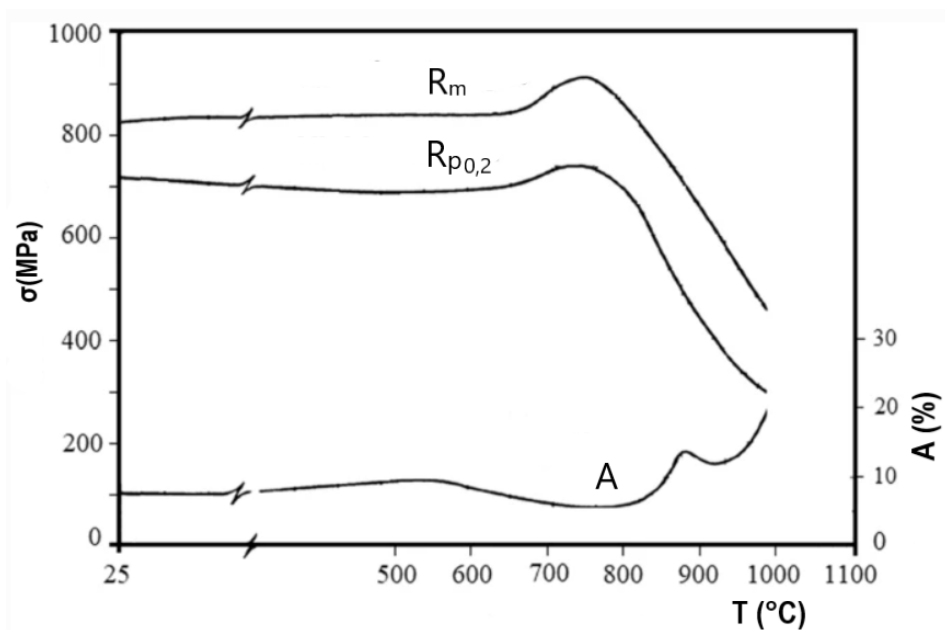
Tablica 1. Kemijski sastav superlegure Inconel 713C na bazi nikla [6]

Legirni element	Maseni udjel (%)
C	0,08 – 0,20
Mn	do 0,25
Si	do 0,50
Cr	12,0 – 14,0
Mo	3,80 – 5,20
Cb + Ta	1,80 – 2,80
Al	5,50 – 6,50
Ti	0,50 – 1,00
Cu	do 0,50
Fe	do 2,50
B	0,005 – 0,015
Zr	0,05 – 0,15

Tablica 2. Kemijski sastav superlegure GMR 235 (UNS) na bazi nikla [5]

Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Al	Ti	Fe	Mo	B
Maseni udjel (\leq %)	0,15	0,30	0,13	15,5	3,00	2,0	10	5,25	0,06

Mehanička svojstva, vlačna čvrstoća (R_m), konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) te istežljivost (A) precipitacijski očvrstljive superlegure Inconel 713C na bazi nikla u ovisnosti o temperaturi prikazana su na slici 12.



Slika 12. Mehanička svojstva superlegure Inconel 713C u ovisnosti o temperaturi [18]

Superlegura GMR 235 se uglavnom koristi za turbopunjače koji se ugrađuju u dizelske motore za automobilsku industriju. Za izradu rotora turbina benzinskih motora kod kojih su više radne temperature koristi se superlegura Inconel 713C. Kod slučajeva kada radna temperatura prelazi oko 760 °C, bilo da je riječ o benzinskom ili dizelskom motoru, također se preporučuje primjena Inconel 713C superlegure [15].

Kućišta turbine (slika 13.) se izrađuju postupkom lijevanja, a kod većine slučajeva, budući da je kućište turbine izloženo visokim radnim temperaturama, koristi se nodularni lijev visoke čvrstoće. U današnjoj proizvodnji kućišta turbine najčešće se koristi visokolegirani nodularni lijev GJSA – XNiSiCr 35-5-2 [33]. Tablica 3. prikazuje kemijski sastav nodularnog lijeva GJSA – XNiSiCr 35-5-2.

Tablica 3. Kemijski sastav nodularnog lijeva GJSA – XNiSiCr 35-5-2 [33]

Element	C	Si	Mn	Ni	P	Cr	Cu
Maseni udjel (%)	do 2	4 - 6	0,5 – 1,5	34 - 36	do 0,08	1,5 – 2.5	do 0,5

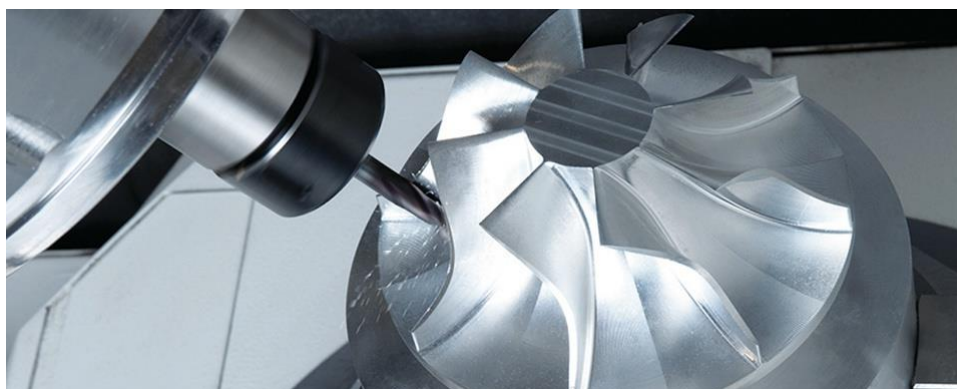


Slika 13. Kućišta turbine od nodularnog lijeva [15]

4.2. Kompresor

Kompresor turbopunjača se sastoji od dva glavna dijela: rotora kompresora i kućišta kompresora. Rotor kompresora se najčešće izrađuje od postupcima lijevanja ili obradom odvajanjem čestica (npr. 5-osnim glodanjem, slika 14.).

Najzastupljeniji materijali su aluminijske legure serije 4000 (Al-Si legure) [37]. Međutim, kad je riječ o turbopunjaču za posebne primjene (npr. sportski automobili) rotor kompresora se izrađuje od titanijevih legura isključivo postupkom 5-osnog glodanja.



Slika 14. Rotor kompresora izrađen postupkom 5-osnog glodanja [26]

Postoje više vrsta rotora kompresora koji su tijekom godina našli primjenu u motornim vozilima. Rotori kompresora s radijalnim lopaticama (eng. *straight radial wheel*) (slika 15.) u povijesti su se koristili na dizelskim motorima i generatorima koji rade u uskom rasponu broja okretaja u minuti. Međutim, u današnjim motorima takva vrsta rotora nije našla primjenu

budući da rješenje s radijalnim lopaticama razvija visoke tlakove te sustav nije energetski učinkovit (odnosno radi s niskim stupanjem djelovanja).



Slika 15. Rotor kompresora s radijalnim lopaticama [15]

Rotor kompresora sa stalnim promjerom lopatica (eng. *full-blade wheel*) (slika 16.) se vrlo rijetko susreće u primjeni, a ona je ograničena samo na slučajeva niske brzine vrtnje. Konstrukcijsko rješenje rotora s stalnim promjerom lopatica podrazumijeva da se promjer lopatica duž rotora ne mijenja. Primjena rotora s stalnim promjerom lopatica ne preporučuje u slučajevima kada se zahtijevaju visoke vrijednosti snage i zakretnog momenta motora, budući da pri visokim brzinama vrtnje, rotor ne uvlači dovoljnu količinu zraka u kompresorski dio turbopunjača.



Slika 16. Rotor kompresora sa stalnim promjerom lopatica [15]

Rotor s naizmjenično kraćom lopaticom (eng. *splitter-blade*) (slika 17.) je danas najzastupljenija vrsta rotora kompresora u automobilskoj industriji. Kod ove vrste rotora, svaka naizmjenična lopatica je kraća od cijele lopatice, a konstrukcijsko rješenje omogućuje veći protok zraka pri većim brzinama rotacije rotora. To je ujedno i glavni razlog primjene rotora u automobilskoj industriji.



Slika 17. Rotor s naizmjenično kraćom lopaticom [15]

Rotor s unatrag zakrivljenim lopaticama (eng. *backward curved impeller*) (slika 18.) odlikuje se visokom učinkovitošću pa je ova vrsta rotora našla široku primjenu u današnjoj automobilskoj industriji. Lopatice rotora su unatrag zakrivljene u odnosu na smjer rotacije.



Slika 18. Rotor s unatrag zakrivljenim lopaticama [15]

Kućište kompresora (slika 19.) se izrađuje postupkom lijevanja poput rotora kompresora. Kućišta kompresora se izrađuju od aluminijskih legura.



Slika 19. Odlijevak kućišta kompresora prije strojne obrade [23]

4.3. Kućište ležaja i ležaji

Suvremeni sustavi ležajeva za turbopunjače dijele se u dvije vrste:

- hidrodinamički sustavi ležaja koji se koriste u velikoj većini prošlih i sadašnjih turbopunjača
- sustavi s kugličnim ležajevima za posebne primjene

Tipičan hidrodinamički sustav ležaja za turbopunjače se sastoji od dva radijalna i jednog aksijalnog ležaja, koji su izrađeni od različitih legura bakra (slika 20.). Kod hidrodinamičkog sustava podmazivanja, postoji vanjski uljni film (između kućišta ležaja i čahure ležaja) te unutarnji uljni film (između vratila i čahure ležaja).



Slika 20. Ležajevi i brtve za turbopunjače hidrodinamičkog sustava podmazivanja [28]

S druge strane, kuglični sustav ležaja (slika 21.) integrira funkcije hidrodinamičkog sustava, a odlikuje se s vrlo visokim stupnjem učinkovitosti čime se smanjuju gubici snage u ležajnom sustavu.



Slika 21. Kuglični sustav ležajeva za turbopunjače [27]

Kućište ležaja (slika 22.) spaja kompresorski i turbinski dio turbopunjača, te može biti hlađeno pomoću ulja, zraka ili vodom. Unutar kućišta su smješteni ležajevi, spojno vratilo i brtve, a materijal koji se najčešće koristi za izradu kućišta ležaja je sivi lijev.



Slika 22. Kućište ležaja od sivog lijeva [30]

5. UZROCI KVAROVA TURBOPUNJAČA

Najčešće kvarove turbopunjača uzrokuje [11]:

- Prodor stranog predmeta
- Onečišćeno (kontaminirano) ulje
- Loše podmazivanje
- Visoka temperatura ispušnih plinova
- Prekomjerna brzina vrtnje

5.1. Kvar zbog prodora stranog predmeta

Jedan od najlakše otkrivenih uzroka kvara je prodor stranih tijela u kućište turbopunjača, posebice ako se rastavljanjem turbopunjača strano tijelo pronade u kompresoru. Strano tijelo uzrokuje oštećenja lopatica rotora (slika 23.), rotor nije više navojno spojen s vratilom, a uz sve to strana tijela često uzrokuju i vidljiva oštećenja na kućištima kompresora.



Slika 23. Oštećenja lopatica na rotoru kompresora uzrokovana prodorom stranog tijela [15]

Ukoliko se strani predmet ne nalazi u kompresoru turbopunjača, vrlo je velika vjerojatnost da se nalazi u području međuhladnjaka. Pri tome treba istaknuti da je u mnogo slučajeva, međuhladnjak spriječio prodor stranog predmeta u cilindar motora, sprječavajući potencijalnu mnogo veću štetu.

