

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Inja ŠKRINJAR

**OPTIMIZACIJA VEZIVNEGA SISTEMA NA BAZI
FENOL FORMALDEHIDNE SMOLE ZA
IZBOLJŠANJE TEMPERATURNE
OBSTOJNOSTI VROČE STISKANIH BRUSNIH
PLOŠČ IN DEFINIRANJE S TEM POVEZANEGA
RAZVOJNEGA SISTEMA V PODJETJU WEILER
D.O.O.**

Magistrsko delo

Slovenj Gradec, december 2023

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**OPTIMIZACIJA VEZIVNEGA SISTEMA NA BAZI
FENOL FORMALDEHIDNE SMOLE ZA
IZBOLJŠANJE TEMPERATURNE
OBSTOJNOSTI VROČE STISKANIH BRUSNIH
PLOŠČ IN DEFINIRANJE S TEM POVEZANEGA
RAZVOJNEGA SISTEMA V PODJETJU WEILER
D.O.O.**

Magistrsko delo

Študent(ka):	Inja ŠKRINJAR
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentor:	izr. prof. dr. Miroslav HUSKIĆ
Delovni mentor:	Davorin FAŠMON, univ. dipl. ing. kem. tehnol.

Slovenj Gradec, december 2023

IZJAVA

Podpisana Inja Škrinjar izjavljam, da:

- je bilo predloženo magistrsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo magistrsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- magistrsko delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika

ne sme biti javno dostopno do: 1.1.2026

Po preteku časovno omejenega javnega dostopa v skladu s 1. odstavkom 21. člena in 23. členom Zakona o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 16/2007-UPB in spremembe) dovoljujem, da se zgoraj navedeno magistrsko delo shrani v Knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve magistrskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi magistrsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Miroslavu Huskiću in delovnemu mentorju g. Davorinu Fašmonu za vso podporo in pomoč pri pisanju magistrske naloge. Prav tako gre zahvala celotni družini, ki mi je stala ob strani in mi omogočila priti do želene stopnje izobrazbe.

POVZETEK

Optimizacija vezivnega sistema na bazi fenol formaldehidne smole za izboljšanje temperaturne obstojnosti vroče stiskanih brusnih plošč in definiranje s tem povezanega razvojnega sistema v podjetju Weiler d.o.o.

Vročje stiskane brusne plošče so med procesom brušenja oziroma odstranjevanjem oksidne skorje na površini obdelovanca izpostavljene zelo visokim temperaturam. Le-te povzročijo razpad vezivnega sistema oziroma smole, kar rezultira v hitrejšem in povečanem izpadanju brusnih zrn in s tem povezano hitrejšo obrabo brusne plošče. Z optimizacijo vezivnega sistema želimo povečati obstojnost smole pod vplivom visokih temperatur in tako podaljšati življenjsko dobo brusne plošče, kar doprinese velik finančni prihranek pri končnem uporabniku – kupcu. V magistrskem delu sem se optimizacije vezivnega sistema lotila z dodatkom zaviralca gorenja, ki ima lastnost, da poveča obstojnost smole pri izredno visokih temperaturah in tako zmanjša delež izpadlih zrn. TGA analiza, izvedena v sodelovanju s podjetjem Fenolit d.o.o., nam je dala rezultat o temperaturno najbolj obstojni smoli, ki pa sem ji v naslednjem koraku dodala še zaviralec gorenja in steklena vlakna za dodatno obstojnost. Izvedba eksperimentalnega dela je potekala z izdelavo šestih različnih etalonov. Njihovo obstojnost pa sem kasneje preizkusila z razletnim in brusnim testom. Moja pričakovanja so bila, da se bo z dodatkom zaviralca gorenja obstojnost etalonov zvišala, vendar so na koncu rezultati pokazali nižjo obstojnost od pričakovane. Kot glavni razlog za to bi navedla, da izdelani etaloni niso 100 % primerljivi z industrijskimi brusnimi ploščami in tudi okoliščine v laboratoriju in testirnici se razlikujejo od okoliščin v železarnah. Kljub temu pa so rezultati pokazali dovolj pozitiven vpliv dodatka zaviralca gorenja, da imamo izhodišče za nadaljnja testiranja.

Ključne besede:

TGA, smola, brušenje, slab, vezivo, železarna.

