



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

ANALIZA POPRAVILA GREDI MENJALNIKA

Mentor: mag. Slavko Božič, univ. dipl. inž. str.
Lektorica: dipl. sloven. Mateja Goršič

Kandidat: Aljaž Molk

Ljubljana, oktober 2024

ZAHVALA

Najprej bi se iskreno zahvalil mentorju mag. Slavku Božiču, ki me je z jasnimi napotki in veliko ažurnostjo natančno usmerjal in tako pomagal pri fokusiranemu pisanju naloge.

Na koncu bi se zahvalil tudi družini, za spremljanje in vso podporo, ki so mi jo nudili tekom študija.

IZJAVA

Študent Aljaž Molk izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Slavka Božiča, univ. dipl. inž. str.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne: _____

Podpis: _____

POVZETEK

V podjetju Nomago d. o. o. se srečujemo z napako in odpovedjo menjalniškega sklopa na avtobusih znamke Mercedes-Benz. Do te napake pride zaradi porušitve gredi menjalnika, kjer se pojavijo razpoke na površini, ki vodijo do odpovedi strojnega dela. V diplomski nalogi smo se odločili raziskati gred menjalnika, ki je bila navarjena z laserskim postopkom navarjanja. Gred smo najprej analizirali, da smo lahko določili iz kakšnega materiala je naša gred. Nato smo na gredi izvedli različne teste, s katerimi smo ovrednotili lastnosti materiala. Najprej smo po Vickers postopku določili mikrotrdoto, nato izmerili zaostale napetosti v materialu in nenazadnje preučili mikrostrukturo po navarjanju. Poleg tega pa smo izvedli še stroškovno analizo za primer popravila in ločeno za primer menjave gredi z novo.

V diplomski nalogi se je skozi celotno analizo izkazalo, da je popravljena gred, ki je bila navarjena s postopkom laserskega navarjanja primerna. Še več, stroškovna analiza je pokazala, da menjava gredi z novo, kot jo predpisuje proizvajalec, ni rentabilna in upravičena. Stroški menjave bistveno narastejo zaradi po naše neupravičene zamenjave vseh ostalih delov v menjalniškem sklopu.

KLJUČNE BESEDE

- gred menjalnika
- lasersko navarjanje
- mikrotrdota
- zaostale napetosti
- stroškovna analiza

ABSTRACT

The company Nomago d. o. o. suffers a fault and failure of the gearbox in Mercedes-Benz buses. This failure occurs due to the collapse of the transmission shaft, causing cracks on the surface that lead to the failure of the machine part. In the diploma thesis, we decided to examine the transmission shaft, which was welded using a laser welding process. First, we analysed the shaft to determine what material our shaft was made of. We then carried out various tests on the shaft to evaluate the properties of the material. We first determined the microhardness using the Vickers method, then measured the residual stresses in the material and finally examined the microstructure after welding. In addition, we carried out a cost analysis for the case of repair and separately for the case of replacing the shaft with a new one.

In the thesis, the entire analysis showed that the repaired shaft, which was welded using the laser welding process, was suitable. In addition, the cost analysis showed that the replacement of the shaft with a new one, as prescribed by the manufacturer, is not profitable and justified. The replacement costs increase considerably because we are replacing all other parts of the gearbox without justification.

KEYWORDS

- transmission shaft
- laser welding process
- microhardness
- residual stresses
- microstructure
- cost analysis

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema	1
1.2	Cilji naloge.....	1
1.3	Predstavitev okolja	1
1.4	Predpostavke in omejitve	1
1.5	Metode dela	2
2	LEGIRANA JEKLA	3
2.1	Malolegirana jekla.....	3
2.2	Srednje in visoko legirana jekla	3
3	REPEATURNO VARJENJE.....	5
3.1	Lasersko navarjanje	6
3.2	Laserji	7
3.3	Lasersko navarjanje z žico	9
4	OBSTOJEČE STANJE.....	12
5	PRAKTIČNI DEL	13
5.1	Določitev materiala po XRF metodi	13
5.2	Merjenje mikrotrdote po Vickersovem postopku	15
5.3	Merjenje zaostalih napetosti z XRD metodo	21
5.4	Mikrostruktura navarjene gredi	24
5.5	Popis in preračun stroškov	28
5.6	Povzetek raziskave	29
6	ZAKLJUČKI.....	31
7	LITERATURA IN VIRI	33

KAZALO SLIK

Slika 1: Schaefflerjev diagram	4
Slika 2: Shema laserskega navarjanja: (a) navarjanje z žico, (b) navarjanje s koaksialnim dovodom praška, (c) navarjanje s stranskim dovodom praška	6
Slika 3: Odvisnost položaja gorišča in vpliv na globino uvara	7
Slika 4: Shema Nd: YAG trdninskega laserja	8
Slika 5: Prikaz delovanja reparaturnega navarjanja z Nd: YAG trdninskim laserjem	9
Slika 6: Shematski prikaz laserskega reparaturnega navarjanja: 1- laserski žarek, 2- dodajni material, 3- obdelovanec, 4- lega žarišča žarka, 5- optični sistem za krmiljenje žarka, 6- dovod zaščitnega plina, X- mesto, kjer nastaja nadtlak plina, Y- mesto, kjer nastaja podtlak in slaba zaščita	9
Slika 7: Princip regulacije laserskega pulza: t_p – čas pulza, t_m – čas med dvema pulzoma, ν – frekvenca pulzov, P_i – moč pulza, E_p – energija pulza	10
Slika 8: Gred menjalnika (pozicija 5) z ostalimi strojnimi elementi	13
Slika 9: Merilnik mikrotrote Wilson VH1202	16
Slika 10: Prikaz odtiska pri merjenju mikrotrote po Vickersu z diamantno piramido s kotom med stranicama $\theta = 136^\circ$ in diagonalno d	16
Slika 11: Ponazoritev meritev mikrotrot na vzorcu	17
Slika 12: Potek meritev mikrotrot na navarjeni in neobdelani gredi	19
Slika 13: Potek meritev mikrotrot na navarjeni in obdelani (brušeni) gredi	20
Slika 14: Izmere globin posameznega sklopa na navarjeni gredi	21
Slika 15: Naprava za merjenje zaostalih napetosti po XRD metodi	22
Slika 16: Zaostale napetosti v odvisnosti od mesta merjenja na navarjeni gredi	22
Slika 17: Zaostale napetosti v odvisnosti od mesta merjenja na navarjeni in brušeni gredi	23
Slika 18: Optični mikroskop Axioscope 5 proizvajalca ZEISS	24
Slika 19: Razrezana in vstavljena gred, vložena v bakelitno maso	25
Slika 20: Mikrostruktura vzorca pri 50 x povečavi	25
Slika 21: Mikrostruktura navarjenega sloja pri 200 x povečavi	26
Slika 22: Mikrostruktura navarjenega sloja pri 100 x povečavi	27
Slika 23: Mikrostruktura navarjenega in brušenega sloja pri 50 x povečavi	27

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vrednosti glavnih kemijskih elementov, izmerjenih po XRF metodi	14
Tabela 2: Vrednosti dodatnih kemijskih elementov, izmerjenih po XRF metodi	14
Tabela 3: Meritve mikrotrot po globini	18
Tabela 4: Preračun stroškov v primeru popravila gredi	28
Tabela 5: Preračun stroškov v primeru menjave gredi	29

KRATICE IN AKRONIMI

Uporabljene kratice, okrajšave in akronime razložimo na naslovnih straneh, pred uvodom.

CCT:	Kontinuirni premenski diagram
CO ₂ laser:	Vrsta plinskega laserja
CW:	Kontinuirni laserski žarek
Fe-C:	Sistem stanja v diagramu železo-ogljik
Fe-Fe ₃ C:	Fazni diagram za jekla železo-železov karbid
HNO ₃ :	Dušikova kislina
HV:	Trdota izmerjena po Vickersu
MIG:	Varjenje v nevtralnem žlahtnem plinu
Nd: YAG :	Vrsta trdninskega laserja
Q-switch:	Preklopnik kvalitete pri laserjih
SEM	Vrstični elektronski mikroskop
TIG:	Varjenje z netaljivo volframovo elektrodo
XRD:	Rentgenska difrakcijska metoda
XRF:	Rentgenska fluorescenčna spektrometrija
α -železo:	Ferit (vrsta železa obstojnega do 912 °C)
γ -železo:	Avstenit (vrsta železa obstojnega med 912 °C in 1394 °C)
δ -železo:	Ferit (vrsta železa obstojnega med 1394 °C in tališčem železa)

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V diplomski nalogi bomo predstavili problem porušitve gredi menjalnika na avtobusih znamke Mercedes-Benz in popravila le-te z laserskim navarjanjem. Osredotočili se bomo na popravilo in optimizacijo popravila gredi. Prav zaradi takega načina popravila ni potrebno menjati ostalih vitalnih delov, ki se zamenjajo v primeru, da kupimo in menjamo celoten sklop. Upoštevati moramo tudi, da ostali deli, ki bi bili menjani v primeru celotne zamenjave sklopa niso obrabljeni in je tak strošek potemtakem povsem nepotreben.

1.2 Cilji naloge

V diplomski nalogi bomo predstavili in izvedli postopek laserskega navarjanja ter ga stroškovno ovrednotili. Pri tem bomo podali smernice za nadaljnjo vzdrževanje, da se take napake v čim večji meri tudi odpravijo ali vsaj omilijo ter da se strojnemu delu podaljša življenjska doba obratovanja.

1.3 Predstavitev okolja

Nomago d. o. o. je podjetje, ki je zavezano k zagotavljanju visokega standarda storitev, kar jih postavlja v ospredje prevoznega sektorja. Z več kot 1200 zaposlenimi in mrežo več kot 500 partnerjev po svetu so sinonim za zanesljivo, kakovostno in trajnostno popotniško storitev. Kot strokovnjaki na področju potovanj vedno širijo mrežo javnega prevoza in vlagajo v nove koncepte mobilnosti ter družbeno odgovornost. Z več kot 700 avtobusi omogočajo ugoden in trajnosten prevoz po Sloveniji in Evropi, pri čemer iniciativa 50 : 1 umakne do 50 vozil s ceste za vsak poln avtobus.

1.4 Predpostavke in omejitve

Menjalnik je ključna komponenta pogonskega sklopa, ki omogoča prilagoditev moči motorja za različne vozne razmere in hitrosti. V primeru odpovedi le ene komponente v sklopu se vozilo ustavi. Ena od komponent je gred menjalnika, na kateri so nameščeni tudi ostali strojni deli, kot so: zobniki, sinhroni, distančniki, ležaji itd. V okviru diplomske naloge bomo preverili dve hipotezi.

Prva hipoteza: Na pulznem Nd: YAG laserju lahko izberemo take pogoje navarjanja, da zagotovimo dovolj globoko modifikacijo mikrostrukture z enako ali povišano mikrotrdoto. Vprašanja, na katera je potrebno odgovoriti so, ali je lasersko navarjanje gredi tako kakovostno, kot če bi gred zamenjali z novo ter koliko ur delovanja bo gred

zdržala. Odgovore na ta vprašanja bomo dobili s pomočjo analize materiala, in sicer z meritvami mikrotrdote, zaostalih napetosti in mikrostrukture ter mikrokemijske analize.

Druga hipoteza: Po laserskem navarjanju ocenimo denarne stroške celotnega procesa popravila gredi in jih primerjamo s stroški menjave novega sklopa. Vprašanja, ki se pojavijo so, kakšni so stroški popravila in kakšni so stroški zamenjave celotnega sklopa ter ali se z ekonomskega vidika popravilo gredi obrestuje. Na ta vprašanja bomo odgovorili s stroškovno analizo navarjanja.

1.5 Metode dela

Za doseganje ciljev diplomske naloge bomo uporabili metode, kot so analitična metoda, primerjalna metoda in opisna metoda, povezana z metodo združevanja.