Preporučljivo je stoga ukloniti hladnjak kako bi se pokušalo ispiranjem ukloniti sve preostale dijelove koji se mogu pronaći.

Najčešći predmeti koji uzrokuju oštećenja turbopunjača, odnosno kompresora jesu: vijci i matice, dijelovi oštećenog filtera usisnog zraka, dijelovi prethodno zamijenjenog oštećenog rotora (zbog netemeljitog čišćenja kućišta tijekom servisiranja) te abrazivne čestice iz okoliša koje u usis dolaze zbog oštećenog filtera zraka [15].

Ukoliko na lopaticama rotora kompresora nisu vidljiva oštećenja uzrokovana prodorom stranog tijela, ali na lopaticama rotora turbine su vidljiva oštećenja, razlog može biti unutarnje oštećenje motora koje je posljedično izazvalo kvar turbopunjača. Ovakvu vrstu oštećenja najčešće uzrokuju odvojeni dijelovi ventila, klipa ili ispušnog sustava.

Dijelovi koji su uzrokovali oštećenja rotora turbine obično se neće pronaći jer prolaskom kroz turbinu uzrokuju oštećenja, a završavaju negdje u ispušnom sustavu. Stoga se u ovom slučaju preporučuje i inspekcijska kontrola ispušnog sustava.

5.2. Kvar zbog onečišćenog ulja

Čestice prljavštine, čađe, goriva, mogu onečistiti ulje te posljedično uzrokovati ozbiljna oštećenja turbopunjača uslijed karakterističnih radnih uvjeta (visokih brzina vrtnje i temperatura). Najsitnije strane tvari u ulju uzrokuju abrazijska oštećenja na čahurama ležaja (slika 24.).



Slika 24. Abrazijska oštećenja čahure ležaja [11]

Onečišćeno ulje može uzrokovati i abrazijska oštećenja brtvi koje više ne obnašaju svoju primarnu funkciju brtvljenja turbopunjača te dolazi do povećanje potrošnje ulje i pojave tzv. plavog dima iz auspuha vozila.

Onečišćeno ulje zbog prisutnih abrazivnih čestica i trošenja ležaja može prouzročiti zračnost između vratila i ležaja, a pri vrlo visokim brzinama vrtnje može doći do dodira rotora i kućišta (slika 25.) izazivajući oštećenja, a u konačnici i lom vratila.



Slika 25. Oštećeni rotor turbine nakon kontakta s kućištem [11]

Moguća je pojava tragova trošenja na aksijalnom ležaju kao i na spojnom vratilu u području ležaja (slika 26.).



Slika 26. Tragovi trošenja na spojnom vratilu [11]

Onečišćenje ulja može izazvati i prljavština nakon završnog remonta motora, koja je dospjela u motorno ulje. Iz rada motora pojavljuje se još jedan uzrok onečišćenja motornog ulja - čestice čađe koje nastaju zbog nepotpunog izgaranja goriva u komori za izgaranje.

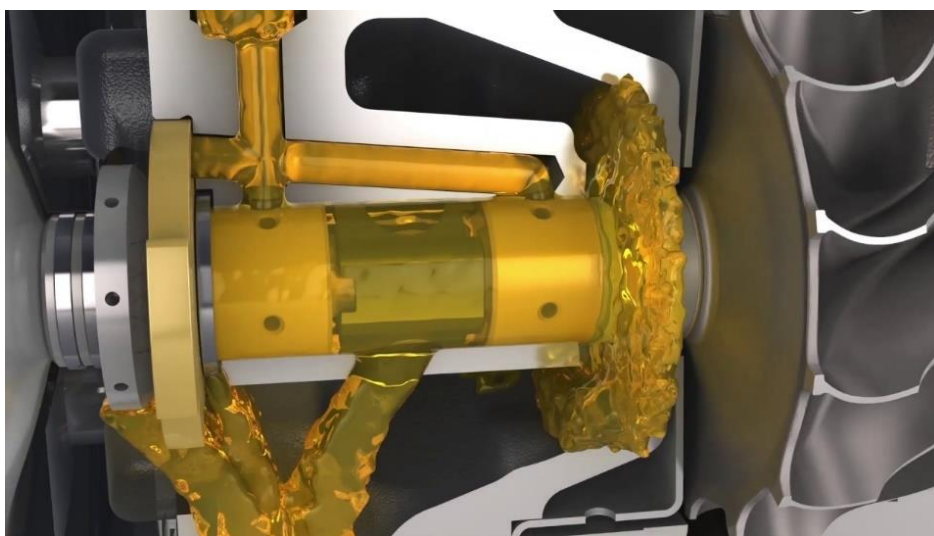
Međutim, ulje ne mora biti nužno onečišćeno česticama. Ukoliko brtva glave cilindra ili hladnjak ulja curi, voda će ući u sustav motornog ulja i razrijediti ulje, a time se posljedično smanjuje nosivost uljnog filma.

Onečišćeno ulje najčešće je posljedica nepoštivanja servisnih intervala zamjene ulja koje preporučuje proizvođač. Uz izmjenu motornog ulja podjednako je važna i zamjena filtera ulja

budući da ukoliko dođe do začepljenja filtera, ulje nije moguće pročititi od stranih čestica. Prilikom zamjene istrošenog turbopunjača novim, preporučuje se i izmjena motornog ulja.

5.3. Kvar zbog lošeg podmazivanja

Loše odnosno nedovoljno podmazivanje jedan je od najčešćih uzroka kvara turbopunjača. Ukoliko turbopunjač nije opskrbljen uljem u dovoljnoj količini, doći će do oštećenja dijelova u vrlo kratkom vremenu uslijed karakterističnih radnih uvjeta turbopunjača (visoke brzine vrtnje). Na donjoj slici (slika 27.) prikazan je model podmazivanja turbopunjača u radu.



Slika 27. Animacija podmazivanja turbopunjača motornim uljem [24]

Kvar nastao zbog lošeg podmazivanja turbopunjača najčešće uzrokuju:

- preniska razina ulja u motoru
- karbonizacija ulja
- začepljeni dovodi ulja
- primjena ulja neodgovarajuće viskoznosti

Preniska razina ulja u motoru

Ulje za podmazivanje ima dvostruku funkciju, hladi spojno vratilo i ležajeve i podmazuje sustav kako bi se izbjegli problemi uzrokovani trošenjem.

Budući da turbopunjač nije opskrbljen s dovoljnom količinom ulja, dolazi do prekomjernog trošenja dijelova. Za izbjegavanje kvara povezanog s niskom razinom ulja u motoru potrebno je pridržavati se servisnih intervala koje propisuje (preporučuje) proizvođač s ciljem održavanja odgovarajuće razine ulja u motoru.

Karbonizacija ulja

Karbonizacija ulja najčešće je uzrokovana primjenom ulja u neodgovarajućem temperaturnom rasponu. Pojava karbonizacije ulja (slika 28.) potencijalno može uzrokovati začepljenje dovodnih kanala ulja za podmazivanje turbopunjača pa će središnji dijelovi turbopunjača ostati bez odgovarajućeg podmazivanja (dolazi do pojave tzv. suhog trenja). Osim začepljenja dovodnih, karbonizacija ulja može uzrokovati i začepljenje odvodnih kanala motornog ulja iz turbopunjača (zbog nemogućnosti otjecanja ulja dolazi do curenja ulja na turbini ili kompresoru).



Slika 28. Začepljenje vodova uslijed karbonizacije ulja [11]

Primjena ulja neodgovarajuće viskoznosti

Uporabom ulja s viskoznosti nižom od propisane, onemogućava se tečenje i podmazivanje ležaja a primjenom ulja veće od propisane viskoznosti, smanjuje se nosivost uljnog filma.

Viskoznost je najvažnije pojedinačno svojstvo svih mazivih ulja i definira se kao unutarnje trenje tekućine i njezin otpor prema tečenju kad se nalazi pod djelovanjem sile smicanja. Pri tome se razlikuje dinamička i kinematička viskoznost ulja.

Dinamička ili apsolutna viskoznost (η) se definira kao omjer smičnog naprezanja i brzine smicanja:

$$\eta = \frac{\tau}{S} \quad (4)$$

gdje je τ – smično naprezanje, a S – brzina smicanja pokretnih ravnina u tekućini.

Jednadžba vrijedi samo za Newtonske tekućine, tekućine čija se viskoznost ne mijenja promjenom brzine smicanja. Mineralna i sintetička bazna ulja i ulja koja ne sadrže polimerne ugušćivače ponašaju se kao Newtonske tekućine.

Ne-Newtonske tekućine su tekućine kojima se mijenja viskoznost promjenom brzine smicanja. U ovu grupu spadaju motorna ili zupčanička ulja za vozila koja su ugušćena polimerima.

Jedinica za dinamičku viskoznost je Pa·s (u praksi se najčešće primjenjuje mPa·s)

Kinematička viskoznost (ν) je definirana kao omjer dinamičke viskoznosti i gustoće.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5)$$

gdje je ρ - gustoća ulja (kg/m^3).

Kinematička viskoznost predstavlja mjeru za otpor tekućine prema tečenju pod utjecajem sile teže (gravitacije), a jedinica za kinematičku viskoznost (ν) je mm^2/s ,

Specifikacije motornih ulja definiraju se s ciljem osiguranja potrebne kvalitete motornog ulja za podmazivanje motora. Najznačajnije su specifikacije:

- API specifikacije
- ACEA specifikacije
- SAE klasifikacija

Osim navedenih postoje brojne specifikacije proizvođača motora.

Najčešće korišteni sustav klasifikacije motornih ulja prema viskoznosti je Društva američkih automobilskih inženjera - SAE (Society of Automotive Engineers, USA).

Prema sustavu klasifikacije, postoje dvije serije viskoznih gradacija: sa oznakom “W” i bez te oznake. Ulja sa oznakom “W” predstavljaju monogradna ulja za zimske uslove rada (zimsko ulja: SAE 10W, SAE 20W) i definiraju se najvećom dinamičkom viskoznosti, najvećom

dinamičkom viskoznosti pumpanja ulja na niskim temperaturama, te kinematičkom viskoznošću na 100 °C. Ulja bez oznake “W” predstavljaju monogradna ulja za ljetne uvjete rada (SAE 30, SAE 40, SAE 50) i definiraju se najmanjom i najvećom kinematičkom viskoznošću na 100°C, i najmanjom dinamičkom viskoznošću pri 150°C i brzini smicanja od 10⁶ s⁻¹. Spajanjem dviju serija viskoznih gradacija nastaju multigradna ulja koja zadovoljavaju ljetne i zimske uvjete rada (SAE 15W-40, SAE 10W-40) (tablica 5).