SUMMARY

Optimization of the binder system based on phenol-formaldehyde resin for improving the temperature stability of hot-pressed grinding wheels and defining the related development system at Weiler d.o.o.

Hot-pressed grinding wheels are exposed to very high temperatures during the removal of the oxide scale on the surface of the workpiece. This can cause the breakdown of the binding system (resin), which results in faster and increased loss of grains and the associated faster wear of the grinding wheel. By optimizing the bonding system, we want to increase the durability of the resin under the influence of high temperatures and thus extend the life of the grinding wheel, which contributes to a large financial saving for the end user - the customer. In my master's thesis, I tackled optimizing the binding system by adding a flame retardant, which increases the resin's durability at extremely high temperatures and thus reduces the proportion of dropped grains. TGA analysis performed in cooperation with the company Felolit d.o.o. gave me the result of the most temperature-resistant resin. Still, in the next step, I added a flame retardant and glass fibers to it for additional durability. The experimental work was implemented with the production of six different standards. Later, I tested their durability with a tear and sanding test. My expectations were that with the addition of flame retardant the durability of the standards would increase, but in the end, the results deviated from this. As the main reason for this, I would state that the produced standards are not 100% comparable to industrial grinding wheels and the circumstances in the laboratory and test room are different from those in ironworks. Nevertheless, the results showed a sufficiently positive influence of adding flame retardant to provide us with a starting point for further testing.

Keywords:

TGA, resin, grinding, slab, binder, foundry.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNI DEL	2
2.1	Predstavitev podjetja Weiler d.o.o.	2
2.2	Evolucija proizvodnje jeklenih slabov in gredic	3
2.3	Brušenje jeklenih slabov in gredic	4
2.3.1	Hlajenje med procesom brušenja	8
2.3.2	Varnost pri uporabi vroče stiskanih brusnih plošč	9
2.4	Proizvodnja jeklenih slabov in gredic	10
2.4.1	Nastanek oksidne skorje	11
2.4.2	Inšpekcija površine	13
2.4.3	Materiali obdelovanca	16
2.4.4	Ploskovno brušenje	18
2.4.5	Brušenje v polno	19
2.5	Vroče stiskane brusne plošče	20
2.5.1	Izdelava vroče stisnjene brusne plošče	21
2.6	Zrna za vroče stiskane bruse	23
2.7	Fenol formaldehidne smole	25
2.8	Polnila v vroče stiskanih brusnih ploščah	27
2.9	Zaviralci gorenja	29
2.9.1	Vpliv uporabe zaviralca gorenja na obstojnost brusne plošče	30
2.10	Nadaljnja uporaba jeklenih slabov in gredic v industriji	30
3	EKSPERIMENTALNI DEL	32
3.1	TGA analiza	32
3.2	Izdelava etalonov brusne plasti brusne plošče	34
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	36
4.1	Rezultati in diskusija	36
4.1.1	Termična analiza	37
4.1.2	Razletna analiza	45
4.1.3	Industrijsko brušenje z robotom	48
4.2	Definiranje razvojnega sistema	49
5	SKLEP	50
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	51
	SEZNAM SLIK	52
	SEZNAM TABEL	53
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	54

1 UVOD

Brušenje slabov oziroma gredic spada med ene izmed ključnih postopkov v železarski industriji. Gre za proces odstranjevanja oksidne skorje, ki na obdelovancu nastane med procesom litja. Glavni razlog za njen razvoj je izpostavljenost obdelovanca visokim temperaturam in procesu oksidacije v tunnelski peči pred postopkom valjanja. Proces je pomemben iz enostavnega razloga, in sicer, če oksidna skorja ne bi bila odstranjena pred procesom valjanja, bi se nečistoče iz skorje zarile v osrednji čisti del obdelovanca in le-tega uničile. Cilj vsake železarne je namreč proizvesti čim bolj čisto železo brez nečistoč, saj lahko le-te kasneje povzročijo razpoke in druge nepravilnosti v končnem produktu.