V teoretičnem delu smo uporabili opisno metodo in metodo združevanja. Opisna metoda je metoda opisovanja posameznih pojmov. S tema dvema metodama smo popisali princip navarjanja gredi, analizo obstoječega materiala, izbiro dodatnega materiala ter jih podkrepili s primerjavo različnih avtorjev.

V raziskovalnem delu smo uporabili analitično metodo, kjer smo razčlenili celoto na posamezne dele. Primer popravila gredi smo razdelili na pripravo gredi za navarjanje, na proces navarjanja dodatnega materiala na gred ter na končno obdelavo gredi, v katero spada brušenje in poliranje gredi na predpisano toleranco. Prav tako smo analitično metodo uporabili pri razčlenitvi stroškovnega dela. Na koncu pa smo uporabili še primerjalno metodo v neposredni povezavi z metodo združevanja, kjer smo povezali našo raziskavo z raziskavami drugih avtorjev.

2 LEGIRANA JEKLA

Jeklo je zlitina, ki je sestavljena pretežno iz železa in manjših količin ogljika, katerih delež variira glede na stopnjo in kakovost jekel. Legirana jekla so vrsta jekel, ki mu je poleg ogljika namerno dodan eden ali več kemijskih legirnih elementov z namenom, da se dosežejo določene specifične fizikalne lastnosti ali značilnosti. Najbolj pogosti legirni elementi so molibden, mangan, nikelj, silicij, bor, krom in vanadij. Legirana jekla se običajno delijo v dve skupini: malolegirana jekla in srednje do visoko legirana jekla. Razlika med njima je relativna, vendar se na splošno strinjamo, da so jekla, ki vsebujejo več kot osem odstotkov legirnih elementov glede na njihovo težo, visoko legirana jekla. Malolegirana jekla so pogostejša. Fizikalne lastnosti teh jekel se spreminjajo z dodajanjem legirnih elementov, kar jim daje večjo trdoto, vzdržljivost, odpornost proti koroziji ali žilavost v primerjavi z ogljikovimi jekli. Za doseganje optimalnih lastnosti je pogosto potrebna tudi naknadna toplotna obdelava.

2.1 Malolegirana jekla

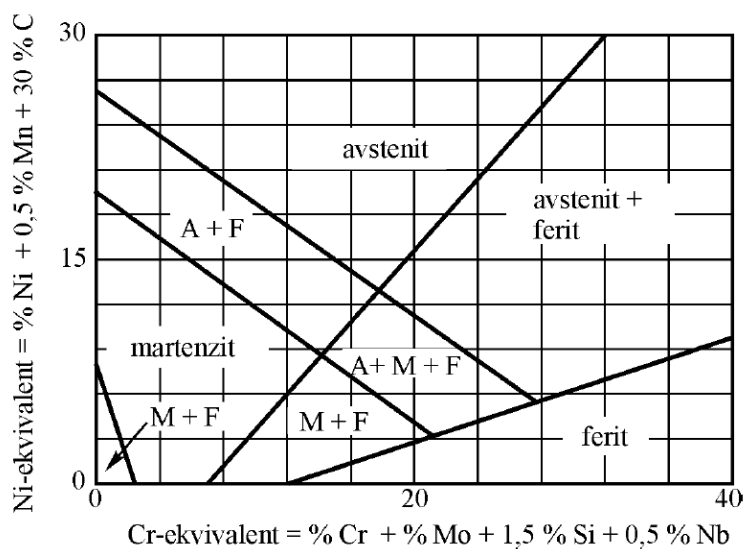
Malolegirana jekla imajo boljše lastnosti od ogljikovih jekel zaradi dodatkov kroma, niklja in molibdena. Glavni namen legirnih elementov je povečanje kaljivosti in prekaljivosti, kar nam omogoča optimiranje mehanskih lastnosti in žilavosti s pomočjo toplotne obdelave. V manjšem obsegu pa z dodajanjem legirnih elementov izdelujemo jekla, ki imajo povečano odpornost proti propadanju v določenih obratovalnih pogojih (Kovač, 1999). Tudi malolegirana jekla delimo na več načinov, npr. po:

- kemijski sestavi,
- toplotni obdelavi,
- namenu uporabe itd.

Malolegirana jekla se običajno imenujejo legirana jekla, katerih se legirni elementi gibljejo med 1 % in 7 %. Najpogostejši so krom, nikelj, molibden in vanadij.

2.2 Srednje in visoko legirana jekla

V legiranih jeklih in litinah so količine zlitinskih elementov tolikšne, da bistveno spremenijo fazna ravnotežja v sistemih Fe-C in Fe-Fe₃C. Nekateri zlitinski elementi kot npr. nikelj stabilizirajo fazo γ (avstenit). Te elemente imenujemo gamageni. Drugi zlitinski elementi kot npr. krom stabilizirajo fazo α (ferit), tako da se polji α in δ združita, ker imata α in δ enako kristalno zgradbo. Te elemente imenujemo alfageni. V jeklih, ki vsebujejo tako alfagene kot gamagene elemente, je struktura jekel odvisna od njihovega deleža.



Slika 1: Schaefflerjev diagram
(Vir: Zupanič & Anžel, 2007)

Strukturno odvisnost od deleža prikazuje Schaefflerjev diagram (Slika 1), ki ima na abscisi kromov ekvivalent, na ordinati pa nikljev ekvivalent. Nikljev ekvivalent je tisti delež niklja, ki ima enak učinek kot vsi gamageni elementi v zlitini. Glede na enačbo na ordinati na Sliki 1 ima ogljik 30 x močnejši učinek kot nikelj (Zupanič & Anžel, 2007).

3 REPEATURNO VARJENJE

Reparaturno varjenje orodij predstavlja enega izmed najpomembnejših ukrepov za povečanje produktivnosti ter znižanje proizvodnih stroškov v orodjarstvu, livarstvu in drugih sorodnih panogah. Ta proces je pogosto potreben zaradi napak pri izdelavi matric, pri spremembi dimenzij delov orodij, ali pri poškodbah, ki nastanejo med samim obratovanjem. Popravilo zahteva natančno odstranitev poškodovanega materiala na površini in njegovo nadomestitev z novim materialom. Ta material mora biti dobro spojen, imeti pa mora tudi podobne lastnosti kot osnovni material. Popravilo na koncu vključuje tudi ustrezno zaključno mehansko obdelavo.

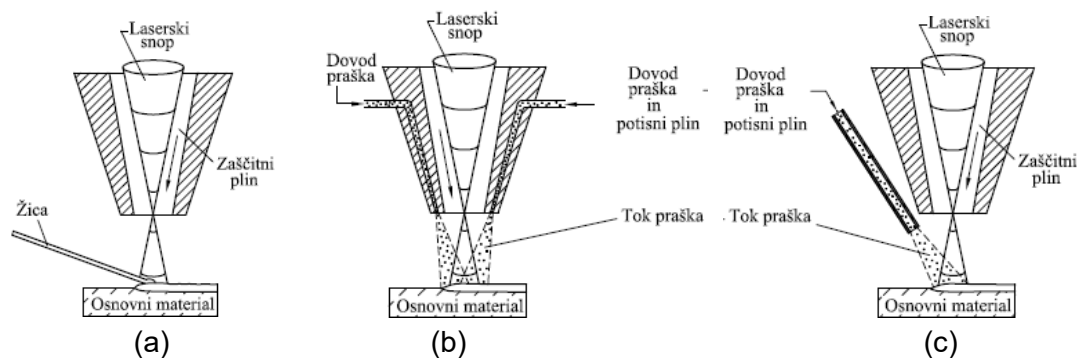
Popravljanje poškodovanega ali počenega strojnega dela lahko poteka z različnimi postopki varjenja, kot so TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas) in v zadnjem času vse bolj aktualno lasersko navarjanje ali varjenje, ki pa je predvsem odvisno od obsega potrebnega popravila. Z obnavljanjem strojnih delov pogosto dosežemo celo izboljšanje mehanskih lastnosti, kar dodatno povečuje vrednost tega procesa. Prihranki, ki jih prinaša obnavljanje poškodovanih površin ali izdelava novih delovnih površin, so lahko zelo veliki.

Tehnologija navarjanja se običajno določa s pomočjo diagramov CCT (Continuous Cooling Transformation) in enačb za izračun časovnega intervala $t_{8/5}$. Ta interval, ki se nanaša na hitrost ohlajanja v temperaturnem območju med 800 °C in 500 °C, je ključen za oblikovanje strukture jekel (Kejžar, 1984). Temperaturna območja predgrevanja so pri orodnem jeklu za delo v hladnem od 100 °C do 300 °C, za orodna jekla za delo v vročem od 200 °C do 400 °C in za hitroreznna jekla od 400 °C do 500 °C (Rihar, 1986). Približne ocene o tem, kdaj in do katere temperature je potrebno predgreti orodje, ki ga obnavljamo, podajajo tudi napotki proizvajalcev jekla. Pri postopku obnavljanja orodij z navarjanjem je ključno natančno preučiti dogajanja v toplotno vplivanem področju, ki nastanejo ob varu. Procesi, kot so predgrevanje orodja, kontroliran vnos toplote med varjenjem ter nadzorovano ohlajevanje po varjenju, igrajo pomembno vlogo pri preprečevanju nastanka razpok in neželenih strukturnih sprememb. Predgrevanje orodja pomaga zmanjšati toplotne napetosti, ki nastanejo zaradi temperaturnih gradientov, medtem ko kontroliran vnos toplote med varjenjem zagotavlja enakomerno porazdelitev toplote, kar zmanjšuje tveganje za nastanek zaostalih napetosti. Kontrolirano ohlajevanje po varjenju je prav tako bistveno, saj omogoča postopno sproščanje toplotnih napetosti in stabilizacijo mikrostrukture navara in njegove okolice. Z upoštevanjem teh ukrepov lahko učinkovito preprečimo škodljive strukturne spremembe in zagotovimo trajnost in kakovost obnovljenih orodij.

3.1 Lasersko navarjanje

Lasersko navarjanje je napreden proizvodni proces, namenjen oblikovanju zaščitnega sloja za izboljšanje korozijske in obrabne obstojnosti ali za popravilo obrabljenih strojnih delov in komponent. V tem postopku se uporablja visokoenergetski laserski snop za natančno raztaljevanje osnovnega materiala in dodajnega materiala. Med laserskim navarjanjem se dodajni material, pogosto v obliki praška ali žice, dovaja v območje laserskega snopa, kjer se hitro raztali in nato strdi, ko se združi z osnovnim materialom (Ion, 2005).

Na Sliki 2 (a) je prikazana metoda dovajanja varilne žice v laserski snop, ki je pogosto uporabljena v orodjarski industriji, še posebej pri manj zmogljivih Nd: YAG laserjih za navarjanje orodij na manjših površinah. V tem postopku se tanka varilna žica ročno dovaja v laserski snop, kar omogoča natančno obdelavo manjših območij. Pri večjih industrijskih laserskih sistemih se uporablja naprednejše metode laserskega navarjanja s stranskim ali koaksialnim dovajanjem praška s pomočjo potisnega plina. Na Sliki 2 (b) je prikazano navarjanje s koaksialnim dovajanjem praška, ki omogoča enakomerno porazdelitev dodajnega materiala v laserskem snopu, kar je ključnega pomena za homogeno in kvalitetno prevleko. Na Sliki 2 (c) je prikazano navarjanje s stranskim dovajanjem praška, ki je prav tako učinkovita metoda za nanos materiala, zlasti v primerih, kjer je potrebna natančna kontrola nanosa in debeline slojev.