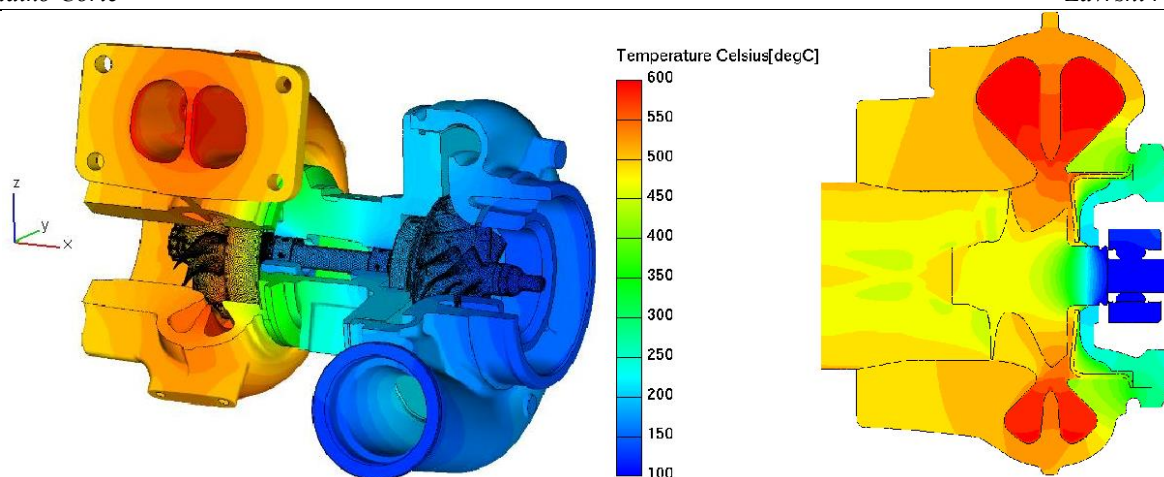
Tablica 4. Područje primjene multigradnih motornih ulja u ovisnosti o temperaturi [3]

Multigradna ulja	Temperaturno područje primjene (°C)
SAE 0W - 30	ispod – 30 do +30
SAE 0W - 40	ispod – 30 do + 40
SAE 5W - 30	od – 25 do + 30
SAE 5W- 40	od – 25 do + 40
SAE 10W - 30	od – 20 do + 30
SAE 10W - 40	od – 20 do + 40
SAE 15W - 40	od – 15 do + 40
SAE 15W - 50	od – 15 iznad + 40
SAE 20W - 50	od – 10 iznad + 40
SAE 20W - 60	od – 5 iznad + 50

Za sprječavanje kvara povezanog s primjenom neodgovarajućeg motornog ulja, potrebno je koristiti motorna ulja koje je specificirao proizvođač vozila, odnosno motora.

5.4. Kvar zbog visoke temperature ispušnih plinova

Svaki turbopunjač konstruiran je samo za određeni radni raspon temperature usisnih i ispušnih plinova (slika 29.). Primjena turbopunjača s radnom temperaturom koja prelazi projektiranu vrijednost, donosi oštećenje dijelova i potencijalni prestanak rada turbopunjača.



Slika 29. CFD analiza turbopunjača s prikazom raspodjele temperatura u radu turbopunjača [10]

Zbog visokih temperatura ispušnih plinova posljedično dolazi do pojave pukotina na kućištu turbine (slika 30.), a moguća je i već spomenuta karbonizacija ulja u dovodima koja će dovesti do izostanka podmazivanja turbopunjača i začepljenja odvodnih kanala. Karbonizacija ulja može nastati i u odvodu ulja iz turbopunjača pri čemu će ulje ne može istjecati iz turbopunjača pa dolazi do propuštanja ulja na turbinskom ili kompresorskom dijelu turbopunjača.



Slika 30. Pukotine na kućištu turbine uslijed visokih temperatura [15]

Često ne tvornička modifikacija turbopunjača i motora uzrokuje povišenje temperature ispušnih plinova koja uzrokuje kvar turbopunjača. Uz to, visoka temperatura ispušnih plinova može biti uzrokovana nepravilnim izgaranjem goriva u cilindru.

Kako bi se spriječio kvar turbopunjača povezan s visokom temperaturom ispušnih plinova preporučuje se ugradnja turbopunjača u vozila bez tehničkih izmjena.

5.5. Kvar zbog prekomjerne brzine vrtnje

Dijelovi turbopunjača konstruirani su za projektiran raspon brzina vrtnje, a ukoliko se raspon brzina vrtnje prekorači, može doći do većeg oštećenja turbopunjača u samo nekoliko sekundi.

Moguće posljedice su oštećenja na rotoru budući da aluminij (najčešći materijal za izradu rotora kompresora) počinje teći uslijedi prekomjerne centrifugalne sile (slika 31.).

Materijal počinje teći, nastupa plastična deformacija i vanjski se promjer povećava, a ako se brzine dodatno povećaju, rotor može doći u dodir s kućištem i rascijepati se.



Slika 31. Oštećenja na rotoru kompresora

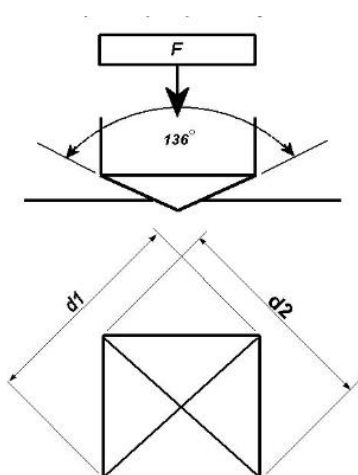
Najčešći uzrok prekomjerne brzine vrtnje je ne tvornička modifikacija turbopunjača, stoga se turbopunjač uvijek mora ugrađivati u tvorničkom stanju te za određeni tip vozila. Nadalje, uzrok prekomjerne brzine vrtnje turbopunjača može biti kvar elektronike.

6. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA TURBOPUNJAČA

6.1. Ispitivanje tvrdoće materijala

Tvrdoća materijala predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg tijela. S vremenom su se razvile različite metode mjerenja tvrdoće, a najčešće se u strojarstvu primjenjuju tri glavne metode: metoda po Brinellu, metoda po Vickersu i metodu po Rockwellu.

Glavna značajka Vickers metode mjerenja tvrdoće je to da mjerena tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili, pa je moguće mjeriti i najtvrđe materijale. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od 136 stupnjeva, izrađena od dijamanta (slika 32).



Slika 32. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [2]

Utiskivanjem penetratora u materijali ostaje otisak oblika piramide, a tvrdoća se određuje po izrazu:

$$HV = \frac{F}{S} \quad (6)$$

gdje su:

F – primijenjena sila, N

S – površina šuplje piramide otisnute u materijalu, mm²

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje prema izrazu:

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{d^2} \quad (7)$$

gdje je:

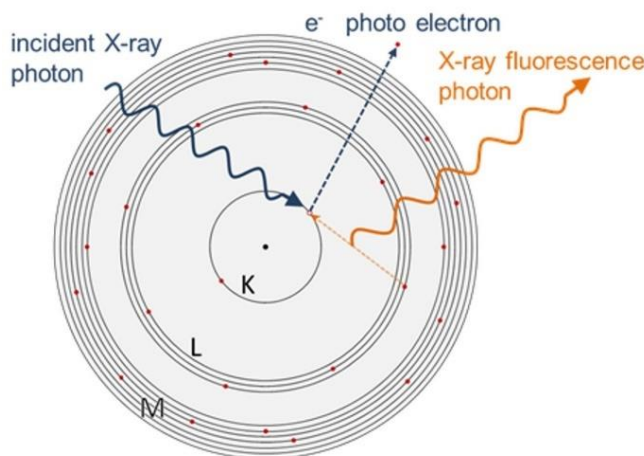
F – primijenjena sila, N

d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide, mm

Uz simbol HV pri rezultatu mjerenja kao indeks se navodi i primijenjeno opterećenje u kp. (npr. HV5 = 400, znači da je sila utiskivanja iznosila $5 \cdot 9,81$ N).

6.2. Ispitivanje kemijskog sastava metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije

Metoda rendgenske fluorescentne spektrometrije je nerazorna metoda koja se temelji na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem, što rezultira emisijom fluorescentnoga zračenja iz materijala, karakterističnog za elementarni sastav (slika 33.). Te informacije daju nam i kvalitativnu i kvantitativnu sliku o kemijskom sastavu uzorka.



Slika 33. Rendgenska fluorescencija [32]

Rendgenska fluorescencija je proces u kojem se elektroni pomiču sa svojih atomskih orbitalnih položaja, oslobađajući navalu energije karakterističnu za određeni element.

Ovo oslobađanje energije zatim registrira detektor u XRF uređaju, koji zauzvrat kategorizira energiju po elementu. Oslobođena energija definira se prema formuli:

$$E = hc\lambda^{-1} \quad (8)$$

gdje je: h - Planckova konstanta, c - brzina svjetlosti, λ - karakteristična valna duljina fotona.

Ručni prijenosi uređaji za metodu fluorescentne spektrometrije imaju mogućnost kvantificiranja ili kvalificiranja gotovo bilo kojeg elementa od magnezija do urana, ovisno o specifičnim konfiguracijama instrumenta. Cijeli proces analize metodom fluorescencije odvija se u malim dijelovima sekunde. Mjerenje pomoću ovog procesa i prijenosnog ručnog uređaja (slika 34.) može se izvršiti za nekoliko sekundi.



Slika 34. Prijenosni ručni uređaj za metodu rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) [29]

EKSPERIMENTALNI DIO

7. ANALIZA ISTROŠENOG TURBOPUNJAČA

7.1. Sklop turbopunjača nakon havarije

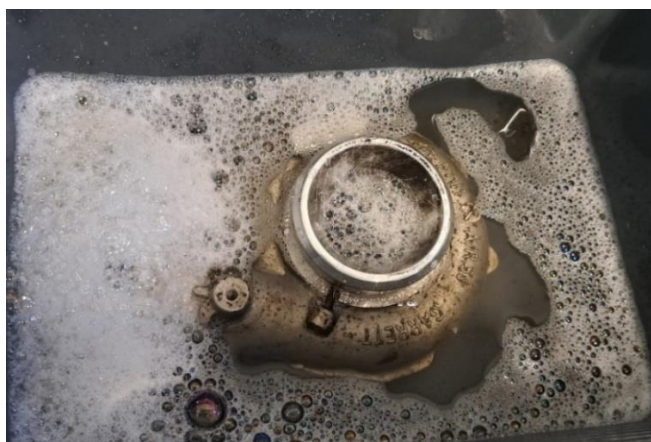
Cilj eksperimentalnog dijela rada je pronalazak uzroka havarije na izuzetom primjeru istrošenog turbopunjača iz gospodarskog vozila (prikazan na slici 35.). Nakon što je turbopunjač rastavljen u podsklopove i dijelove, na rotoru i kućištu kompresora te rotoru turbine je ispitana tvrdoća pomoću Vickers metode, kemijski sastav pomoću nerazorne metode rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) te mikrostruktura materijala pomoću svjetlosne mikroskopije.



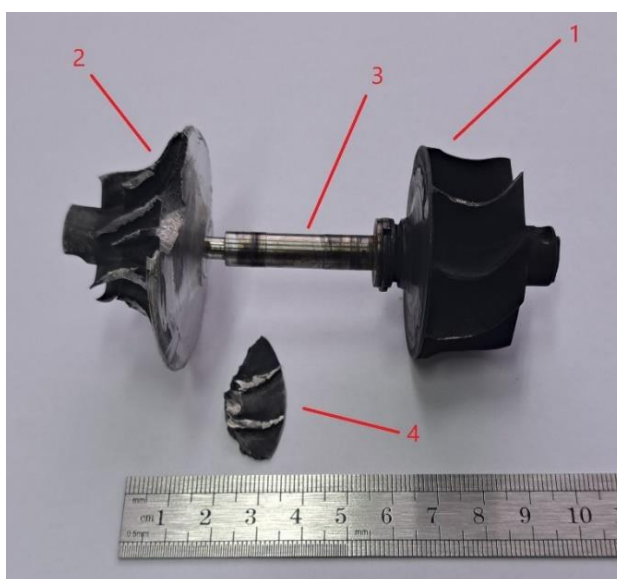
Slika 35. Turbopunjač gospodarskog vozila

Prvi korak u analizi havarije turbopunjača je bio odmašćivanje dijelova turbopunjača primjenom industrijskog sredstva za odmašćivanje površina (slika 36.).