Odstranjevanje oksidne skorje je energijsko potraten in težek proces, ki se izvaja pod vplivom visokih sil in temperatur – nad 500 °C, zato morajo biti tudi brusne plošče temu prilagojene. Gre za brusne plošče, izdelane s procesom vročega stiskanja, ki imajo izredno nizko poroznost in visoko gostoto. Brusna zrna, ki se uporabljajo, so groba in posebnih oblik, da v najkrajšem času odstranijo maksimalno količino materiala. Vezivni sistem pa mora biti prilagojen na visoke temperature (nad 500 °C). Za smolo je namreč značilno, da razpade pod vplivom visokih temperatur, kar posledično pomeni za brusno ploščo prehitro izpadanje brusnih zrn in prekratko življenjsko dobo plošče. V tem primeru mora uporabnik (železarna) kupiti večje število brusnih plošč za obdelavo enake količine materiala.

Pri procesu brušenja so glede na aplikacijo obdelovanca zahtevane različne lastnosti, ki jih mora brusna plošča doseči. Pri brušenju valjev za hladne valjarne je izrednega pomena kakovost površine pri brušenju, nasprotno pa je pri brušenju slabov oziroma pri odstranjevanju oksidne skorje pomembna produktivnost – potrebno je odstraniti čim več oksidne skorje v čim krajšem času. Sama površina v tem primeru ni pomembna, saj gre slab kasneje v nadaljnje postopke obdelave, kjer se dosegajo standardi glede površine končnega izdelka. Iz tega razloga je vsebina moje magistrske naloge namenjena raziskavi vpliva dodatka zaviralca gorenja, ki naj bi v teoriji znižal stopnjo razpada smole pod določeno temperaturo oziroma upočasnil proces razpada, kar pa bi podaljšalo obstojnost in s tem življenjsko dobo brusne plošče.

V podjetju Weiler d.o.o. je konstantno prisoten proces razvoja, raziskav in izboljševanja produktov, kar pa je lahko velikokrat tudi zelo zamudno, saj lahko preteče tudi nekaj mesecev, preden je kupec pripravljen testirati določeno novo varianto. Iz tega razloga, da bi pospešili razvojni sistem, smo se odločili, da poskusimo prve rezultate novih brusnih plošč pridobiti v podjetju in kasneje kot industrijski test preizkusiti varianto, ki bo v domačem laboratoriju in testirnici dala najboljše rezultate. S tem bomo prihranili veliko časa in imeli preglednost nad podatki.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Predstavitev podjetja Weiler d.o.o.

Začetek podjetja Weiler sega v začetke 19. stoletja, ko je mojster izdelave ščetk Joseph E. Weiler začel izdelovati polirne ščetke za industrijo nakita v Nemčiji. S potomstvom se je njegovo delo nadaljevalo in tako je njegov najstarejši sin Karl E. Weiler leta 1944 v Združenih državah Amerike odprl obrat, imenovan Weiler Brush Company. Od teh skromnih začetkov je podjetje rastlo in nato leta 1957 preselilo obrat v Cresco, kjer še zdaj obratuje. Podjetje se danes imenuje Weiler Abrasives Group in obsega tudi proizvodnjo brusnih izdelkov v Mariboru, Zrečah in Ločah.

Zgodovina slovenskih proizvodnih lokacij sega še nekoliko dlje v zgodovino, ko je tovarno umetnih brusov, imenovano Swaty, leta 1879 ustanovil kemik Franz Swaty. Na današnjo lokacijo v Mariboru se je proizvodnja preselila leta 1886 in takrat temeljila na izdelavi brusov v mineralnem vezivu po lastnem patentiranem postopku. Kasneje leta 1929 pa je proizvodnja prešla tudi na izdelavo keramično vezanih brusov, le-te proizvajajo še danes. Leta 1984 so začeli proizvajati diamantno in boronitridno brusilno orodje v smolni vezi, leta 1990 pa v keramični vezi.

Mariborsko podjetje Swatycomet bi danes praznovalo 144 let, odkar je zaživel pod imenom g. Swatyja. Tovarna se je širila in preživela obe svetovni vojni, se po lastniških premetavanjih znašla pod okriljem Avtotehne ter se leta 2008 združila z zreškim Cometom in se tako preimenovala v Swatycomet. Leta 2015 je podjetje postalo član globalne skupine Weiler Abrasives Group in od takrat uspešno nadaljuje s svojim delom ter razvija nove izdelke. Danes se tradicija obeh podjetij uspešno nadaljuje pod vodstvom četrte generacije. Podjetje Weiler abrasives se je iz proizvajalca ščetk razvilo v globalno podjetje z rešitvami za površinsko obdelavo materialov.