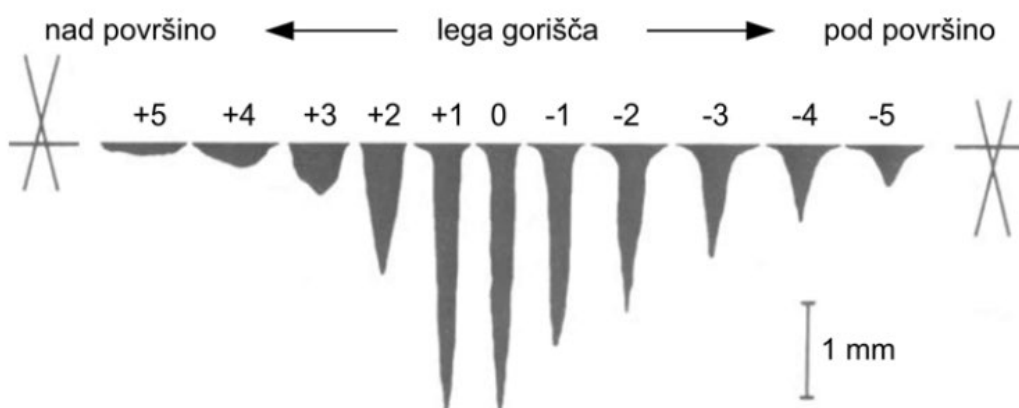
Slika 2: Shema laserskega navarjanja: (a) navarjanje z žico, (b) navarjanje s koaksialnim dovodom praška, (c) navarjanje s stranskim dovodom praška (Lastni vir)

Te tehnike omogočajo prilagodljivost in natančnost pri obnovi in izdelavi slojev, kar je ključnega pomena za različne industrijske aplikacije, zlasti v orodjarstvu in drugih področjih, kjer so potrebni precizni in trpežni nanosi.

3.2 Laserji

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je naprava, ki oddaja ozek snop svetlobe določene valovne dolžine, ki ima stalno fazno razliko med poljubnimi točkami v snopu (koherenca). Nekatere snovi imajo lastnost, da se njihovi atomarni sistemi vzbujajo iz svojega osnovnega energetskega stanja v višje stanje, ko so izpostavljeni elektromagnetnemu valovanju ali obsevanju s fotoni. Takšni vzbujeni sistemi se hitro vrnejo v svoje osnovno energetske stanje in pri tem oddajajo pridobljeno energijo v obliki svetlobnega sevanja. Laserski žarek nastane, ko se svetlobno sevanje iz izvora večkrat odbija med dvema zrcalnima površinama. Ko energija dovolj naraste, žarek prebije eno od zrcal, ki je delno prepustno. Pri obdelavi z laserskimi žarki se močno koncentrirana energija žarka ob stiku z obdelovancem spremeni v toploto.

Ker imajo usmerjeni laserski žarki stožčasto obliko, je pri delu z laserjem zelo pomembno določiti položaj gorišča, ki predstavlja najožji del žarka, kjer je energija najgostejša, kar je prikazano na Sliki 3. Pri pulzних laserjih na globino pretalitve vplivata tako položaj gorišča kot tudi energija pulza in njena gostota na površini obdelovanca (Ivančič, 2010).



Slika 3: Odvisnost položaja gorišča in vpliv na globino uvara
(Vir: Ivančič, 2010)

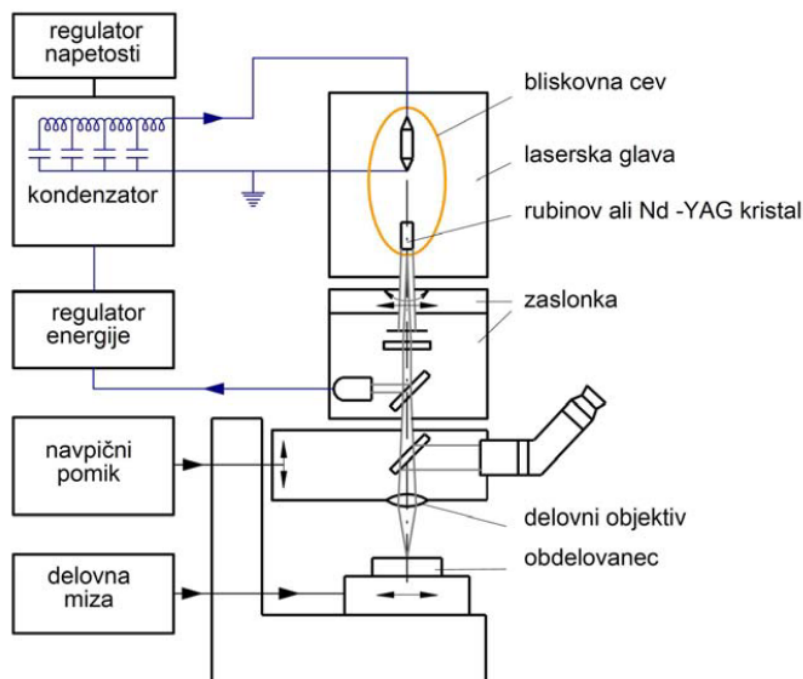
Za navarjanje se najpogosteje uporabljajo plinski (CO_2) in trdninski (Nd: YAG) laserji: **Plinski laser** je molekularni laser, ki deluje na principu nihajnih in rotacijskih energijskih stanj molekul. Molekula, sestavljena iz več atomov, ima vrsto notranjih prostostnih stopenj, ki vključujejo nihanje atomov in rotacijo molekule. Po zakonih kvantne mehanike sta nihajna in rotacijska energija kvantizirani, kar pomeni, da obstaja spekter ustreznih diskretnih energijskih stanj. Laserska svetloba lahko nastane, ko pride do inverzije zasedenosti med nihajnimi in rotacijskimi energijskimi

stanji. Najbolj znan med njimi je CO₂ laser, ki se ga zaradi večjih moči uporablja za rezanje, varjenje in vrtanje.

Trdninski laser je laser, ki za ojačanje svetlobe uporablja kristal, ki je na dveh končnih ploskvah vzporedno brušen in prevlečen z zrcalnim premazom, pri čemer je ena ploskev delno prepustna za žarke. Med najpomembnejšimi kristali, ki se danes uporabljajo v laserskih napravah sta:

- Nd: YAG (Nd – neodim, kovina iz skupine lantanoidov; Y – itrij, redka kovina; AG – pravilno kristaliziran aluminijev oksid) in
- rubinov kristal.

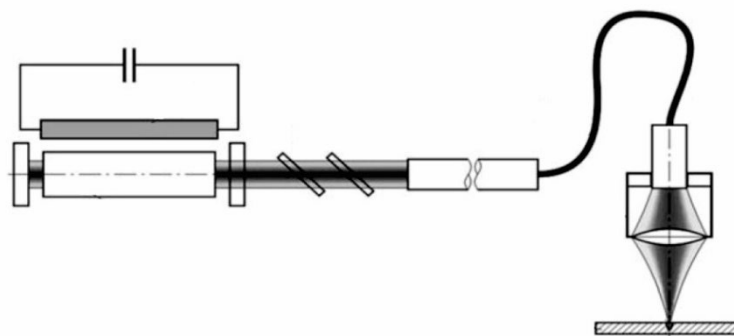
Pri Nd: YAG laserju je kot aktivni material uporabljen trikrat ionizirani neodimij (Nd³⁺), ki je vgrajen v kristal YAG (itrijev aluminijev granat) in služi kot gostiteljska matrica. YAG je kompleksen oksid s kemijsko formulo Y₃Al₅O₁₂. Delež itrijevih ionov, nadomeščenih z Nd³⁺ ioni, znaša med 1 % in 2 %. Laser oddaja svetlobo z valovno dolžino 1,064 μm. Nd: YAG laserji lahko oddajajo svetlobni tok s povprečno izhodno močjo do nekaj tisoč vatov (Ion, 2005). V načinu neprekinjenega delovanja (CW – continuous wave) delujejo do nekaj sto vatov, pri višjih močeh pa delujejo v pulznem načinu. Nd: YAG ima relativno visoko toplotno prevodnost, kar omogoča učinkovito hlajenje. Pulzni Nd: YAG laserji so lahko opremljeni s Q-switch (preklopnik kvalitete), ki omogoča generiranje več tisoč pulzov na sekundo. Shema takega laserja je predstavljena na Sliki 4.



Slika 4: Shema Nd: YAG trdninskega laserja
(Vir: Ivančič, 2010)

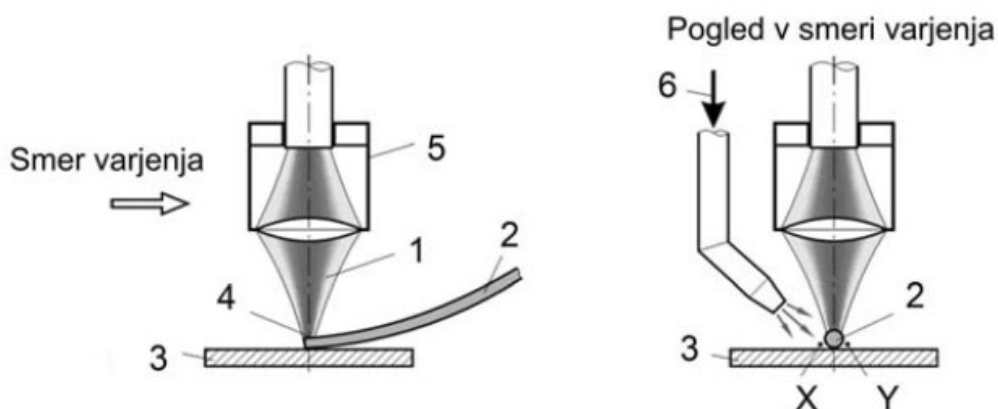
3.3 Lasersko navarjanje z žico

Za reparaturno navarjanje z žico se običajno uporabljajo pulzni Nd: YAG laserji. Pri teh laserjih se žarek oblikuje med popolnoma zrcalnim in delno prepustnim ogledalom ter se nato prevaja po optičnem vlaknu skozi optični sistem do mesta varjenja na obdelovancu, kar je prikazano na Sliki 5.



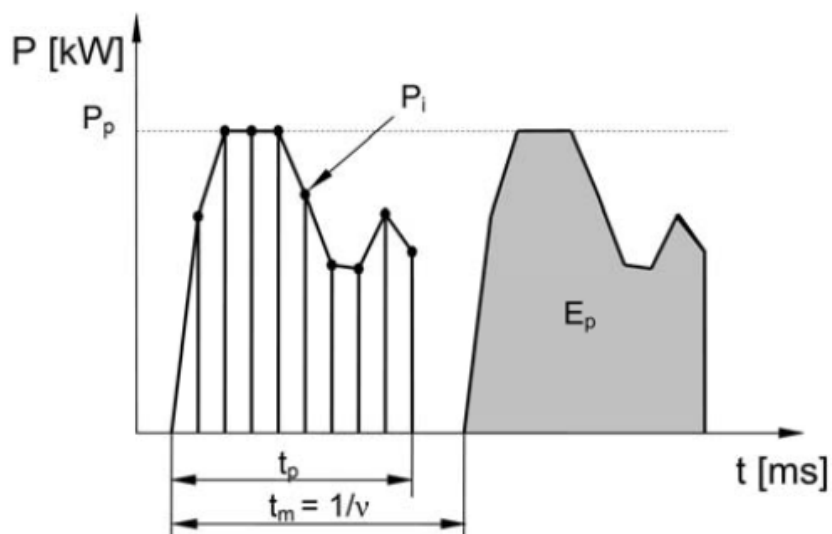
Slika 5: Prikaz delovanja reparaturnega navarjanja z Nd: YAG trdninskim laserjem
(Vir: Tušek, 2006)

Pri laserskem navarjanju z žico se uporablja tanka žica (premera med 0,15 mm in 0,8 mm) kot dodaten material, ki jo varilec ročno dovaja na območje, kjer laser seva na obdelovanca. Da bi zaščitili talino pred oksidacijo, je treba zvarno mesto zaščititi z inertnim plinom, kot sta argon (Ar) ali helij (He). Shematsko je lasersko reparaturno navarjanje popisano na Sliki 6.