Nakon odmašćivanja svih rastavljenih dijelova turbopunjača, uočeni su središnji oštećeni dijelovi turbopunjača. Slika 37. prikazuje oštećene središnje dijelove turbopunjača (1 – rotor turbine, 2 – rotor kompresora, 3 – spojno vratilo između dva rotora, 4 – lomna krhotina rotora kompresora).



Slika 36. Odmaščivanje kućišta kompresora u sredstvu za odmaščivanje



Slika 37. Oštećeni središnji dijelovi turbopunjača

Slika 38. prikazuje karakteristični lom spojnog vratila između rotora turbine i rotora kompresora, dok slika 39. prikazuje karakteristični lom rotora kompresora.



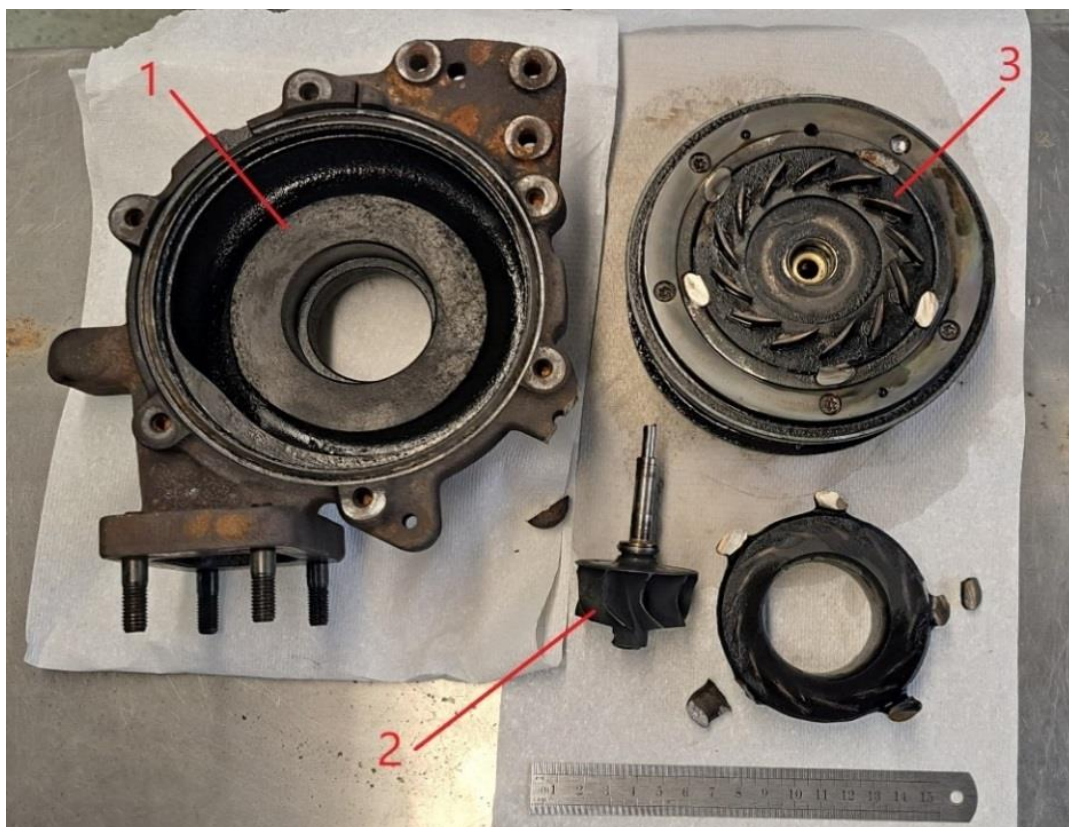
Slika 38. Karakteristični lom spojnog vratila



Slika 39. Lom rotora kompresora

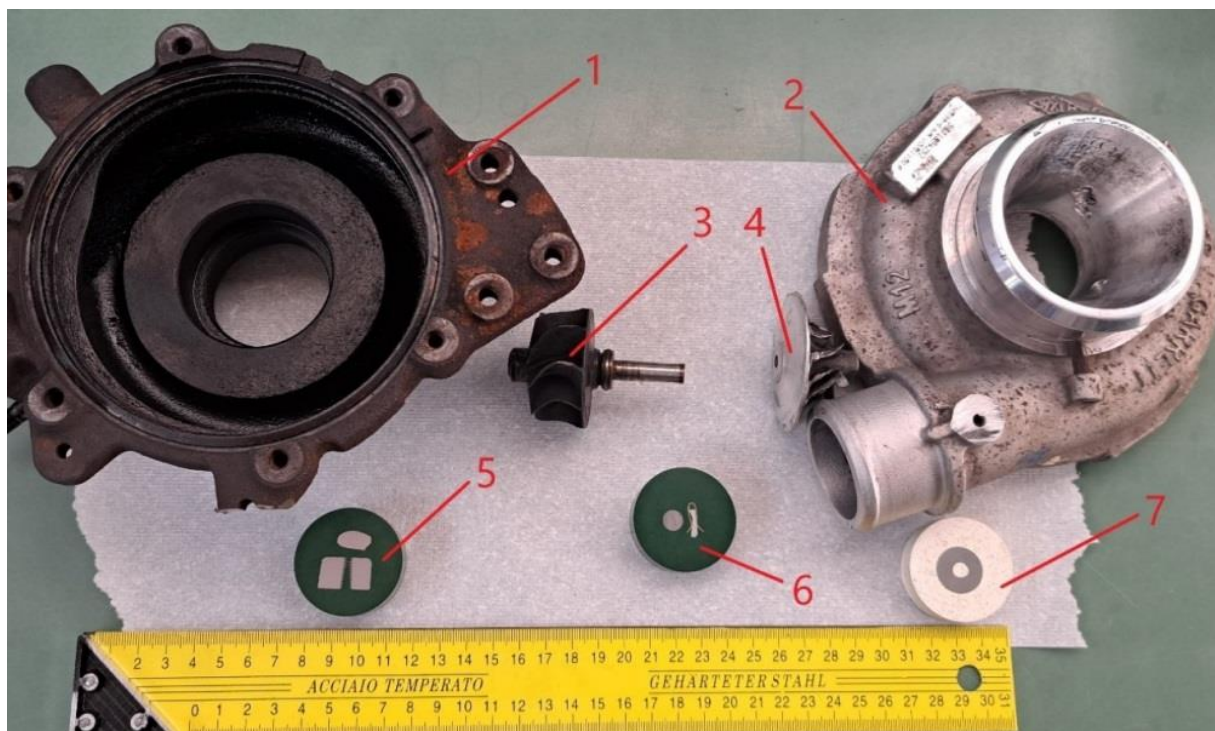
Prema podjeli opisanoj u teorijskom dijelu rada, rotor kompresora (slika 39.) pripada vrsti rotora s naizmjenično kraćom lopaticom, najzastupljenijoj vrsti rotora kompresora za turbopunjače u automobilskoj industriji.

Na slici 40. prikazani su ostali dijelovi turbinskog dijela istrošenog turbopunjača gospodarskog vozila (1 – kućište turbine, 2 – rotor turbine, 3 – držač vratila turbine s zakretnim krilcima).



Slika 40. Dijelovi turbine istrošenog turbopunjača

Na slici 41. prikazani su dijelovi turbopunjača gospodarskog koji su bili podvrgnuti različitim ispitivanjima u svrhu otkrivanja uzroka havarije: 1 – kućište turbine, 2 – kućište kompresora, 3 – rotor turbine, 4 – rotor kompresora, 5 – pripremljeni metalografski uzorak kućišta turbine, 6 – pripremljeni metalografski uzorak vratila i rotora kompresora, 7 – pripremljeni metalografski uzorak kućišta kompresora.



Slika 41. Dijelovi turbopunjača pripremljeni za analizu lomova i trošenja

8. ANALIZA TROŠENJA KOMPRESORA TURBOPUNJAČA

8.1. Kemijski sastav kompresora određen metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije

Analiza kemijskog sastava kompresorskih dijelova turbopunjača (rotora i kućišta kompresora) provedena je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF metoda) pomoću prijenosnog ručnog uređaja XRF Olympus, proizvođača: Innov-X Systems, Inc, model DS 2000-C na Katedri za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 42. prikazana je provedba XRF analize kemijskog sastava rotora kompresora, a tablica 5. prikazuje dobivene rezultate .



Slika 42. XRF analiza rotora kompresora

Tablica 5. Rezultati analize kemijskog sastava rotora kompresora XRF metodom

Element	Udio (%)	Odstupanje(%)
Al	85,03	± 0,26
Si	11,03	± 0,08
Mg	2,02	± 0,36
Cu	1,68	± 0,02
Cr	0,11	± 0,01
Co	0,077	± 0,006
Fe	0,046	± 0,006

Analizom je utvrđeno da je rotor kompresora izrađen od aluminijske legure (Al-Si legure serije 4000 s prisutnim legirnim elementima Mg, Cu, Cr, Co i Fe). Nakon provedene XRF analize na rotoru kompresora, proveden je isti postupak i na kućištu kompresora (slika 43.). Tablica 6. prikazuje rezultate XRF analize kemijskog sastava kućišta kompresora.

**Slika 43. XRF analiza kućišta kompresora**

Tablica 6. Rezultati XRF analize kućišta kompresora

Element	Udio (%)	Odstupanje (%)
Al	85,26	± 0,31
Mg	5,25	± 0,44
Si	9,02	± 0,08
Cr	0,12	± 0,01
Fe	0,18	± 0,01
Co	0,134	± 0,009
Cu	0,031	± 0,003
Mo	0,0031	± 0,006

Rezultati kemijske analize kućišta i rotora kompresora se razlikuju, odnosno riječ o dvije aluminijske legure različitog kemijskog sastava.

8.2. Ispitivanje tvrdoće

Nakon provedene kemijske analize dijelova nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije, sljedeći korak je bio ispitivanje tvrdoće kompresora turbopunjača, odnosno rotora i statora (kućišta). Mjerenje tvrdoće dijelova turbopunjača provedeno je pomoću Vickers metode i tvrdomjera INSTRON Wilson -Wolpert Tukon 2100B (slika 44.) na Katedri za toplinsku obradu i inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 44. Tvrdomjer INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B povezan s računalom

Nakon izrezivanja reprezentativnog uzorka kućišta kompresora, provedeno je ispitivanje tvrdoće uzorka. Tablica 7. prikazuje vrijednosti tvrdoće uzorka kućišta kompresora uz vrijednosti primijenjene sile od 1 kp tj. 9,81 N (HV1).

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na kućištu kompresora

Redni broj mjerenja	Tvrdoća (HV1)
1.	92
2.	86
3.	87
4.	88
5.	83
\bar{x}	87,2

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja tvrdoće, utvrđeno je da srednja vrijednost tvrdoće kućišta kompresora iznosi 87,2 HV1. Mjerenje tvrdoće rotora kompresora prikazano je na slici 45., a budući da se radi o strojnom dijelu manjih dimenzija, nije bilo potrebno izrezivati uzorak za mjerenje tvrdoće.