2.2 Evolucija proizvodnje jeklenih slabov in gredic

Danes je večinski delež slabov in gredic proizveden s postopkom kontinuirnega litja. Pred razvojem le tega v petdesetih letih prejšnjega stoletja, so jeklo vlivali v stacionarne kalupe za oblikovanje ingotov. Od takrat se je kontinuirno litje nadgrajevalo in izboljševalo za doseganje čim boljšega izkoristka, kakovosti, produktivnost in stroškovne učinkovitosti. S tem se je omogočila cenejša proizvodnja kovinskih profilov z boljšo kakovostjo zaradi inherentno nižjih stroškov neprekinjene, standardizirane proizvodnje izdelka, kot tudi zagotavlja povečan nadzor nad procesom z avtomatizacijo.

Sir Henry Bessemer, znan kot pretvornik Bessemerja, je leta 1857 prejel patent za ulivanje kovine med dva nasproti vrteča se valja. Osnovna zasnova tega sistema je bila pred kratkim implementirana danes pri litju jeklenih trakov.

Eden izmed glavnih proizvajalcev strojev za brušenje jeklenih gredic in slabov je podjetje Danieli oziroma Centro Maskin, ki je na tržišču že od zgodnjih 50 let, ko je bil uveden nov koncept za obdelovanje površin, ki temelji na stacionarnih brusilnih strojih. Ta inovativna zasnova je postavila nov steber v procesu brušenja in s tem povečala proizvodne zmogljivosti ter postavila nove okoljske in varnostne standarde za nadzor hrupa, hlapov in prahu.

Postopek kondicioniranja površin je bil nadalje razvit z dobavo brusilnih strojev nekaterim najpomembnejšim proizvajalcem specialnega jekla, nerjavnega jekla in superzlitin na svetu. Leta 1995 je Danieli Centro Maskin dobavil prvi linijski sistem za mletje-kondicioniranje vročih plošč na svetu, patentiran postopek CastGrind, ki zagotavlja visoke stopnje odstranjevanja materiala in neprekinjen pretok materiala od conticasterja do valjarne za vroče valjanje.

2.3 Brušenje jeklenih slabov in gredic

Brušenje nerjavnih jeklenih slabov ali gredic spada med postopke grobe površinske obdelave materiala, pri čemer odstranjujemo oksidno skorjo na površini obdelovanca. Le-ta nastane zaradi ohlajanja jekla v procesu izdelave polizdelka. Obdelovalnost te skorje je težavna in presega trdoto jekla, ki ga kasneje obdelujemo v različne končne izdelke – najpogosteje pločevino različnih debelin. Prav tako lahko z vroče stiskanimi ploščami odstranjujemo površinske napake (razpoke in nečistoče) v materialu [1].

Brušenje spada med postopke odrezovanja, pri katerem ima brusna plošča veliko število rezil (brusnih zrn), ki so nepravilne geometrijske oblike. Tako je lahko vsako abrazivno zrno drugačno in drugače usmerjeno, med seboj pa so zrna povezana z vezivom. Posamezna zrna so v brusu neenakomerno porazdeljena in so v bistvu majhni cepilni klini, s katerimi odrezujemo obdelovanec [1].

Brušenje jeklenih slabov ali gredic spada v kategorijo težke industrije, pri čemer je zelo pomembna tudi varnost. Brusna plošča se med samim procesom brušenja vrti z 80 m/s in lahko zaradi prisotnosti visokih sil – moč brusnih strojev se giblje med 50 in 630 kW – v primeru razleta predstavlja veliko nevarnost za končnega uporabnika. Iz tega razloga so vse plošče v podjetju Weiler d.o.o. pred izdobavo preizkušene na delovanje na povišani obodni hitrosti, ki znaša 120 m/s. To tudi predpisuje standard EN 12413.

Slika 1 prikazuje odstanjevanje oksidne skorje na valju, kjer je postopek brušenja oziroma odstanjevanja oksidne skorje podoben postopku brušenja slabov.

Na izbiro brusne plošče, ki bo končnemu uporabniku dala optimalne rezultate, vplivajo trije glavni parametri:

- material, iz katerega je obdelovanec narejen,
- temperatura obdelovanca,
- lastnosti in zmogljivosti brusnega stroja.