Slika 6: Shematski prikaz laserskega reparaturnega navarjanja: 1- laserski žarek, 2- dodajni material, 3- obdelovanec, 4- lega žarišča žarka, 5- optični sistem za krmiljenje žarka, 6- dovod zaščitnega plina, X- mesto, kjer nastaja nadtlak plina, Y- mesto, kjer nastaja podtlak in slaba zaščita
(Vir: Pleterski, 2006)

Oblika laserskega pulza igra ključno vlogo pri izboljševanju kakovosti reparaturnega laserskega varjenja, še posebej pri varjenju težko varivih materialov. Poleg standardnega varjenja s pravokotno obliko laserskega bliska, ki ohranja konstantno moč P , omogoča uporaba ustreznega krmiljenja prilagajanje moči laserskega pulza, kar prikazuje Slika 7. S tem lahko vplivamo na dinamiko taline in hitrost ohlajanja. Lasersko reparaturno varjenje z žico ima najmanj pozornosti v primerjavi z drugimi metodami laserskega navarjanja. Vedani je raziskoval razvoj mikrostruktur na orodnih jeklih in primerjal mikrostrukture med varjenjem z laserjem in TIG postopkom (Vedani, Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding, 2004), prav tako pa je opisal težave pri navarjanju nitriranih in kromiranih orodnih jeklih (Vedani & et.al., Problems in laser repair-welding a surface-treated tool steel, 2007). Pomembno je omeniti tudi raziskave Capella in sodelavcev, ki so preučili vplive operaterja, parametrov in materialov pri navarjanju (Capello & Previtali, The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire, 2006) ter analizirali reparaturno varjenje sintranih orodij (Capello, Colombo, & Previtali, Repairing of sintered tools using laser cladding by wire, 2005).



Slika 7: Princip regulacije laserskega pulza: t_p – čas pulza, t_m – čas med dvema pulzoma, v – frekvenca pulzov, P_i – moč pulza, E_p – energija pulza
(Vir: Dürr, Holtz, & Kohlschütter, 2003)

Primernost reparaturnega laserskega varjenja v orodjarstvu sta potrđita tudi Sun (Sun, Sunada, & Tsujii, Crack Repair of Hot Work Tool Steel by Laser Melt Processing, 2001); (Sun, Fatigue behavior and fractography of laser-processed hot work tool steel, 2004) in Zuljan (Zuljan & Uran, 2010). Številni avtorji so raziskali optimizacijo laserskih pulzov (Lima, 2005); (Pinkerton, 2003), njihov vpliv na razvoj mikrostruktur (Kim H. L., 1999); (Malek Ghaini & et.al., 2007) in obliko termičnega polja (Fuerschbach & Eisler, 2001); (Kim & Peng, Melt pool shape and dilution of laser

cladding with wire feeding, 2000); (Kim & Peng, Plunging method for Nd : YAG laser cladding with wire feeding, 2000).

Pregled literature kaže, da še vedno obstaja veliko neraziskanih področij, vključno z navarjanjem in mikrostrukturnim obnašanjem večine orodnih jekel, še posebej težko varivih jekel z visoko vsebnostjo ogljika (C) in kroma (Cr).

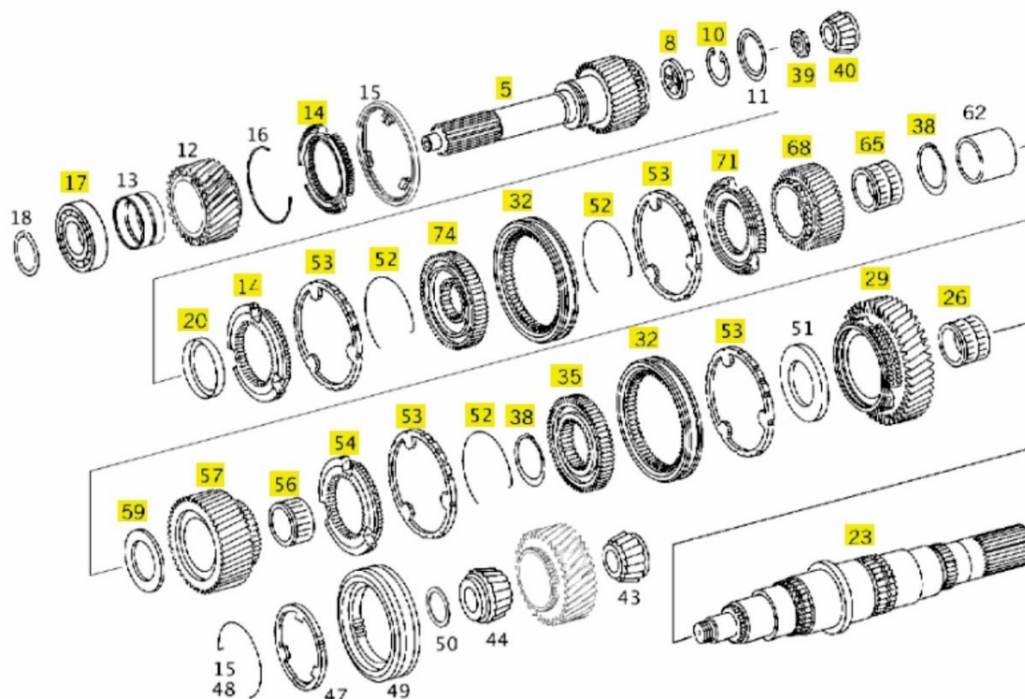
4 OBSTOJEČE STANJE

Stranka je podala povpraševanje po popravilu gredi menjalniškega sklopa. Do sedaj so se te gredi v celoti menjale skupaj s pripadajočimi deli. Ker gre z vidika človeških virov za izredno drag strojni del, predvsem pa cena naraste zaradi nadomestila tudi drugih originalnih strojnih delov, se je stranka odločila za popravilo le-te.

Na podlagi testov, ki popisujejo stanje površinskih in podpovršinskih slojev materiala smo izvedli različne teste, ki popisujejo integriteto površine. Te meritve so: določitev materiala z XRF metodo, meritve mikrotrdote po Vickersovem postopku, meritve zaostalih napetosti s pomočjo XRD metode in primerjava mikrostruktur s pomočjo optičnega mikroskopa ter nenazadnje popis in preračun stroškov.

5 PRAKTIČNI DEL

V tem poglavju se bomo posvetili testom, s katerimi lahko popišemo lastnosti materiala, v našem primeru gred menjalnika. Slika 8 prikazuje gred menjalnika, ki je na poziciji 5, zraven pa so še vsi pripadajoči strojni deli.



Slika 8: Gred menjalnika (pozicija 5) z ostalimi strojnimi elementi
(Lastni vir)

5.1 Določitev materiala po XRF metodi

Rentgenska fluorescenčna spektrometrija (XRF) je analitična tehnika, ki se uporablja za določanje kemične sestave materialov. Deluje tako, da vzorec obsevamo z rentgenskim sevanjem, kar povzroči, da atomi v vzorcu oddajo karakteristične rentgenske fluorescence. Ta fluorescenčna svetloba ima specifične valovne dolžine, ki so povezane s posameznimi elementi.

Vzorec smo obsevali z rentgenskimi žarki, kar povzroči, da atomi v vzorcu izpustijo svoje notranje elektrone. Ko se ti elektroni izpustijo, se v notranjih lupinah atomov pojavijo praznine. Elektroni iz zunanjih lupin se premaknejo na prosta mesta, kar povzroči, da se izpusti fluorescenčna svetloba z značilno valovno dolžino za vsak kemijski element. S pomočjo detektorja, ki zazna to fluorescenčno svetlobo, smo

analizirali in identificirali kemijske elemente v vzorcu ter ocenili njihovo koncentracijo. V Tabeli 1 so predstavljeni kemijski elementi, ki so glavni za določitev jekla.

Zlitina	Cr [%]	Cr _{Error} [%]	Ni [%]	Ni _{Error} [%]	Mo [%]	Mo _{Error} [%]	V [%]	V _{Error} [%]	Fe [%]
LA-4140	0,948	0,005	0,120	0,014	0,407	0,004	0,013	0,002	ost.
LA-4140	0,983	0,008	0,129	0,015	0,405	0,004	0,013	0,003	ost.
LA-4140	1,003	0,008	0,125	0,015	0,405	0,004	0,014	0,003	ost.

*Tabela 1: Vrednosti glavnih kemijskih elementov, izmerjenih po XRF metodi
(Lastni vir)*

Poleg glavnih kemijskih elementov imamo še dodatne kemijske elemente, ki nam točno določijo vrsto jekla, v tem primeru gre za jeklo 42CrMo4. To lahko potrdimo s Tabelo 2.

Zlitina	Mn [%]	Mn _{Error} [%]	Si [%]	Si _{Error} [%]	Cu [%]	Cu _{Error} [%]	Zn [%]	Zn _{Error} [%]
LA-4140	0,815	0,021	0,171	0,026	0,129	0,009	0,016	0,004
LA-4140	0,787	0,021	0,175	0,038	0,127	0,010	0,020	0,004
LA-4140	0,798	0,021	0,199	0,040	0,122	0,009	0,019	0,004

*Tabela 2: Vrednosti dodatnih kemijskih elementov, izmerjenih po XRF metodi
(Lastni vir)*

Med prednosti določitve materiala po XRF metodi štejemo:

- postopek ne poškoduje vzorca,
- analiza je hitra in zahteva minimalno pripravo vzorca,
- lahko se uporablja za analizo različnih vrst materialov, vključno z minerali, kovinami, gradbenimi materiali in okoljskimi vzorci.

Seveda pa ima metoda tudi svoje omejitve ali pomanjkljivosti, in sicer:

- omejena občutljivost za zelo nizke koncentracije elementov,
- omejena sposobnost za določanje zelo lahkih elementov, saj se nekateri elementi, kot je npr. vodik, težko analizirajo.

Jeklo, iz katerega je narejena gred, je oznake 42CrMo4 in spada med malolegirana jekla. Legirni elementi v jeklu imajo različne lastnosti, zato dodajanje le-teh vpliva na izboljšanje različnih lastnosti. V jeklu 42CrMo4 so glavni legirni elementi:

Krom, ki v razponu med 0,3 % in 4 % izboljša obrabno odpornost, oksidacijsko odpornost, odpornost proti luščenju, natezno trdnost in kaljivost. Prav tako pri toplotnih obdelavah poveča trdnost pri visokih temperaturah, vendar na račun izgube

duktilnosti. Krom se običajno združuje z ogljikom, s katerim tvori obrabno odporno mikrostrukturo. Nad 12 % kroma postane jeklo nerjavno, do 30 % kroma se uporablja v martenzitnih in feritnih nerjavnih jeklih z dodanim nikljem.

Nikelj se običajno dodaja med 0,3 % in 5 %. Dodajanje le-tega izboljša trdnost materiala, žilavost in kaljivost, ne da bi vplival na duktilnost materiala. Visok delež niklja izboljša odpornost proti koroziji. Za dele, ki so izpostavljeni utrujenosti, se uporablja 5 % niklja, nad 27 % niklja pa jeklo postane nemagnetno. Nikelj spodbuja tvorbo avstenitne strukture.

Molibden je med 0,3 % in 5 %. Je karbidotvoren element, ki povzroča udrobnjevanje zrn in povečuje trdnost pri visokih temperaturah, odpornost proti lezenju in kaljivost. Prav tako molibden zmanjšuje krhkost v nikelj kromovih jeklih.

Vanadij je element, ki se ga uporablja za tvorbo karbidov. V kombinaciji z nikljem in/ali kromom deluje kot dezoksidant, ki se uporablja za povečanje trdnosti jekel. Izboljšuje kaljivost in povzroča udrobnjevanje zrn. Združuje se z ogljikom, da tvori obrabno odporne mikrosestavine. Kot dezoksidant je zelo uporaben pri ulivanju jekel, izboljšuje še trdnost materiala in trdoto ter odpravlja nastanek lukenj in por pri ulivanju. Vanadij se uporablja pri hitroreznih in perlitnih kromovih jeklih.