Slika 45. Mjerenje tvrdoće rotora kompresora metodom Vickers

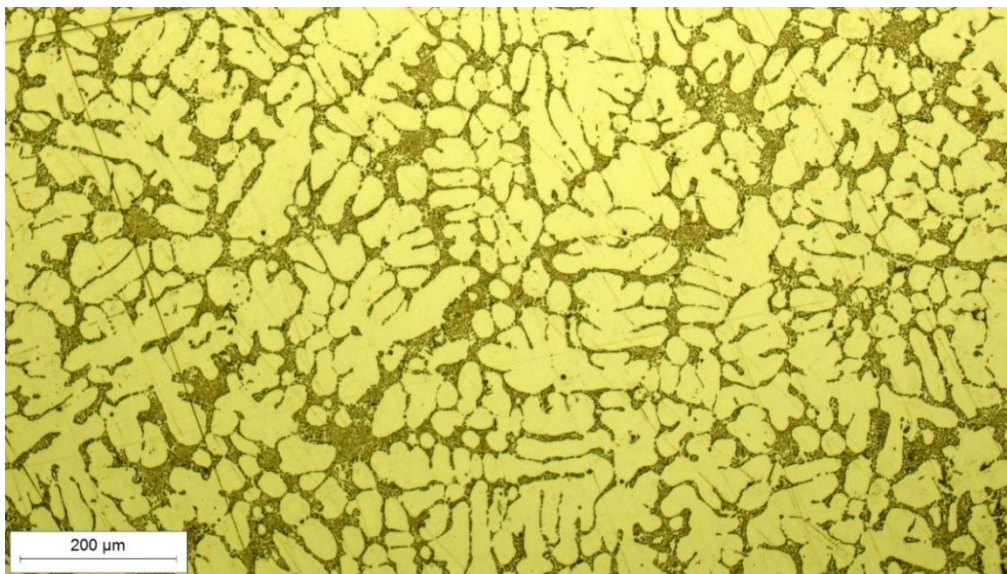
Dobivene rezultate nakon ispitivanja tvrdoće prikazuje tablica 8. Analizom rezultata ispitivanja dobivena je i srednja vrijednost tvrdoće rotora kompresora koja iznosi 151,8 HV1.

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti tvrdoće rotora kompresora

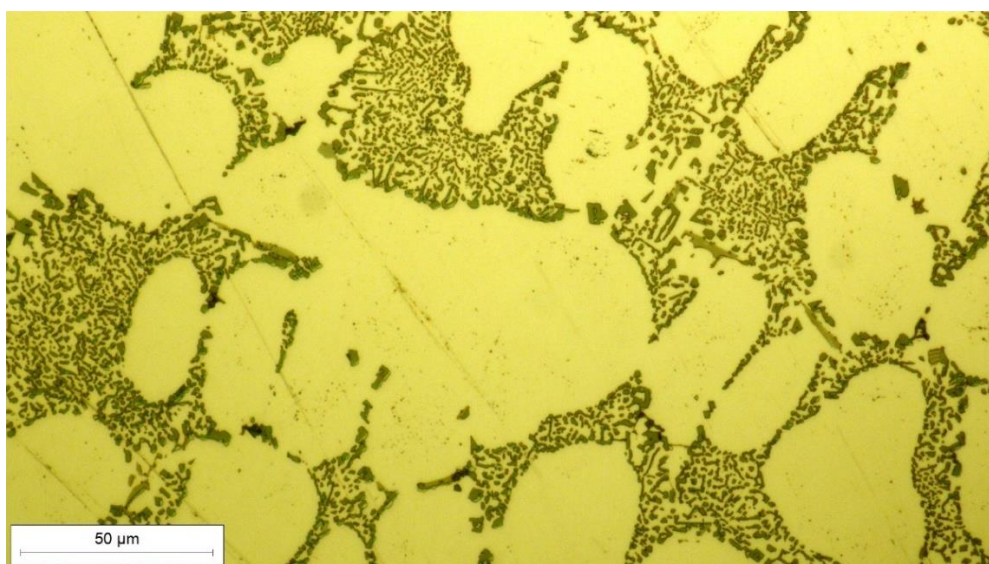
Redni broj mjerenja	Tvrdoća (HV1)
1.	162
2.	156
3.	151
4.	145
5.	145
\bar{x}	151,8

8.3. Mikrostruktura kompresora

Mikrostruktura kompresora ispitana je na pripremljenom metalografskom uzroku kućišta kompresora (prikazan na slici 41.). Mikrostruktura aluminijske legure od koje izrađeno kućište kompresora prikazana je na slici 46. i slici 47., s različitim povećanjima.



Slika 46. Mikrostruktura kućišta kompresora, povećanje 200x

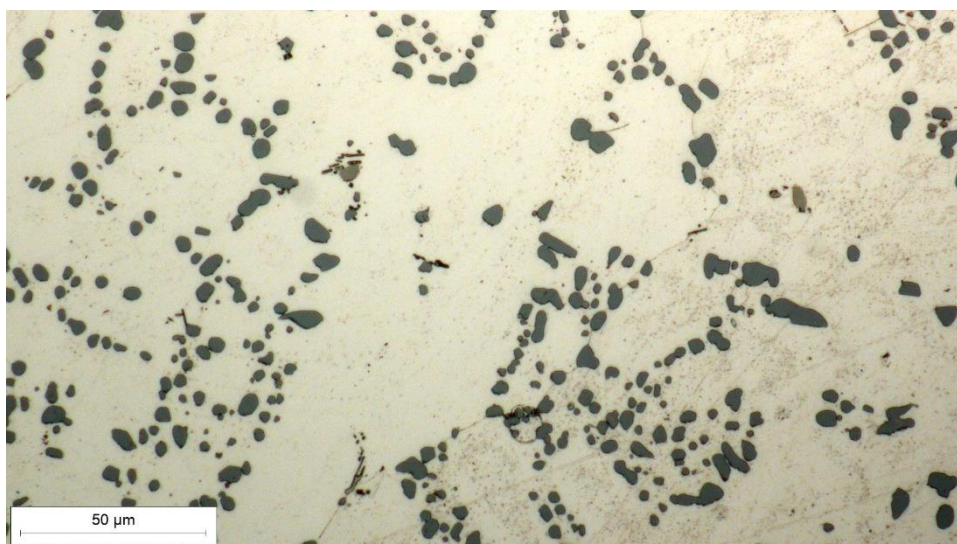


Slika 47. Mikrostruktura kućišta kompresora , povećanje 1000x

Nakon ispitivanja mikrostrukture kućišta kompresora, ispitana je i mikrostruktura rotora kompresora. Slike 48. i 49. prikazuju mikrostrukturu rotora kompresora s različitim povećanjima.



Slika 48. Mikrostruktura rotora kompresora, povećanje 200x



Slika 49. Mikrostruktura rotora kompresora, povećanje 1000x

8.4. Trošenje kompresora

Kao posljedica havarije, na kompresoru turbopunjača vidljiva su oštećenja statora (kućišta), trošenje lopatica rotora, te lom rotora. Slika 50. prikazuje lomne dijelova rotora kompresora.



Slika 50. Lom rotora kompresora

Pomoću fotografske kamere na Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje snimljena je karakteristična lomna površina rotora kompresora koju prikazuju slika 51. i slika 52.



Slika 51. Lomna površina rotora kompresora (pogled po uzdužnoj osi)

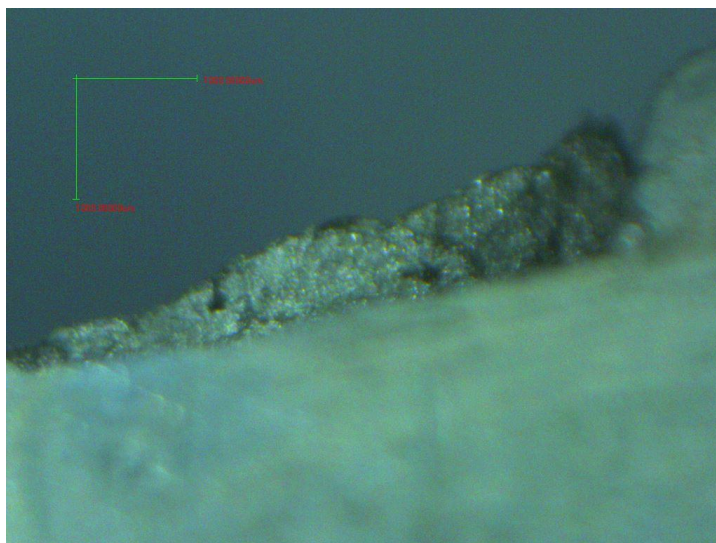


Slika 52. Lomna površina rotora kompresora (pogled u tlocrtu)

Lomna površina rotora snimljena je i pomoću stereo mikroskopa Mantis Elite-Cam HD (slika 53.) na Zavodu za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izgled lomne površine rotora prikazana je na slici 54.

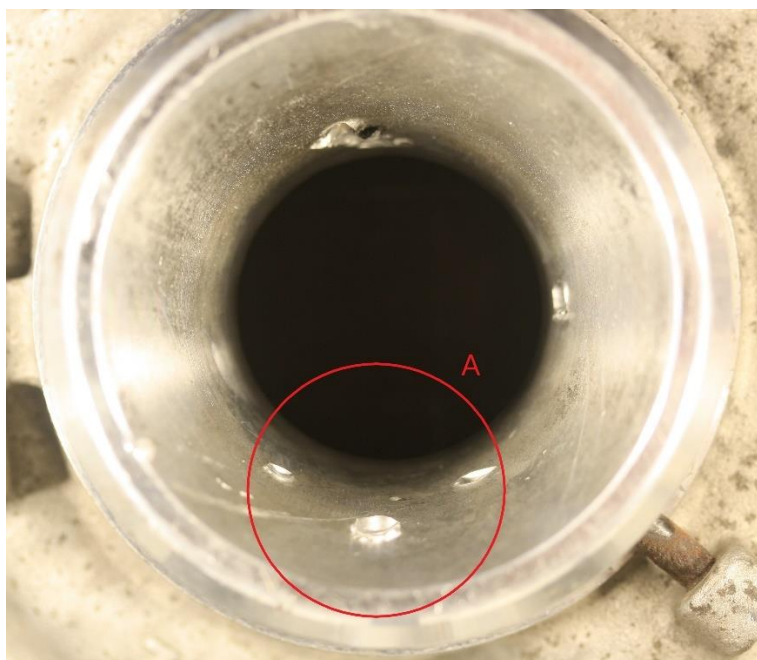


Slika 53. Stereo mikroskop Mantis Elite-Cam HD

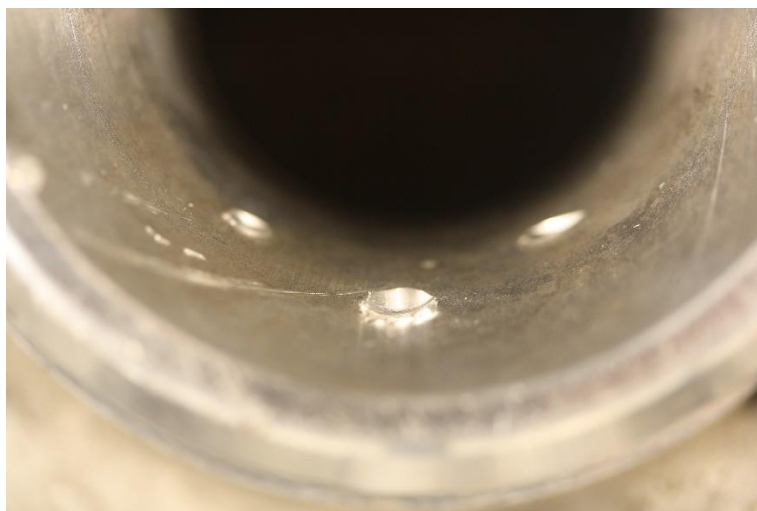


Slika 54. Lomna površina rotora snimljena stereomikroskopom, povećanje 8x

Oštećenja u obliku jamica vidljiva su i na unutarnjem dijelu aluminijskog kućišta kompresora. Oštećenja su snimljena pomoću fotografske kamere (slike 55. i 56.).