Slika 1: primer brušenja z vroče stiskano brusno ploščo

Za kakovostno ustrezen in varen proces brušenja je ključnega pomena tudi pravilna namestitvev brusnih plošč na kovinsko prirobnico. Pravilno sestavljen par brusnih plošč prikazuje slika 2. Proces sestave nove koluti poteka po sledečem postopku:

- Brusna plošča se očisti in postavi na mehanizem za obračanje.
- Brusna plošča se spusti v spodnji položaj in odvijačijo se vijaki.
- Z vedo in pomožnim zapenjalom se dvigne zgornji del pesta.
- Preverijo se navojne vzmeti in se po potrebi zamenjajo.
- Sledi sestava novega para brusnih plošč - na pesto se najprej položi papirnata prirobnica in nanjo brusna plošča ter distančnik. Pomembno je, da sta koluti pravilno postavljeni - puščici na brusni plošči morata biti poravnani, saj v nasprotnem primeru lahko pride do loma.
- Z vedo se položi še zgornji del pesta in na roke se privijačijo vijake [2].



Slika 2: Pravilno sestavljen par brusnih plošč

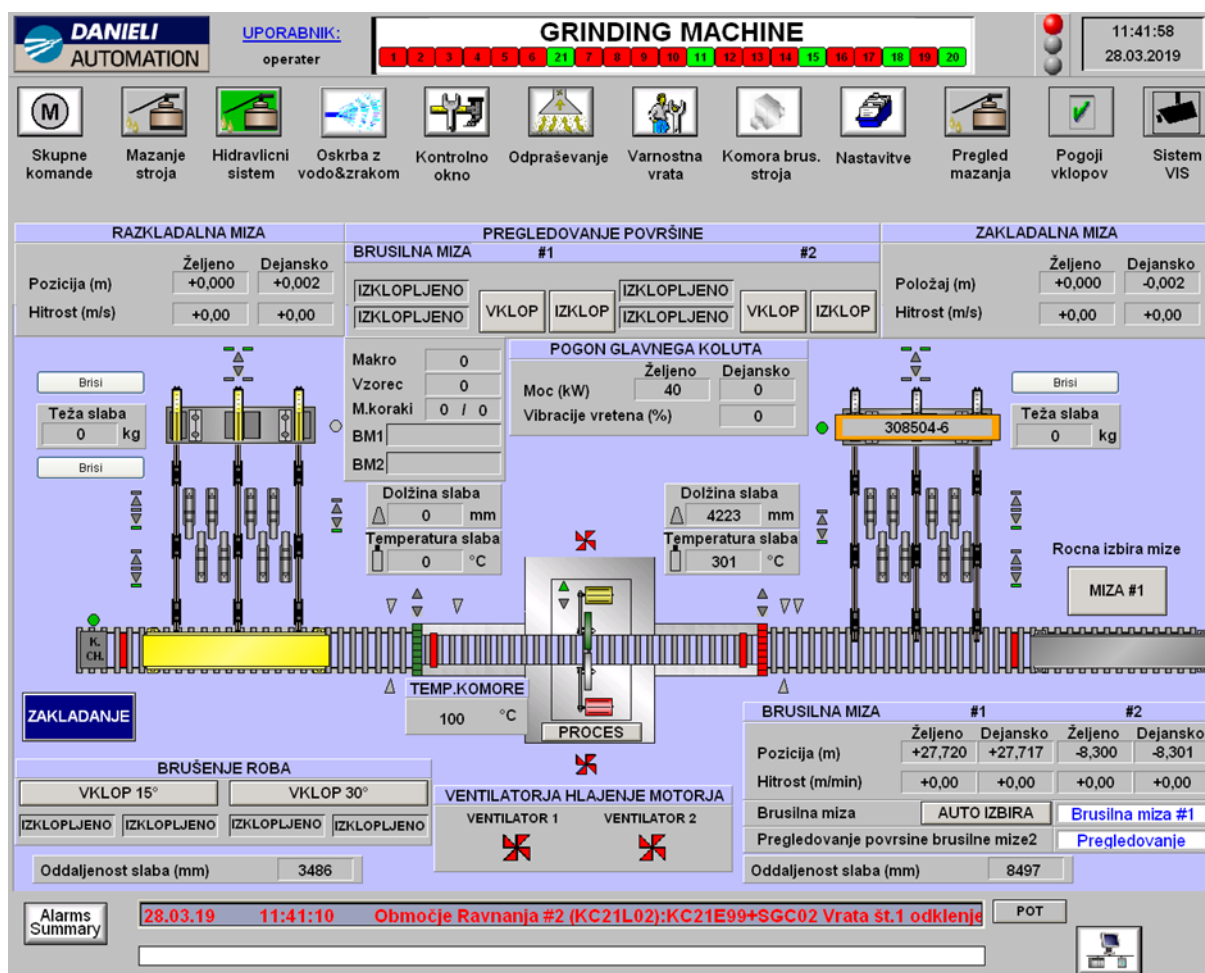
Avtomatizacija pri brušenju jeklenih slabov ali gredic vključuje uporabo tehnologije in strojev za izvajanje nalog, ki so jih tradicionalno izvajali operaterji. Uvedba avtomatizacije v proizvodne procese jekla, vključno z brušenjem, prinaša več prednosti, kot so povečana učinkovitost, natančnost in varnost. Avtomatizacija pogosto vključuje senzorje in nadzorne sisteme, ki lahko v realnem času ocenijo kakovost postopka brušenja. Primer nadzorne plošče s prikazom procesa brušenja je prikazana na sliki 3. To omogoča zagotavljanje doslednih rezultatov in zmanjševanje napak. Sistemi avtomatizacije lahko zbirajo in analizirajo podatke, povezane z postopkom brušenja. Ti podatki se lahko uporabljajo za optimizacijo delovanja, kurativno vzdrževanje in nadzor kakovosti. Avtomatizirani transporterji in robotski sistemi se lahko uporabljajo za učinkovito ravnanje z jeklenimi slabi skozi celoten postopek brušenja. To vključuje nalaganje in razlaganje pločevin na in s strojev za brušenje. Avtomatizirani sistemi lahko vključujejo tudi varnostne funkcije, kot so senzorji, ki zaznavajo prisotnost ljudi na delovnem območju, mehanizme za nujno ustavitev in druge varnostne protokole za zmanjšanje tveganja nesreč. Uvedba avtomatizacije pri brušenju jeklenih pločevin zahteva pomembne začetne naložbe, vendar lahko privede do dolgoročnih prihrankov, povečane produktivnosti in izboljšane kakovosti izdelkov. Poleg tega lahko avtomatizacija prispeva k varnejšemu delovnemu okolju in zmanjšani odvisnosti od ročnega dela pri ponavljajočih se in potencialno nevarnih nalogah [2].