Vsa malolegirana jekla zagotavljajo dobro žilavost, dobro torzijsko in natezno trdnost, odpornost proti koroziji, obdelovalnost, trdoto in varivost. Imajo tudi fotoaktivne in polprevodniške lastnosti, zaradi katerih so primerni še za uporabo v elektroniki. Uporabljajo se v različnih aplikacijah, kot so cevovodi, proizvodnja avtomobilskih komponent, elektromotorji, osi in gredi močnostnih transformatorjev, generatorji, nosilci letalskih motorjev, podvozja itd.

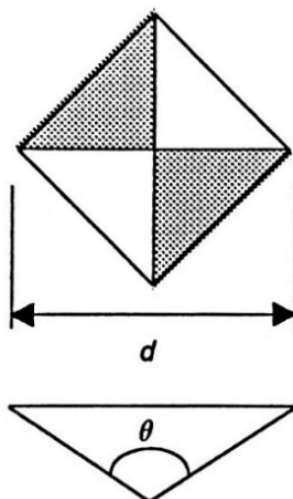
5.2 Merjenje mikrotrdote po Vickersovem postopku

Za merjenje mikrotrdote smo uporabili merilnik mikrotrdote proizvajalca Wilson, model VH1202 s programsko opremo DiaMet_x64, predstavljen na Sliki 9. Metoda merjenja mikrotrdote je bila po Vickersu, uporabljena utež pa je bila mase 100 g ($HV_{0,1}$).



Slika 9: Merilnik mikrotrdote Wilson VH1202
(Lastni vir)

Pri preizkušanju mikrotrdote po Vickersu v površino preizkušane materiala vtiskujemo diamantno konico v obliki piramide s kotom med stranicami 136° , ponazorjeno na Sliki 10. Po tej metodi lahko merimo mikrotrdoto vseh materialov od najmehkejših do najtrših (ISO 6507-1:2018 Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method, 2018). Mikrotrdota je trdota izmerjena z obremenitvijo, manjšo od 1,96 N (Kovač, 1999).



Slika 10: Prikaz odtiska pri merjenju mikrotrdote po Vickersu z diamantno piramido s kotom med stranicama $\theta = 136^\circ$ in diagonalo d
(Vir: Kovač, 1999)

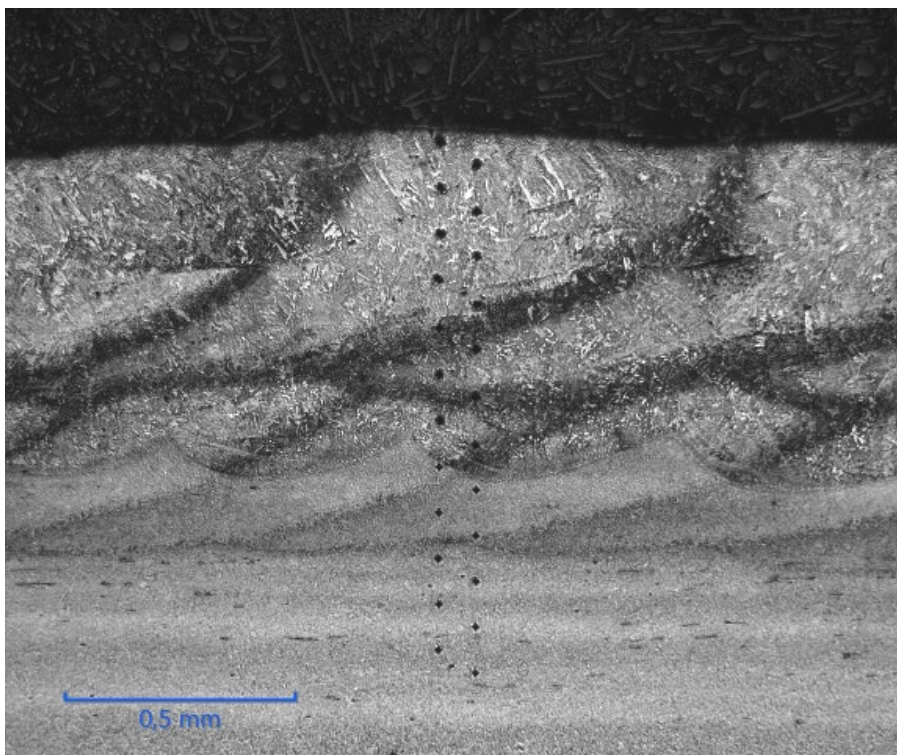
Vrednost mikrotrdote dobimo iz razmerja med pritisno silo in površino odtiska, kot je vidno v enačbi 5.1:

$$HV = \frac{F}{A} \approx 0,1891 \frac{F}{d_p^2} \quad (5.1)$$

$$d_p^2 = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (5.2)$$

kjer je F [N] pritisna sila, A [mm²] ploščina vtisnjenega plašča piramide in d_p [mm] povprečje diagonal piramide d_1 in d_2 po enačbi 5.2.

Mikrotrdoto smo v našem primeru merili na več mestih, na način, kot je prikazano na Sliki 11.



Slika 11: Ponazoritev meritev mikrotrdot na vzorcu
(Lastni vir)

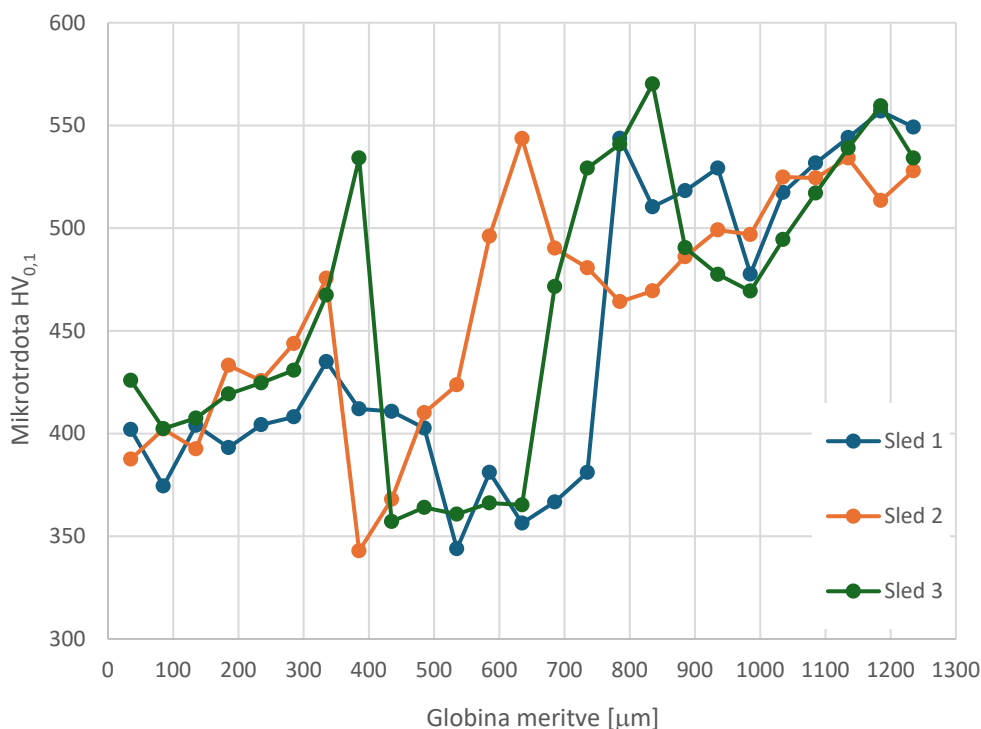
Začetna globina meritve je bila oddaljena 35 μm od vrha, nato pa so si meritve sledile na vsakih 50 μm . Najprej smo izmerili eno sled v globino, se vrnili na vrh, zamaknili vzorec za 80 μm v levo, da smo potem lahko izmerili še drugo sled v globino vzorca. Dobljene rezultate smo nato razvrstili v pravilnem vrstnem redu. Primer pravilno razporejenih meritev je prikazan v Tabeli 3.

Globina [μm]	Sled 1
35	402
85	374
135	404
185	393
235	404
285	408
335	435
385	412
435	411
485	403
535	344
585	381
635	356
685	367
735	381
785	544
835	510
885	518
935	529
985	478
1035	517
1085	532
1135	544
1185	557
1235	549

Tabela 3: Meritve mikrotrdot po globini
(Lastni vir)

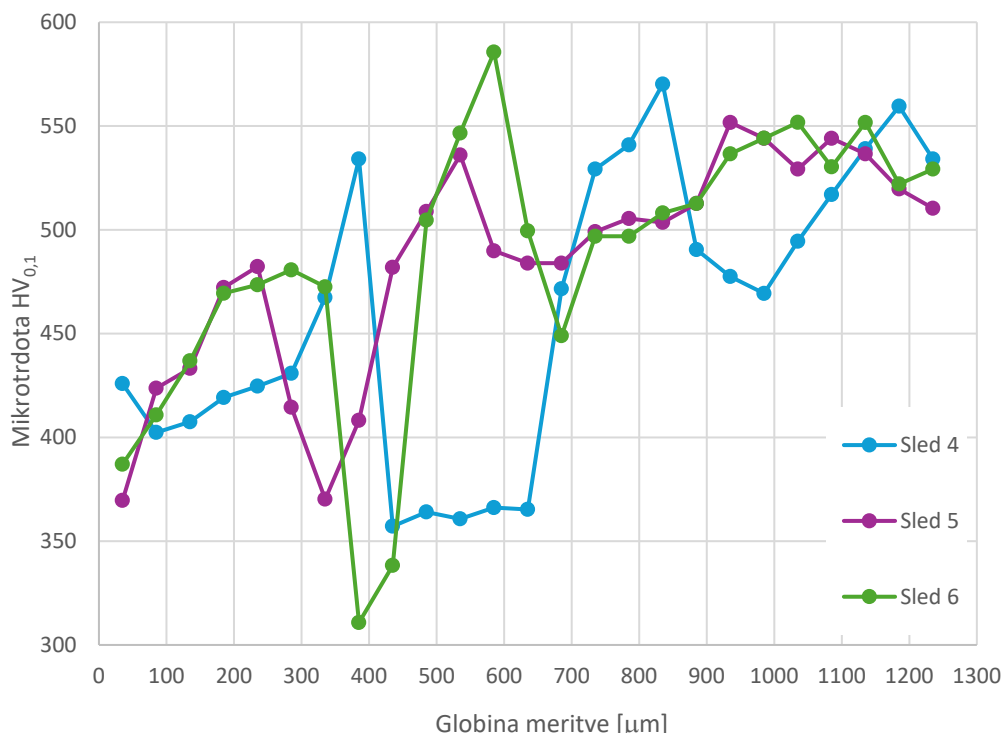
Iz meritev smo nato narisali grafe, iz katerih se vidi kakšna je mikrotrdota gredi po globini. Na Grafu 12 je mikrotrdota merjena na delu gredi, ki je bil predhodno navarjen, brez naknadne mehanske obdelave gredi. Razberemo lahko, da so si meritve sledi, kot tudi trend mikrotrdote v globino zelo podobne. Vidimo, da se v površinskem sloju do globine 300 μm vrednosti mikrotrdote gibljejo med 375 $\text{HV}_{0,1}$ in 440 $\text{HV}_{0,1}$. Mikrotrdota nato v globini med 400 μm in 800 μm pade med vrednosti od 340 $\text{HV}_{0,1}$ do 380 $\text{HV}_{0,1}$. Po tej globini, torej med 900 μm in 1200 μm se vrednosti zopet dvignejo od 470 $\text{HV}_{0,1}$ pa celo do 560 $\text{HV}_{0,1}$.