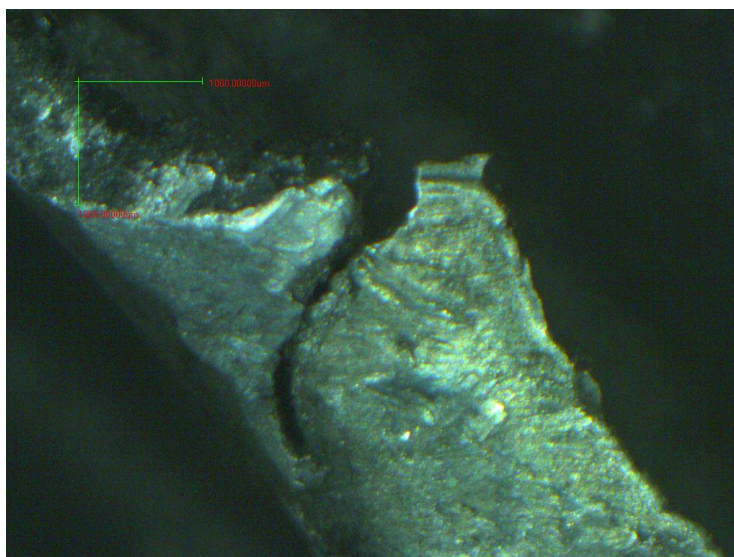


Slika 55. Oštećenja na otvoru kućišta kompresora



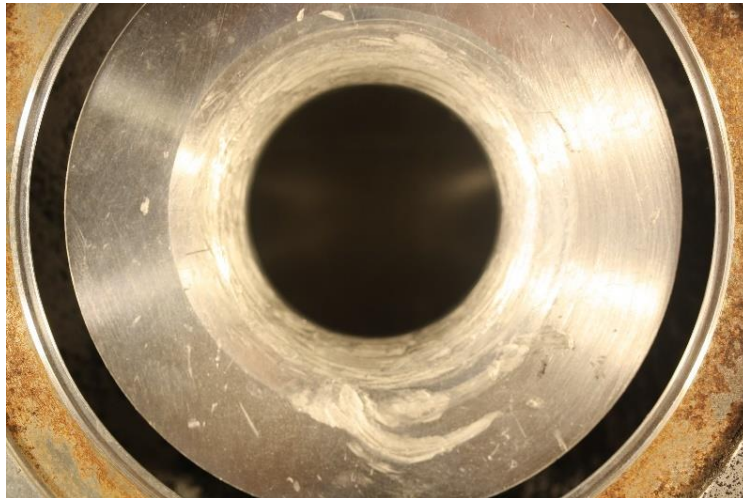
Slika 56. Detalj A oštećenja na otvoru kućišta kompresora

Oštećenja su vidljiva i na lopaticama kompresora, uzrokovana kontaktom istih s kućištem kompresora. Slika 57. prikazuje oštećenja snimljena sa stereo mikroskopom s povećanjem od 8 puta.

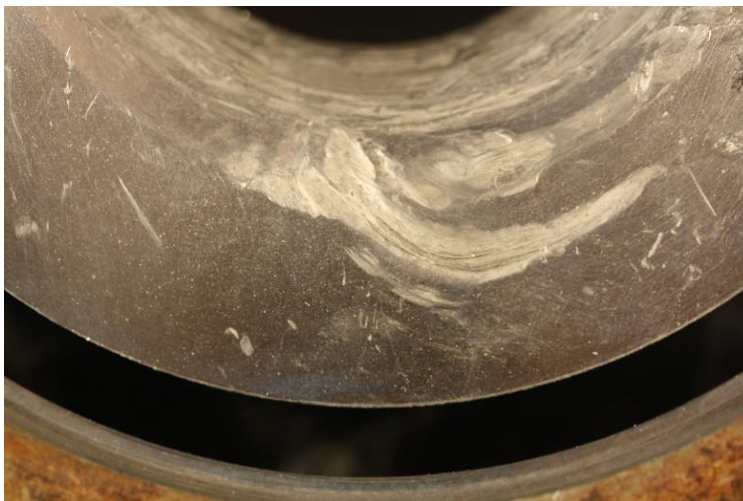


Slika 57. Oštećene lopatice kompresora snimljene stereo mikroskopom, povećanje 8x

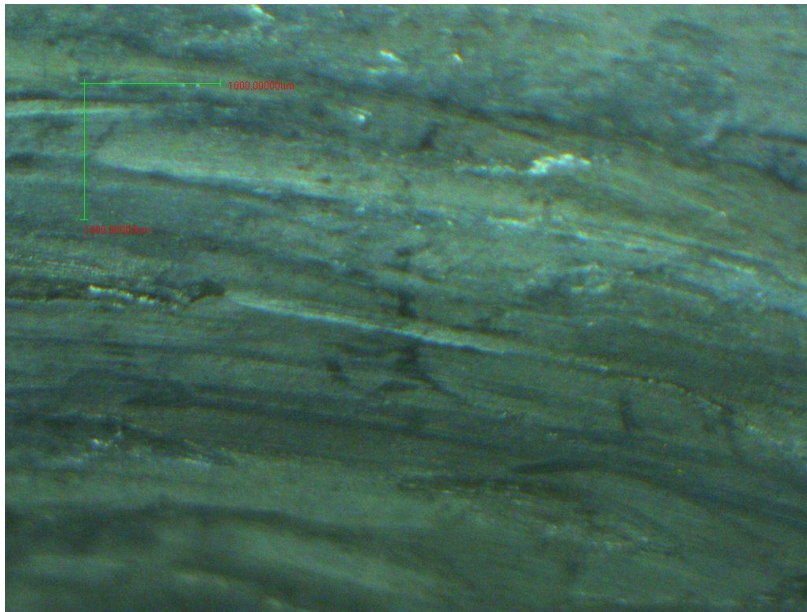
Oštećenja uzorkovana abrazivskim mehanizmom trošenja uslijed kontakta rotora kompresora i kućišta kompresora prikazana su na slikama 58. i 59. koje su snimljene pomoću fotografske kamere te slici 60., koja je snimljena pomoću stereo mikroskopa.



Slika 58. Abrazija oko otvora na kućištu kompresora



Slika 59. Detalj abrazijskog oštećenja na kućištu kompresora



Slika 60. Površina kućišta kompresora s tragovima abrazijskog trošenja, povećanje 8x

9. ANALIZA TROŠENJA TURBINE TURBOPUNJAČA

9.1. Kemijski sastav turbine određen metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije

Kemijska analiza rotora i kućišta turbine provedena je pomoću metode rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF), pomoću prijenosnog ručnog uređaja XRF Olympus, proizvođača Innov-X Systems, Inc, model DS 2000-C na Katedri za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Tablica 9. prikazuje rezultate XRF analize rotora turbine, a tablica 10. kućišta (statora) turbine.

Tablica 9. Rezultati XRF analize rotora turbine

Element	Udio (%)	Odstupanje (%)
Ni	71,61	± 0,44
Cr	13,00	± 0,25
Mo	4,29	± 0,06
Fe	2,67	± 0,09
Zn	2,37	± 0,11
Nb	2,30	± 0,04
Si	1,36	± 0,09
Co	1,02	± 0,08
Ti	0,66	± 0,10
S	0,63	± 0,04
Zr	0,092	± 0,010

Kemijskom analizom materijala rotora turbine utvrđeno je da je rotor turbine izrađen od superlegure na bazi nikla (udio nikla od 71,61 %).

Tablica 10. Rezultati XRF analize kućišta turbine

Element	Udio (%)	Odstupanje (%)
Fe	96,59	± 0,3
C	0,60	-
Si	1,48	± 0,07
Mo	0,82	± 0,01
Cr	0,75	± 0,03
Co	0,40	± 0,08
Zn	0,19	± 0,02
Mn	0,16	± 0,03

9.2. Mjerenje tvrdoće kućišta turbine

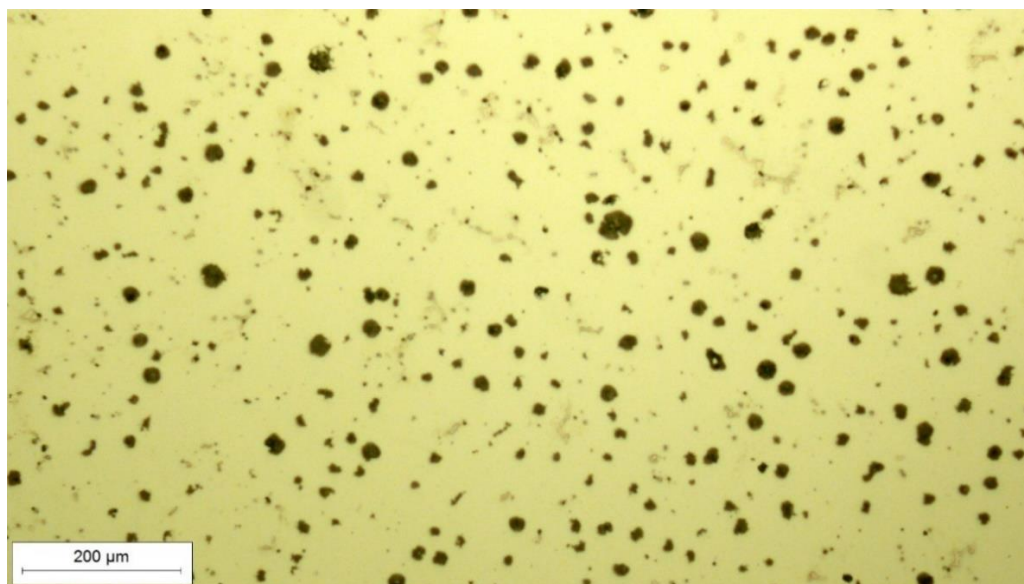
Mjerenje tvrdoće kućišta turbine provedeno je na pripremljenom metalografskom uzroku kućišta turbine (slika 41.). Tablica 11. prikazuje izmjerene tvrdoće kućišta turbine, a analiza dobivenih rezultata pokazala je da srednja vrijednost tvrdoće kućišta turbine iznosi 257 HV1.