Ključni vidiki avtomatizacije pri brušenju jeklenih slabov so:

Robotski sistemi: Roboti opremljeni z brusilnimi orodji se lahko programirajo za izvajanje natančnih in ponavljajočih se brusilnih nalog na jeklenih slabih. To zmanjšuje potrebo po ročnem delu in zagotavlja doslednost v postopku brušenja.

CNC (računalniško numerično krmiljeni) brusilni stroji: CNC stroji so krmiljeni s programi na računalniku, ki določajo gibanje in delovanje brusilnih orodij. Te stroje je mogoče programirati, da sledijo določenim potem brušenja, kar zagotavlja natančnost in ponovljivost v postopku brušenja.

Avtomatizirane brusilne celice: brusilne celice lahko vključujejo več strojev in robotskih rok, ki delujejo skupaj. Te celice so zasnovane za neprekinjeno in avtomatizirano obdelavo jeklenih slabov, kar zmanjšuje potrebo po ročnem delu.



Slika 3: nadzorna plošča brusilnega stroja Danieli

2.3.1 Hlajenje med procesom brušenja

Hlajenje med samim procesom brušenja je pomembno predvsem za preprečevanje pregrevanja in ohranjanja kakovosti jekla. Brušenje ustvarja toploto, in če je ta toplota neustrezno nadzorovana, lahko povzroči neželene učinke, kot so spremembe v lastnostih materiala, ukrivljanje ali celo poškodbe brusilne opreme. Pravilen nadzor brusilnih parametrov, kot so hitrost brušenja, hitrost podajanja in globina reza, lahko prispeva k učinkovitemu upravljanju toplote. Optimizacija teh parametrov pomaga uravnotežiti potrebo po odstranjevanju materiala [3].

Učinkovito hlajenje je ključno ne le za ohranjanje kakovosti jekla, temveč tudi za zagotavljanje varnosti brusilnega procesa in opreme. Gre za ključen vidik proizvodnje jekla, pri čemer izbira specifične metode hlajenja lahko temelji na dejavnikih, kot so vrsta jekla, uporabljeni postopek brušenja in uporabljena oprema [3].