V našem primeru lahko meritve mikrotrdote razdelimo na tri sklope. Začnemo s tretjim sklopom (III. sklop), ki je najgloblje v notranjosti materiala. V tem delu vidimo, da gre za mikrotrdoto osnovnega materiala, saj smo z globino merjenja že presegli mešanje materiala med navarjanjem. Posamezne vrednosti lahko nekoliko odstopajo zaradi samega principa merjenja. Vemo, da pri merjenju mikrotrdote lahko zadenemo v karbide, ki so trši ali pa samo v osnovni, mehkejši material. Pri gibanju meritev proti površini naletimo na drugi sklop (II. sklop), kjer so vrednosti mikrotrdote najnižje. Padeč teh vrednosti na vzorcih po navarjanju so posledica različnih dejavnikov, kot so npr. dezoksidacijske reakcije (odstranjevanje trdih oksidov), počasnejše ohlajanje vara na osnovnem materialu, rast kristalnih zrn ali fazne transformacije pri strjevanju. Te vrednosti mikrotrdote so za naš material še vedno dokaj visoke in ne vplivajo na poslabšanje življenjske dobe strojnega dela. V sklopu tik pod površino, torej prvem sklopu (I. sklop), so vrednosti mikrotrdot med drugim in tretjim sklopom. Tu delujeta oba mehanizma, ki sta povezana z ohlajanjem taline po navarjanju. Po pretaljevanju in navarjanju potekajo pri strjevanju zelo podobni procesi, kot so pri izločevalnem žarjenju, saj se pretaljeno (I. sklop) in toplotno vplivano področje (II. sklop) zmečkata. Do tega prihaja zaradi segrevanja v avstenitnem področju, kjer se legirni elementi, ki tvorijo nano-izločke, zopet raztopijo v avstenitu.



Slika 12: Potek meritev mikrotrdot na navarjeni in neobdelani gredi
(Lastni vir)

Graf na Sliki 13 prikazuje potek mikrotrdot na gredi, ki je bila predhodno navarjena in nato naknadno še brušena. Opazimo zelo podoben potek krivulj, kot na prejšnjem grafu. Zopet se lahko osredotočimo na tri sklope meritev. V prvem sklopu (I. sklop), ki ponazarja navarjen del gredi so meritve mikrotrdot v območju med 400 HV_{0,1} in 450 HV_{0,1}. Drugi sklop (II. sklop), ki nam ponazarja toplotno vplivano področje, je med najnižjimi vrednostmi, okoli 350 HV_{0,1} do 400 HV_{0,1}. Zadnji, tretji sklop (III. sklop) pa predstavlja območje osnovnega materiala, zato se vrednosti mikrotrdot zopet zvišajo na okoli 550 HV_{0,1}.

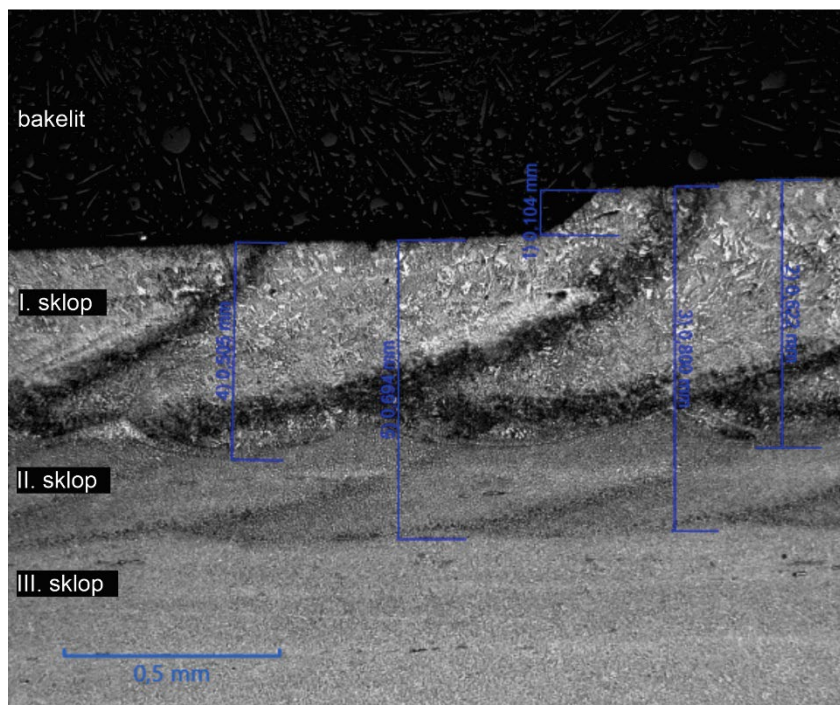


Slika 13: Potek meritev mikrotrdot na navarjeni in obdelani (brušeni) gredi
(Lastni vir)

Iz grafov poteka merjenja mikrotrdot lahko ugotovimo, da z brušenjem gredi nismo odstranili kritičnega sloja na površini, ker je trdota še vedno dovolj visoka, da se gred ni prekomerno obrabljala. Trdota na brušeni gredi nam še vedno zagotavlja in omogoča namestitve ostalih strojnih elementov, kot so npr. ležaji.

Slika 14 prikazuje globino posameznega sklopa na navarjeni gredi. Vidimo, da z brušenjem odvezamo desetinko milimetra, z namenom, da gred poravnamo neravnin, ki nastanejo med navarjanjem. Globina mešanja materiala (I. sklop) je tista globina, na kateri se vidijo tudi lunce in prekrivanje, ki nastanejo med navarjanjem. Sledi toplotno vplivano področje (II. sklop), kjer je finostrnata mikrostruktura rahlo

temnejše barve. Nazadnje je finožrnata mikrostruktura (III. sklop), ki predstavlja mikrostrukturo osnovnega materiala gredi.



Slika 14: Izmere globin posameznega sklopa na navarjeni gredi.
(Lastni vir)

5.3 Merjenje zaostalih napetosti z XRD metodo

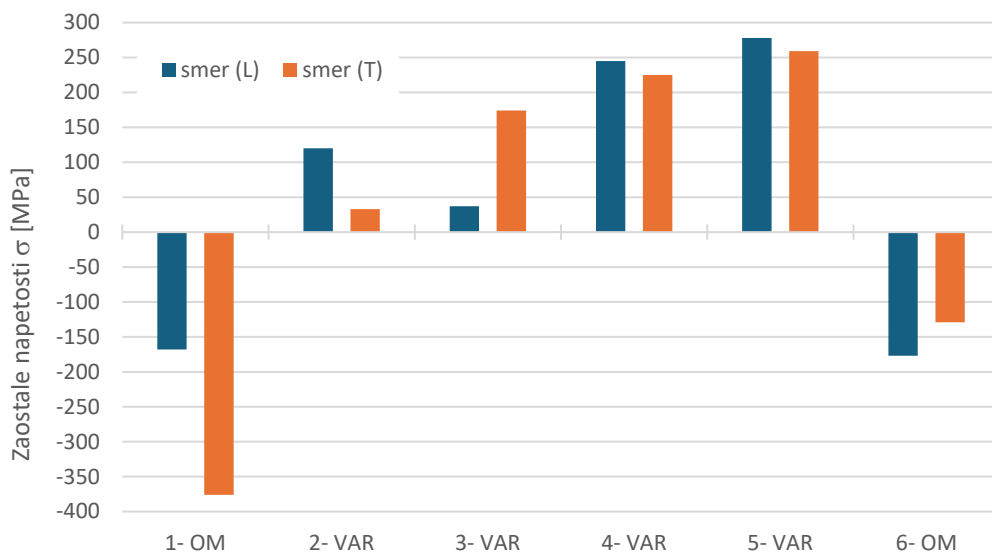
Za merjenje zaostalih napetosti smo uporabili metodo rentgenske difrakcije ali krajše XRD (X-Ray Diffraction), ki je zelo natančna metoda za določanje notranjih napetosti v materialih brez porušitvenega posega. Zaostale napetosti so notranje napetosti, ki so prisotne v materialu tudi po odstranitvi zunanje obremenitve. Te napetosti lahko vplivajo na mehanske lastnosti, trajnost, stabilnost in življenjsko dobo materialov.

Površinske prečne in vzdolžne zaostale napetosti so bile merjene s sistemom Proto iXRD z uporabo rentgenskih žarkov Cr-K α z valovno dolžino 2,291 Å, ki ciljajo na vrh difrakcije materiala {222} pod kotom $2\phi=156,31^\circ$ (Lodini & Fitzpatrick, 2003); (Sano & et.al., 2017), ki je prikazan na Sliki 15. Merilna tehnika je vključevala uporabo metode bočnega nagiba z uporabo devetih beta kotov z nihanjem 5° za vsako merilno točko. Analiza preostalih napetosti je bila izvedena z uporabo metode $\sin^2\psi$ in prilaganja Gaussovega profila. Uporabljena konstanta elastičnosti rentgenskih žarkov ($S_2/2$) je bila $18,56 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, premer fokusiranega žarka rentgenskih žarkov je bil nastavljen na 2,0 mm, čas pa na 3s.



Slika 15: Naprava za merjenje zaostalih napetosti po XRD metodi (Lastni vir)

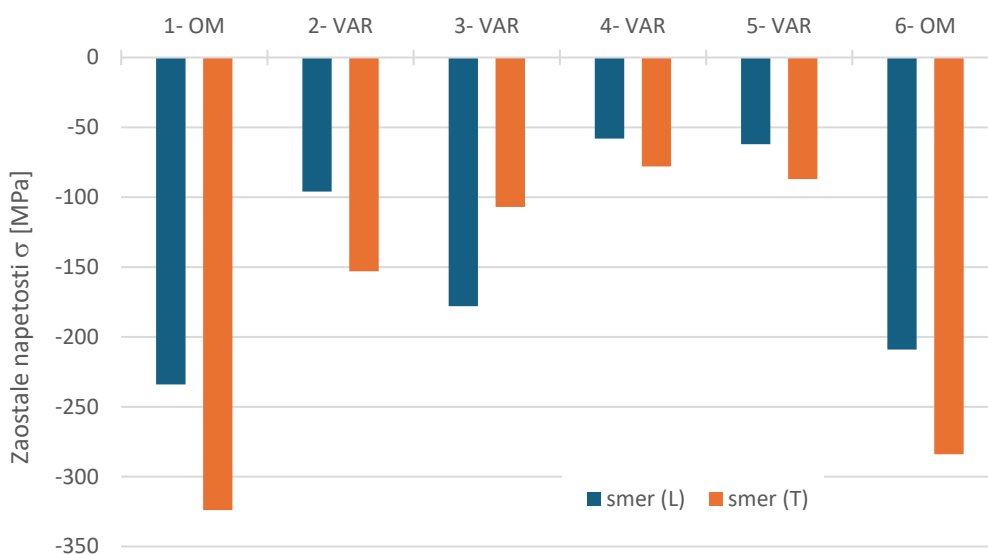
Na Sliki 16 so prikazani rezultati meritev z XRD napravo, kjer so na x-osi zabeležene meritvene točke, na y-osi pa vrednost zaostale napetosti na površini materiala.



Slika 16: Zaostale napetosti v odvisnosti od mesta merjenja na navarjeni gredi (Lastni vir)

Rezultat v posamezni točki je povprečje petih meritev zaostalih napetosti. Iz grafa lahko razberemo, da je v osnovnem materialu na obeh straneh prisotna tlačna zaostala napetost, medtem ko je v navarjenem delu površine prisotna natezna tlačna zaostala napetost. Razvidno je tudi, da se s segrevanjem gredi natezne zaostale napetosti povečujejo, kar pa je povezano s samim procesom varjenja in ohlajanja materiala. Varjenje je bilo izvedeno tako, da se je najprej navaril var v točki 2 (2- VAR) in nato se je nadaljevalo do točke 5 (5- VAR), ki je bil nazadnje navarjen. Zaradi procesa ohlajanja in mehanizma rasti tvorjenja kristalnih zrn prihaja v tem delu do nateznih zaostalih napetosti. Natezne zaostale napetosti na takih mestih načeloma niso zaželeni, ker lahko že majhna razpoka pomeni porušitev strojnega dela. Iz tega razloga je po navarjanju potrebna še naknadna mehanska obdelava, v našem primeru brušenje gredi.