Tablica 11. Izmjerene vrijednosti tvrdoće kućišta turbine

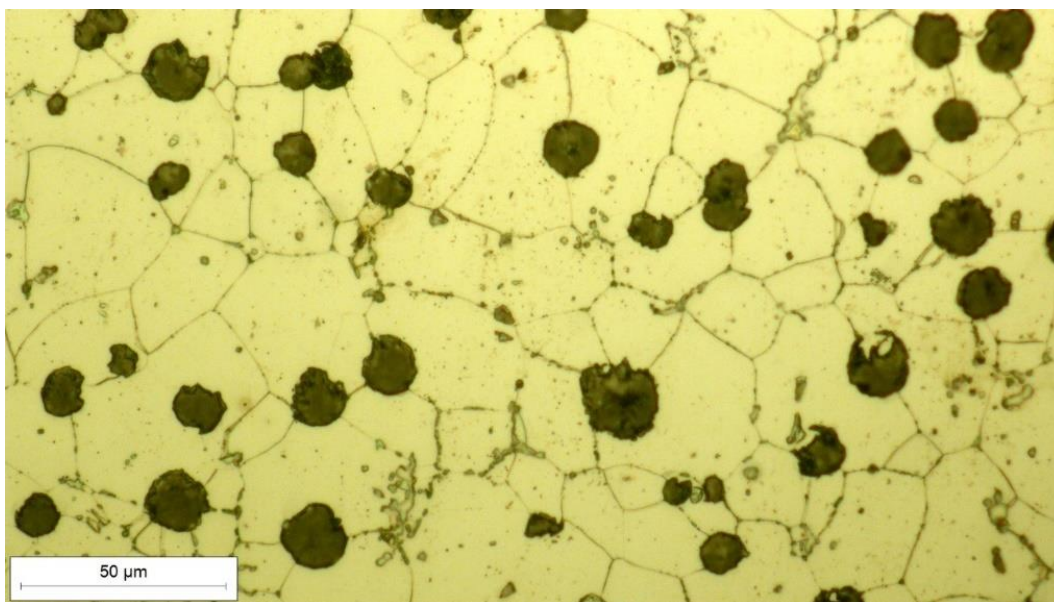
Redni broj mjerenja	Tvrdoća (HV1)
1.	268
2.	262
3.	241
\bar{x}	257

9.3. Mikrostruktura turbine turbopunjača

Slike 61. i 62. prikazuju mikrostrukturu kućišta turbine turbopunjača koje je izrađeno od austenitnog nodularnog lijeva.



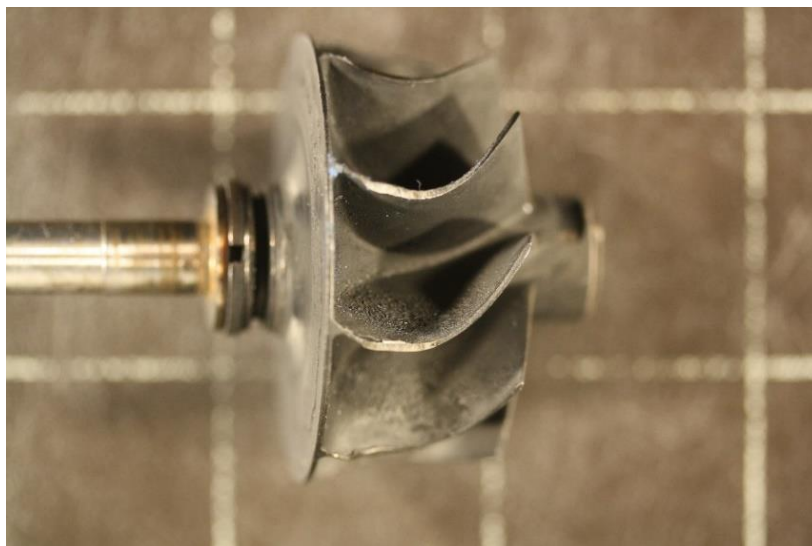
Slika 61. Mikrostruktura kućišta turbine, povećanje 200x



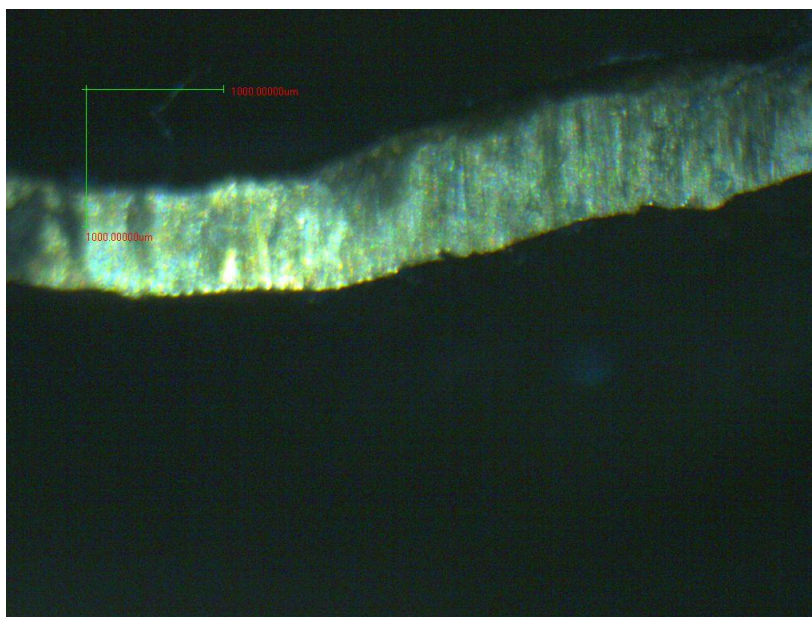
Slika 62. Mikrostruktura kućišta turbine, povećanje 1000x

9.4. Trošenje turbine

U Laboratoriju za metalografiju, pomoću fotografske kamere (slika 63.), a zatim i stereo mikroskopom Mantis Elite-Cam HD (slika 64.) snimljeno je trošenje lopatica turbine uzrokovano kontaktom lopatica s kućištem turbine.



Slika 63. Trošenje lopatica turbine

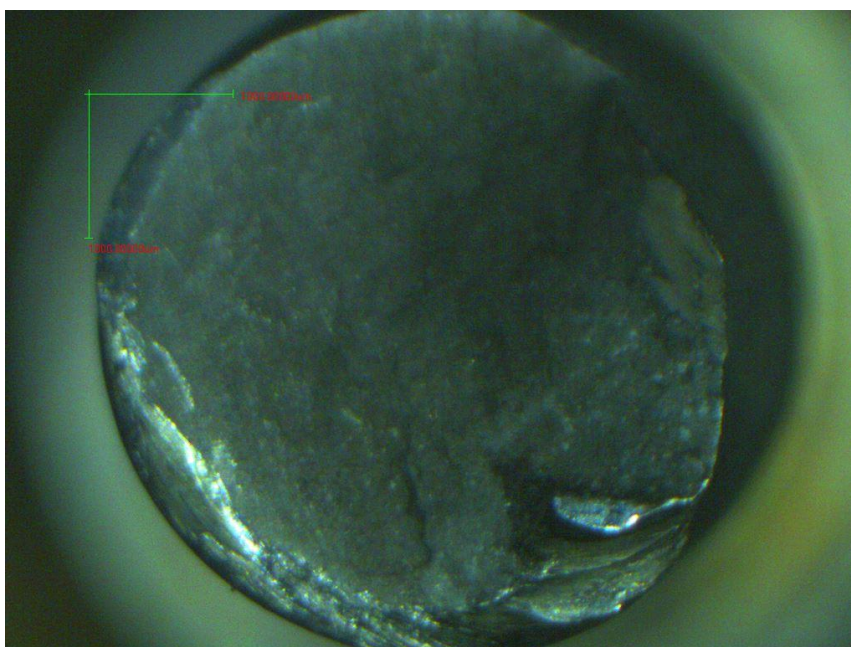


Slika 64. Trošenje lopatica turbine snimljeno stereo mikroskopom

Spojno vratilo koje spaja rotor kompresora i rotor vratila završava lomom, glavnim oštećenjem u promatranom slučaju havarije turbopunjača. Lomna površina vratila snimljena je najprije fotografskom kamerom (slika 65.), a zatim i stereo mikroskopom Mantis Elite-Cam HD (slika 66.)



Slika 65. Lomna površina spojnog vratila

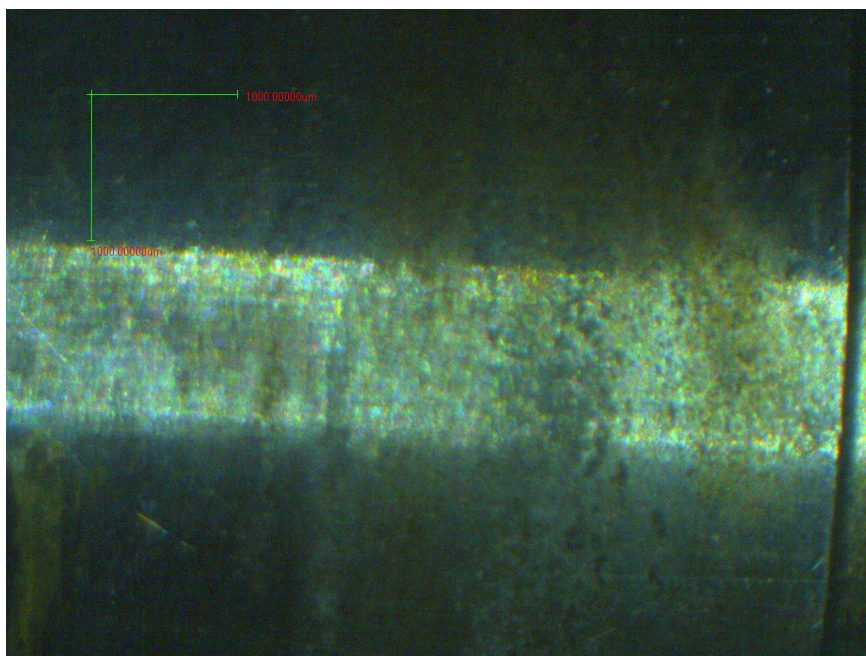


Slika 66. Lomna površina vratila snimljena stereo mikroskopom, povećanje 8x

Na spojnom vratilu, osim loma, vidljiva su i oštećenja uzrokovana abrazivskim mehanizmom trošenja. Slika 67. je snimljena fotografskom kamerom, a slika 68. je snimljena na stereo mikroskopu.