Načini hlajenja med brušenjem jeklenih pločevin:

Sistemi za hlajenje: Brusilni stroji so pogosto opremljeni s sistemi za hlajenje, ki zagotavljajo neprekinjen tok hladilne tekočine med postopkom brušenja. Hladilno sredstvo pomaga razpršiti toploto in ohranяти temperaturo jekla znotraj sprejemljivih meja. Običajno je hladilna tekočina vodna raztopina, ki lahko vključuje dodatke za povečanje učinkovitosti hlajenja in zmanjšanje trenja [3].

Vodni curki: Na območje brušenja se lahko usmerijo visokotlačni vodni curki, ki zagotovijo hlajenje. Ta metoda je še posebej učinkovita pri preprečevanju pregrevanja in ohranjanju enakomerne temperature med postopkom brušenja [3].

Hladilni ležaji: Po brušenju se jeklene pločevine lahko postavijo na hladilne ležaje. Ti ležaji pogosto vsebujejo elemente, ki so hlajeni z vodo in pomagajo odvajati toploto iz pločevin. Ta korak je ključen za nadzor hitrosti hlajenja in zmanjšanje notranjih napetosti v jeklu [3].

Zračno hlajenje: V nekaterih primerih se lahko za hlajenje jeklenih slabov po brušenju uporablja okoljski zrak ali prisilno prezračevanje. Ta metoda je bolj pogosta pri določenih vrstah brušenja, kjer hlajenje z vodo ni primerno [3].

2.3.2 Varnost pri uporabi vroče stisnanih brusnih plošč

Postopek brušenja z vroče stisnjeno brusno ploščo spada med procese težke proizvodnje, kar pomeni da je tudi nevarnost med samim delom zelo velika. Za učinkovito brušenje in zadosten odvzem materiala je potrebna zadostna hitrost brušenja, kar v tem primeru pomeni 80 m/s. Tako visoka hitrost lahko v primeru razpada oziroma razleta brusne plošče rezultira v okvari brusnega stroja ali pa tudi poškodbi delavca – v primeru, da je le ta prisoten v območju dela kjer to ni dovoljeno.

Iz tega razloga so vse brusne plošče pred odpremo h končnemu kupcu testirane na stroju za povišano obodno hitrost z varnostnim faktorjem 1.5, kar pomeni 120 m/s. V primeru, da plošča ne vzdrži te hitrosti jo v sami napravi raznese. S tem načinom kakovostnega pregledovanja brusnih plošč so le te v skladu s standardom EN 12413 in so primerne za industrijsko uporabo. Za dodatno varnost so v ekonomično plast brusne plošče nameščeni armirni obroči, ki še dodatno prispevajo k temu, da je možnost razleta čim nižja.

Kljub ustreznim internim preizkusom pa še vedno obstaja možnost razleta brusne plošče pri končnem uporabniku. Eden izmed primerov je prikazan na sliki 4. Razlog za to je lahko nepravilna namestitvev brusne plošče na prirobnico – v tem primeru je po navadi toleranca med luknjo brusne plošče in prirobnico prenizka. Kovinska prirobnica se med procesom brušenja pregreva in razteza kar povzroča sile na brusni plošči. To lahko rezultira v razletu. Drug razlog je lahko nepravilna shramba vroče stisnjenih brusnih plošče – le te ne smejo biti izpostavljene vlagi. Iz tega razloga smo v podjetju razvili poseben princip pakiranja z aluminijasto folijo, ki onemogoča dostop vlage do plošče. Tudi s strani končnega uporabnika pa je pričakovano, da brusne plošče hrani v suhem prostoru.