Na Sliki 17 imamo predstavljene zaostale napetosti, ki se pojavijo po brušenju že navarjene gredi. Vidimo, da po brušenju dobimo po celotno navarjeni gredi tlačne zaostale napetosti. Tako v primeru nastanka razpoke ta ne potuje naprej po površini, ker jo tlačne zaostale napetosti ustavijo in preprečijo njeno nadaljnjo širitev. Tako smo z vidika varnosti porušitve strojnega dela z navarjanjem in kasnejšo mehansko obdelavo površine strojnemu delu podaljšali življenjsko dobo.



Slika 17: Zaostale napetosti v odvisnosti od mesta merjenja na navarjeni in brušeni gredi
(Lastni vir)

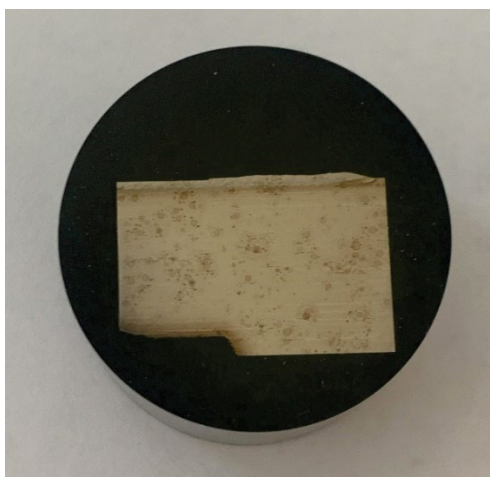
5.4 Mikrostruktura navarjene gredi

Mikrostrukturo jekla 42CrMo4 smo opazovali s pomočjo optičnega mikroskopa. Mikroskop, ki smo ga uporabili za opazovanje in vrednotenje mikrostrukture vzorcev je bil optični mikroskop Axioscope 5 proizvajalca ZEISS, prikazan na Sliki 18, s programsko opremo ZEN core v3.1. S tem mikroskopom smo opazovali spremembe mikrostrukture na navarjenih vzorci pri različnih povečavah.



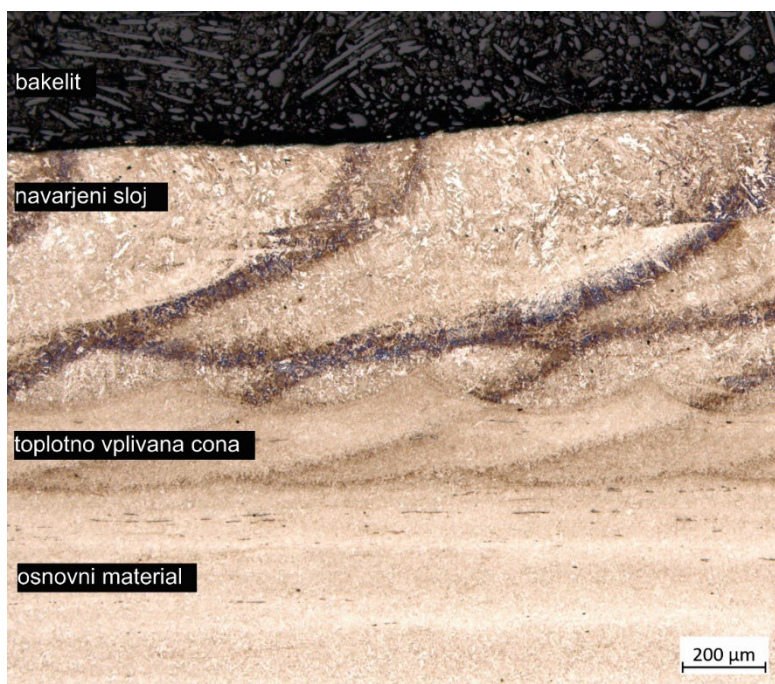
*Slika 18: Optični mikroskop Axioscope 5 proizvajalca ZEISS
(Lastni vir)*

Vzorci smo predhodno jedkali z jedkalom imenovanim Nital, ki je sestavljen iz 3 % dušikove kisline (HNO_3) in 97 % etanola. Kisline in etanol smo dobro premešali, da smo dobili naše jedkalo. Vzorec, ki smo ga predhodno vložili v umetno maso (bakelit) z namenom lažjega rokovanja, je prikazan na Sliki 19.



*Slika 19: Razrezana in vstavljena gred, vložena v bakelitno maso
(Lastni vir)*

Na teh vzorcih smo nadalje analizirali mikrostrukturo lasersko navarjenega jekla 42CrMo4. Slika 20 prikazuje mikrostrukturo po navarjanju na vzorcu pred brušenjem.

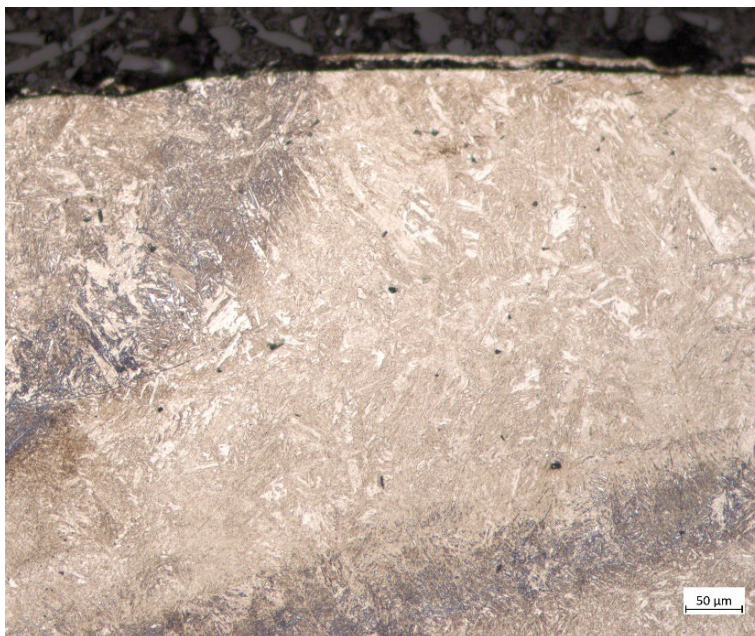


*Slika 20: Mikrostruktura vzorca pri 50 x povečavi
(Lastni vir)*

Temnejše lise v navarjenem sloju so sledi laserskega navarjanja. Vidimo, da se popolnoma prekrivajo in da je bilo mešanje materiala med 50 % in 60 %. Glavna mikrostrukturna sprememba pri navarjenem sloju je fazna transformacija avstenita v

martenzit pri ohlajanju. Pri strjevanju navarjenih slojev pride do rasti celičnih in dendritnih kristalnih zrn. Celična kristalna zrna nastajajo pri manjših temperaturnih gradientih v talini oziroma pri počasnejšem ohlajanju, medtem ko dendritna kristalna zrna rastejo pri višjih temperaturnih gradientih pri hitrejšem ohlajanju taline. Dendritna kristalna zrna rastejo v smeri največjega odvoda toplote. Pri osnovnem materialu je to smer, ki je pravokotna na talilno mejo. Na površini ta smer ustreza pravokotnici na površje temena zvara.

Na Sliki 21 je pri 200 x povečavi prikazana mikrostruktura navarjenega dela, jedkanega v Nitalu. Iz slike je razvidno, da na površini nastajajo celična kristalna zrna, v notranjosti pa dendritna kristalna zrna. Usmerjenost dendritov v notranjosti talilne cone je pod različnimi koti. Dendritna kristalna zrna so v obliki stebel in nimajo razvitih sekundarnih vej.



*Slika 21: Mikrostruktura navarjenega sloja pri 200 x povečavi
(Lastni vir)*

Na Sliki 22 je razvidna meja med talilnim področjem in osnovnim materialom, ki je bil segret do temperatur preko temperature avstenitizacije, zato sta si mikrostrukturi v tem področju zelo podobni s podobno oziroma nižjo mikrotrdoto.



Slika 22: Mikrostruktura navarjenega sloja pri 100 x povečavi
(Lastni vir)

Slika 23 prikazuje mikrostrukturo po navarjanju in brušenju na našem vzorcu. S procesom brušenja dobimo ravno in gladko površino, saj odbrusimo neravnine, ki nastanejo z laserskim navarjenjem. Odbrusimo ravno toliko materiala, da ostanemo v navarjenem delu s povišano trdoto in trdnostjo gredi. Opazimo tudi, da se z mehanskim procesom brušenja mikrostruktura v navarjenem delu ne spremeni. To pa zato, ker pri brušenju gred hladimo z emulzijo, ki preprečuje prekomerno segrevanje gredi in s tem spremembo mikrostrukture. Paziti moramo namreč na strukturne premene v materialu, ki se lahko zgodijo zaradi povišanja temperature. S tem povišanjem temperature pa pride lahko tudi do zmečanja materiala. Po brušenju pa dobimo površino, ki je primerna za nasaditev in namestitvev ostalih strojnih delov in elementov.



Slika 23: Mikrostruktura navarjenega in brušenega sloja pri 50 x povečavi
(Lastni vir)

5.5 Popis in preračun stroškov

Pri popisu stroškov popravila gredi menjalnika se bomo osredotočili na stroške, ki nastanejo pri popravilu, torej navarjanju gredi, le-te bomo nato primerjali s stroški zamenjave gredi skupaj s pripadajočimi strojnimi elementi, ki jih predpisuje proizvajalec.

V Tabeli 4 imamo stroške, ki nastanejo pri navarjanju gredi. V te stroške niso štete delovne ure naših mehanikov, ki razdrejo menjalnik, da lahko pridejo do poškodovane gredi. To pa zato, ker morajo mehaniki v obeh primerih opraviti enako delo, tudi v primeru zamenjave gredi z novo.

Tabela 5 nam predstavlja stroške, ki nastanejo v primeru zamenjave gredi z novo. Vidimo, da nam proizvajalec poleg same poškodovane pogonske gredi predpisuje tudi zamenjavo ostalih strojnih elementov, kljub temu, da so še vedno nepoškodovani. V tem primeru nam cena zamenjave gredi drastično naraste. Menjava gredi z ekonomskega stališča tako ni rentabilna, saj so vsi ostali strojni deli, kot so npr. zobniki, ležaji in sinhroni, ki bi bili menjani, praktično nepoškodovani in zelo malo obrabljeni, poleg tega pa nam v sklopu ostane tudi enak korak ujemanja zobnikov.

Iz preračuna nastalih stroškov v Tabeli 4 in Tabeli 5 jasno vidimo, da je cena popravila gredi skoraj 42 x manjša od cene menjave gredi.