Slika 67. Abrazijska oštećenja spojnog vratila



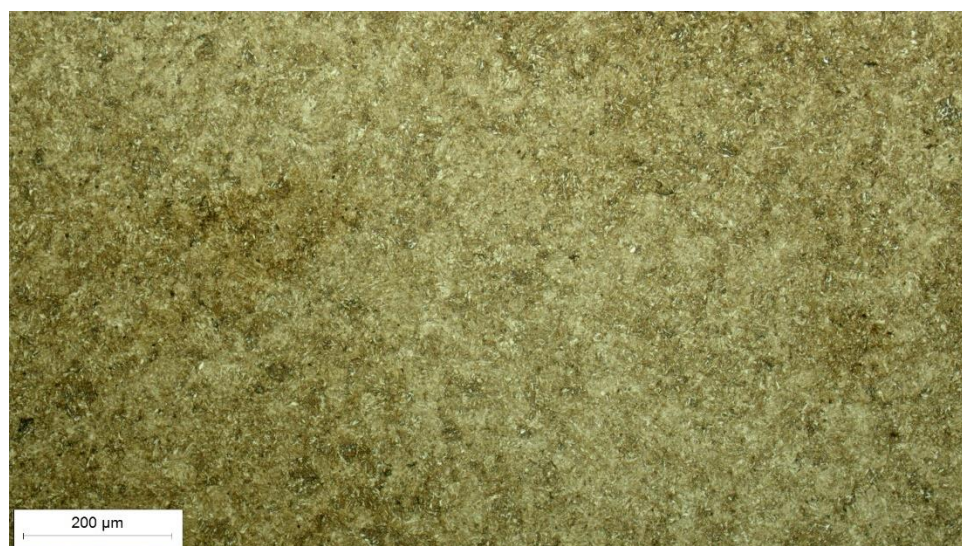
Slika 68. Abrazija spojnog vratila snimljena stereomikroskopom, povećanje 8x

9.5. Mikrostruktura i tvrdoća spojnog vratila

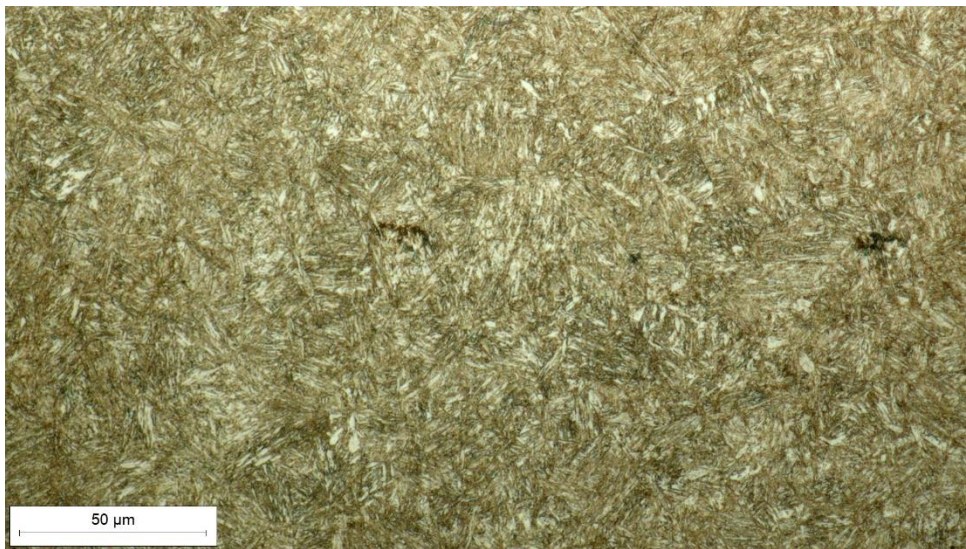
Mikrostruktura (slike 69. i 70.) i tvrdoća spojnog vratila ispitani su na pripremljenom metalografskom uzorku (prikazan na slici 41.). Tablica 11. prikazuje izmjerene vrijednosti tvrdoće HV1 na metalografskom uzorku spojnog vratila. Analizom izmjerenih vrijednosti utvrđena je srednja vrijednost tvrdoće spojnog vratila koja iznosi 413,8 HV1.

Tablica 11. Izmjerene vrijednosti tvrdoće spojnog vratila

Redni broj mjerenja	Tvrdoća (HV1)
1.	417
2.	412
3.	404
4.	417
5.	419
\bar{x}	413,8



Slika 69. Martenzitna mikrostruktura spojnog vratila, povećanje 200x



Slika 70. Martenzitna mikrostruktura spojnog vratila, povećanje 1000x

10. DISKUSIJA REZULTATA

Uzrok havarije turbopunjača, nakon promatranja i eksperimentalne analize, je lom spojnog vratila između rotora kompresora i rotora turbine. Prema slici 65. i 66. riječ je o žilavom lomu (budući da je u neposrednoj blizini loma prisutna plastična deformacija materijala) s karakterističnim oblikom lomne površine uslijed djelovanja uvojnog (torzijskog) naprezanja.

Žilavi lom spojnog vratila može biti uzrokovan lokalnim koncentратором naprezanja (uslijed abrazijskog trošenja vratila).

Drugi lomni dio vratila nije pronađen tijekom rastavljanja i analize turbopunjača, a uslijed visokih brzina vrtnje vratila, drugi lomni dio je uzrokovao jamice na kućištu kompresora, odnos udarnom silom je plastično deformirao materijal na otvoru kućišta kompresora (slika 55.).

Budući da je spojno vratilo više nije obnašalo svoju primarnu funkciju spojnog elementa između rotora turbine i rotora kompresora, rotor kompresora je došao u dodir s kućištem kompresora. Kontakt između rotora i statora uzrokovao je oštećenja lopatica (slika 57.), abrazijska oštećenja kućišta (slike 58. i 59.) te u konačnici lom rotora (slika 50.).

Abrazijska oštećenja kućišta kompresora (slike 58. i 59.) posljedica su i razlike tvrdoće između rotora kompresora (151,8 HV1) te kućišta kompresora (87,2 HV1).

Lom spojnog vratila izazvao je kontakt rotora i kućišta turbine te posljedična vidljiva oštećenja na lopaticama izrađenih od superlegure na bazi nikla (slika 64.)

Nakon analize havarije, turbopunjač je bilo potrebno zamijeniti u servisnoj stanici za gospodarska vozila.

11. ZAKLJUČAK

U radu je opisana analiza havarije turbopunjača iz dostavnog cestovnog vozila.

U teorijskom dijelu rada opisana je povijest razvoja i primjene turbopunjača, princip rada i glavni dijelovi turbopunjača, materijali i proizvodni postupci od kojih se izrađuju dijelovi turbopunjača te najčešći kvarovi turbopunjača.

U eksperimentalnom dijelu rada analiziran je slučaj havarije turbopunjača izuzetog iz gospodarskog vozila. Na oštećenim dijelovima turbopunjača provedena je kemijska analiza putem nerazorne metode fluorescentne spektrometrije (XRF), ispitana je tvrdoća pomoću Vickers metode te mikrostruktura svjetlosnom mikroskopijom.

Na temelju rezultata provedenih ispitivanja, za smanjenje trošenja strojnih dijelova i sprječavanje havarije turbopunjača, preporučuju se sljedeće mjere:

- Kvalitetan izbor materijala zbog karakterističnih radnih uvjeta turbopunjača (visoke temperature ispušnih plinova i visoke brzine vrtnje sklopa rotor kompresora – spojno vratilo – rotor turbine)
- Kvalitetno provedena toplinska obrada dijelova turbopunjača
- Osigurati odgovarajuće podmazivanje dijelova turbopunjača s ciljem smanjenja trošenja strojnih dijelova i postizanja odgovarajućeg sustava hlađenja turbopunjača

LITERATURA

- [1] Mahalec I., Lulić Z., Kozarac D.: Motori s unutarnjim izgaranjem, FSB Zagreb, 2010.
- [2] Ivušič V., Franz M., Španiček Đ., Ćurković L.: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2018.
- [3] Grilec K., Jakovljević S.: Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] ... Engineering Properties of ALLOY 713C, The International Nickel Company, Inc, 1961 (https://nickelinstitute.org/media/2487/alloys-713c_337.pdf) (3.1.2023.)
- [5] ...ASTM A 372/A 372M – 03, ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys, , West Conshohocken, USA, 2003
- [6] <https://steelforge.com/inconel-713c/> (3.1.2023.)
- [7] <https://aet-turbos.co.uk/turbocharged-beginnings-an-early-history-of-the-turbo/> (3.1.2023.)
- [8] M. Summers: ABB turbochargers – history and milestones, ABB Review 2/2007, 86-90
- [9] Bukovnik, Saša et al., Turbocharger Dynamic Analysis : Advanced Design Simulation in Time Domain Using CFD Predicted Thermal Boundary Conditions, TECHNISCHE MECHANIK, 37, 2-5, (2017), 409-421
- [10] <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/turbo-replacement/turbocharger-bearing-systems/> (11.1.2023.)
- [11] MAHLE, Turbocharger: Damage Profiles, Causes and Prevention, Aftermarket, Technical information, MAHLE GmbH, Stuttgart, 2022
- [12] Bruno, T.J. i sur. ASM Handbook Vol. 10 Materails characterisation, ASM International, Metal Park, USA, 2020
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger> (3.1.2023.)
- [14] Cobb, H.M. ed.; Steel product manual: stainless steels, Iron &Steel Society, Warrendalle, USA, 1999
- [15] Miller K.J., TURBO Real World High-Performance Turbocharger Systems, CarTech, North Branch, Broklands Books, Bankmedow, Australia, 2008
- [16] <https://lubricants.totalenergies.com/turbocharger-and-lubrication> (20.1.2023.)

- [17] Liu, Z. et. al., Dynamic Behaviour Analysis of Turbocharger Rotor-Shaft System in Thermal Environment Based on Finite Element Method, Journal of Shock and Vibration, Hindawi, Volume 2020, Article ID 8888504,1
- [18] Moriera, M.F., et.al., Microstructural and mechanical characterization of as-cast nickel-base superalloy (IN-713C), International Journal of Metalcasting, October 2020
- [19] <https://engineeringlearn.com/types-of-turbocharger/> (10.1.2023.)
- [20] <https://www.veikl.com/d/Chevrolet-Corvaire-Brochure-1964-EN-46130> (3.1.2023.)
- [21] <https://www.comparaencasa.com/seguros-de-auto/novedades/mercedes-300-sd-w116-el-primer-turbodiesel-de-la-historia/> (3.1.2023.)
- [22] <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/turbocharger-components-working-principles-and-types/> (10.1.2023.)
- [23] <https://www.enginelabs.com/news/from-sand-to-turbocharger-check-out-how-its-made/> (10.1.2023.)
- [24] <https://www.youtube.com/watch?v=NNObdXZhFjs> (18.1.2023)
- [25] (18.1.2023.) Arab. S.B. et. al. Stability analysis of internally damped rotating composite shafts using a finite element formulation, Comptes Rendus Mécanique, Volume 346, Issue 4, April 2018, 291-307
- [26] <https://waykenrm.com/blogs/5-axis-cnc-machining/> (3.1.2023.)
- [27] <https://hartzell.aero/ball-bearings-turbochargers-great-cars-not-good-aircraft/> (10.1.2023.)
- [28] https://www.turborebuild.co.uk/webshop/prod_3462515-T2-T25-T28-Wide-Journal-Bearing-Turbo-Repair-Rebuild-Service-Repair-Kit-fits-Garrett-Turbocharger.html (10.1.2023.)
- [29] <https://www.phytec.com/solution/olympus-xrf-analyzer/> (19.1.2023.)
- [30] <https://www.mylittlesalesman.com/new-cumminsholset-turbo-bearing-housing-3522740-9494532> (10.1.2023.)
- [31] <https://eu-turbo.com/our-services/> (3.1.2023.)
- [32] <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/xrf-spectrometers/how-does-xrf-work.html> (19.1.2023.)
- [33] ... EN 13835:2012 Founding - Austenitic cast irons, Technical Committee CEN/TC 190 - Foundry technology, Brussels, 2012
- [34] <https://www.marineinsight.com/main-engine/what-is-turbocharger-surfing/> (10.2.2023.)
- [35] <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/how-a-turbo-works/broadest-turbo-range/small-wastegate-turbos/> (11.2.2023.)

[36] <https://www.bahmueller.de/en-us/precision-grinding/applications/turbocharger.html>

(11.2.2023.)

[37] <https://www.uacj.co.jp/english/products/sheeting/01shurui.html> (11.2.2023.)

PRILOZI

I. CD-R disc