Naziv	Kol.	Cena enote	Popust %	Vrednost brez DDV	DDV %	Vrednost skupaj	
Navarjanje gredi	1	70,00	0	54,60	22	85,40	
Brušenje gredi	1	50,00	0	39,00	22	61,00	
22 % od 120,00 = 26,40						Vrednost skupaj	146,40
						Skupaj v EUR:	120,00
						Skupaj DDV (22 %):	26,40
						Vrednost računa v EUR v DDV:	146,40

Tabela 4: Preračun stroškov v primeru popravila gredi
(Lastni vir)

Naziv	Kol.	Cena enote	Popust %	Vrednost brez DDV	DDV %	Vrednost skupaj	
Pogonska gred	1	1529,43	30	1070,60	22	1306,13	
Cev olja	1	5,98	30	4,19	22	5,11	
Varovalka	1	3,43	30	2,40	22	2,93	
Ležaj	1	165,89	38	102,85	22	125,48	
Obroček sinhrona	1	442,35	16	743,15	22	906,64	
Zobnik	1	959,13	30	671,39	22	819,10	
Prestava 6	1	553,02	25	414,77	22	506,02	
Predležni zobnik	1	815,68	30	570,98	22	695,60	
Predležni dvojni zobnik	1	2022,12	30	1415,48	22	126,89	
Podložka	1	17,95	25	13,46	22	16,42	
22 % od 5009,27 = 1102,04						Vrednost skupaj	6111,31
						Skupna vrednost popustov:	1948,06
						Skupna vrednost - deli:	5009,27
						Skupaj v EUR:	5009,27
						Skupaj DDV (22 %):	1102,04
						Vrednost računa v EUR v DDV:	6111,31

Tabela 5: Preračun stroškov v primeru menjave gredi
(Lastni vir)

Stroški menjave gredi menjalnika narastejo, ker je potrebno kupiti originalni material, ki ga predpisuje proizvajalec. Zamenjati moramo vse dele, ki so obarvani z rumeno na kosovnici materiala (Slika 8). To pa zato, ker moramo v primeru menjave nove gredi dobaviti tudi ostale zobnike in sinhrono 1., 2. in 3. prestave. Razlog za celotno menjavo tiči v koraku ujemanja zobnikov, saj ne more biti spojna gred nova, ostali vgrajeni zobniki pa že malo obrabljeni, ker nam to posledično daje slab korak ujemanja. In prav zaradi tega je menjava gredi z novo vprašljiva in draga.

5.6 Povzetek raziskave

Osnovno vzdrževanje, po standardu SIST EN 13306, delimo na preventivno in kurativno vzdrževanje, med katere se upošteva tudi popravila strojev, v našem primeru gredi menjalnika (Drnovšek, 2006).

Naključno vzdrževanje spada med kurativno vzdrževanje in ga je mogoče opraviti samo po odpovedi delovnega stroja. Preventivno vzdrževanje pa je vzdrževanje, ki se lahko izvaja med samim obratovanjem stroja oziroma po njegovi ustavitvi po nekem časovnem razporedu in obsegu dela (Drnovšek, 2006).

V sklopu naloge smo pregledali postopek popravila gredi menjalnika z navarjenjem. Na podlagi tega smo določili dve hipotezi. Odgovore na vprašanja prve hipoteze smo dobili s pomočjo analize materiala. Iz naloge lahko povzamemo, da se mikrostruktura materiala le delno spremeni, vendar ne v takšni meri, da bi material poslabšala. V materialu so sicer po navarjanju nastale drobne iglice martenzita in majhni zametki trdih karbidov v mehki osnovi, ki vodijo do zmeščanja na navarjenem delu, saj povišana temperatura deluje kot naknadna toplotna obdelava. Pri popravilu gredi lahko ključno vlogo predpišemo mikrotrdoti in zaostalim napetostim v materialu. Ugotovili smo, da je mikrotrdota nekoliko nižja od mikrotrdote osnovnega materiala, vendar je zaradi tega material bolj žilav in lahko prenese tudi večje obremenitve. Za nas so ključne tlačne zaostale napetosti, ki so bistveno višje, kot so bile v osnovnem materialu pred navarjanjem, ker razpoki ne dovoljujejo, da se širi naprej po materialu. Tako smo avtomatsko dobili odgovor na prvo vprašanje, saj je gred po navarjanju in brušenju dovolj kakovostna, da jo lahko vgradimo v menjalniški sklop. S tega stališča lahko prvo hipotezo potrdimo.

Druga hipoteza je bolj ekonomske narave, saj se nanaša na stroške, ki nastanejo v primeru popravila gredi in stroške v primeru menjave gredi. Ugotovimo, da so stroški, nastali s popravilom gredi okoli 2.5 % stroškov, ki nastanejo, če gred menjalnika zamenjamo. S tega vidika se nam popravilo gredi obrestuje. Na podlagi izračunanega lahko potrdimo tudi drugo hipotezo.

Z vidika tehničnega vprašanja odpovedi gredi lahko predlagamo kakovostnejši material gredi, ki bi prenesel večje obremenitve in bi bil bolj žilav. Predlagamo tudi podrobno analizo toplotne obdelave gredi pred prvo vgradnjo, saj lahko že s tem na obstoječem (zdajšnjem) materialu izboljšamo žilavost s tem, da nekoliko zmanjšamo trdoto in trdnost gredi.

6 ZAKLJUČKI

V nalogi smo obravnavali popravilo gredi menjalnika avtobusa znamke Mercedes-Benz s postopkom laserskega navarjanja. Pri sami nalogi so se pojavila tudi vprašanja o smotrnosti in rentabilnosti popravila, saj imamo poleg popravila tudi možnost menjave gredi in pripadajočih sklopov z novimi, ki jih seveda predpisuje proizvajalec. Na podlagi naših raziskav lahko povzamemo sledeče ugotovitve in trditve:

- Z meritvami mikrotrdote in naknadno mehansko obdelavo gredi smo dokazali, da se mikrotrdota po globini ne spremeni in da še vedno po navarjanju dosega vrednosti med 400 HV_{0,1} in 500 HV_{0,1}, kar je podobno osnovnemu materialu.
- Z naknadno mehansko obdelavo smo dosegli povišanje tlačnih zaostalih napetosti, ki se v povprečju gibljejo na površini okoli -200 MPa. Najvišje tlačne zaostale napetosti pa segajo celo do -350 MPa.
- Pri procesu navarjanja nastajajo v mikrostrukturi določene spremembe, zaradi same narave procesa. Tu mislimo predvsem na povišanje temperature v materialu, ki vodijo do različnih premen med procesom ohlajanja. Prav zaradi tega dobimo v mikrostrukturi drobne iglice martentiza ter skupke karbidov po kolonijah. Na podlagi izmerjenega vidimo, da kljub delno spremenjeni mikrostrukturi osnovne mehanske lastnosti gredi še vedno ustrezajo zahtevam po ustrezni mikrotrdoti ter zadostnim tlačnim zaostalim napetostim. Z našim predlaganim procesom popravila gredi smo te zahteve celo preseгли, seveda v pozitivnem smislu.
- Nova tovarniško vgrajena gred v naše preiskovane avtobuse zdrži okoli 500.000 km. Po tem ciklu se na gredi pojavijo prve napake v materialu, kot so drobne razpoke, ki se širijo z utrujenostjo in napredujejo do porušitve materiala. Prevoženo število kilometrov tako lahko okarakteriziramo kot en cikel. Po navarjanju gredi smo ugotovili, da navarjena gred prav tako zdržijo en cikel preden se poruši. Iz zgoraj napisanega lahko povzamemo, da je navarjanje ključnega pomena in je ekonomično upravičeno, saj so stroški povezani s tem postopkom bistveno manjši, kot so stroški, ki nastanejo pri zamenjavi gredi z novo.
- Na tem delu bi za nadaljnje preiskave predlagali naknadno toplotno obdelavo gredi, kjer bi izenačili mikrostrukturo. Preden bi gred vgradili pa so potrebne še dodatne raziskave, ki zavzemajo ponovne meritve mikrotrdote in zaostalih napetosti po globini in ne samo na površini, pregled mikrostrukture s pomočjo vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM), kjer bi ocenili material gredi tudi po prerezu (morebitne razpoke v notranjosti, vključke in/ali izločene faze po

toplotni obdelavi) ter mogoče dodatne korozijske teste, da bi videli, kako se naš material 42CrMo4 obnaša v stiku z drugimi materiali zobnikov, sinhronov in ležajev. Po vseh predlaganih raziskavah bi bilo potrebno tudi izrezati vzorce za teste utrujanja materiala. S testi utrujanja materiala bi lahko simulirali cikle, torej prevožene kilometre pri različnih obremenitvah gredi in iz tega natančneje napovedali, kdaj se bo določena gred menjalnika porušila. Na podlagi teh testov bi prihranili stroške, ki so povezani z odpovedjo gredi med samim obratovanjem, ali drugače povedano, če se nam pokvari gred menjalnika avtobusa med relacijsko vožnjo na cesti, ne bi bilo potrebno zapravljati časa in denarja za vleko avtobusa v delavnico. Pri takih testih bi lahko dokaj natančno ocenili življenjsko dobo gredi menjalnika in bi jo lahko tudi pravi čas bodisi popravili s postopkom navarjanja bodisi zamenjali z novo.

- Na podlagi vsega predlaganega bi bilo nujno potrebno še enkrat oceniti stroške popravila gredi ter jih zopet primerjati s stroški menjave gredi.

7 LITERATURA IN VIRI

- Capello, E., & Previtali, B. (2006). The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 223-232.
- Capello, E., Colombo, D., & Previtali, B. (2005). Repairing of sintered tools using laser cladding by wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 990-1000.
- Drnovšek, I. (2006). Vzdrževanje v poindustrijski dobi, v luči standarda SIST EN 13306.
- Dürr, U., Holtz, R., & Kohlschütter, C. (2003). Latest status with regard to the use of pulsed Nd:YAG lasers. *Technical journal for welding and allied processes*, 36-42.
- Fuerschbach, P., & Eisler, G. (2001). Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. *Science and Technology of Welding & Joining*, 241-246.
- Ion, J. (2005). *Laser Processing of Engineering Materials*. Elsevier.
- ISO 6507-1:2018 Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method. (2018).
- Ivančič, R. (2010). *Modeliranje fizikalnih lastnosti reparaturnih zvarov na orodjih*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.
- Kejžar, R. (1984). *Izdelava in vzdrževanje orodij z navarjanjem*. Ljubljana: Slovensko društvo za varilno tehniko.
- Kim, H. L. (1999). Effect of Nd-YAG laser pulse shape on welding characteristics of STS 310S stainless steel. *Science and Technology of Welding & Joining*, 51-57.
- Kim, J.-D., & Peng, Y. (2000). Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding. *Journal of Materials Processing Technology*, 284-293.
- Kim, J.-D., & Peng, Y. (2000). Plunging method for Nd : YAG laser cladding with wire feeding. *Optics and Lasers in Engineering*, 299-309.
- Kovač, M. (1999). *Gradiva*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

- Lima, M. (2005). Laser Beam Welding of Titanium Nitride Coated Titanium Using Pulse-Shaping. *Materials Research*, 323-238.
- Lodini, A., & Fitzpatrick, M. (2003). *Analysis of residual stress by diffraction using neutron and synchrotron radiation*. London: Taylor and Francis.
- Malek Ghaini, F., & et.al. (2007). Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding. *Scripta Materialia*, 955-958.
- Pinkerton, A. (2003). The effect of laser pulse width on multiple-layer 316L steel clad microstructure and surface finish. *Applied Surface Science*, 208-209.
- Pleterski, M. (2006). *Lasersko reparaturno zvarjanje in navarjanje*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.
- Rihar, G. (1986). *Navarjanje orodij za delo v toplem*. Ljubljana: Slovensko društvo za varilno tehniko.
- Sano, T., & et.al. (2017). Femtosecond laser peening of 2024 aluminium alloy without a sacrificial overlay under atmospheric conditions. *Journal of Laser Applications*.
- Sun, Y. (2004). Fatigue behavior and fractography of laser-processed hot work tool steel. *Vacuum*, 655-660.
- Sun, Y., Sunada, H., & Tsujii, N. (2001). Crack Repair of Hot Work Tool Steel by Laser Melt Processing. *ISIJ International*, 1006-1009.
- Tušek, J. (2006). Reparaturno zavarivanje čeličnog alata (kokila) laserom. *Hrvatsko udruženje za Ljevarstvo*.
- Vedani, M. (2004). Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding. *Journal of Materials Science*, 241-249.
- Vedani, M., & et.al. (2007). Problems in laser repair-welding a surface-treated tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 4518-4525.
- Zuljan, D., & Uran, M. (2010). Optimization of the Laser wire Cladding of tool steels using factor analysis. *Lasers in Engineering*, 21-38.
- Zupanič, F., & Anžel, I. (2007). *Gradiva*. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.