Slika 4: primer razletene brusne plošč

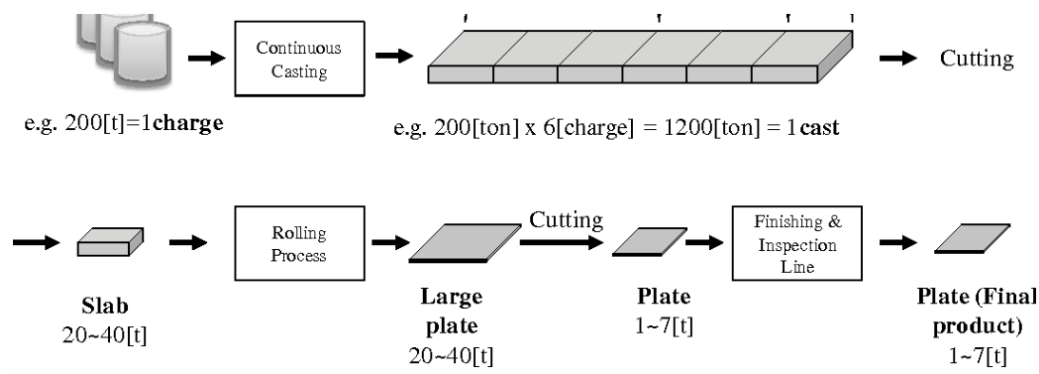
2.4 Proizvodnja jeklenih slabov in gredic

Izdelava jeklenih slabov in gredic spada med postopke težke proizvodnje, kjer potekajo procesi pod velikimi obremenitvami in visokimi temperaturami. Sam proces izdelave se prične z zbiranjem železove rude in premoga v pristanišču surovin. Od tam je material raztovorjen do najrazličnejših jeklarn po svetu. Za ustrezen pričetek procesa in pravilno transfuzijo toplote v talilni peči je potrebno železo in premog s postopkom sintranja spremeniti iz prašne v trdno obliko. Pred obdelavo sta železo in premog zložena v plasti v nekaj 10 m visoki talilni peči. V naslednjem koraku se v peč vpihne vroč zrak s približno 1200 °C, kar povzroči zgorevanje premoga in spreminjanje železove rude v staljeno železo. Le-to vsebuje najrazličnejše nečistoče, ki zmanjšajo njegovo trdnost in vzdržljivost, ko se utrdi v jeklo. Staljeno železo iz peči se transportira v torpedni vagon in vlije v konvertersko peč, kjer se doda čisti kisik za izgorevanje snovi, kot so ogljik, fosfor in žveplo. Tako nastane prečiščeno staljeno jeklo. Na tej točki se temperatura in sestava snovi natančno prilagajata različnim zahtevam kupcev. Z vlivanjem staljenega jekla v kalupe in ohlajanjem v trdno snov nastane polizdelek, ki ga imenujemo slab. Le-ta je na koncu postopka kontinuiranega litja debel med 20 in 30 cm. S postopkom valjanja pa se ga kasneje zvalja na debelino nekaj milimetrov. Zvaljana pločevina se lahko nato uporablja v najrazličnejših industrijah – za izdelavo malih gospodinjskih aparatov, v avtomobilski industriji, v agrikulturi, itd. [4].

Slabi so v večini primerov po dimenziji veliko širši kot debeli, zato jih razdelimo v več kategorij:

- Konvencionalni slabi so od 100 do 1600 mm široki in od 180 do 250 mm debeli ter dolgi do 12 mm. Le-te se lije s hitrostjo do 1,4 m/minuto. Z nadgrajevanjem tehnologije pa se hitrosti tudi že povečujejo.
- Široki slabi so na voljo do dimenzije 3250 x150 mm.
- Debelejši slabi so na voljo le v specializiranih jeklarnah, pri čemer debeline variirajo med 200 in 400 mm.
- Tanki slabi so narejeni iz nizkoogljčnega jekla, pri čemer debelina variira med 40 in 120 mm. Prav tako kot debelejši slabi so tudi ti na voljo le v specializiranih jeklarnah.

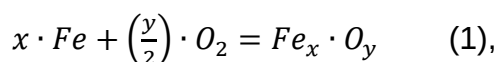
Slabi oziroma gredice so lahko proizvedene z različnimi postopki litja. Najpogostejši način je kontinuirno litje, ki ga imenujemo tudi pramensko litje ali kontiliv. Gre za postopek, pri katerem se staljena kovina strdi v slab ali gredico za kasnejše valjanje v končnih mlinih. Kontinuirano litje se je razvilo iz procesa litja v stacionarne kalupe, saj je tak postopek doprinesel k boljšemu izkoristku, višji kakovosti, produktivnosti in stroškovni učinkovitosti. Sam proces je v celoti avtomatiziran, kar omogoča povečan nadzor nad celotnim procesom in lažje zagotavljanje kakovosti. Slikoven prikaz je razviden na sliki 5.



Slika 5: Proces proizvodnje slaba [4]

2.4.1 Nastanek oksidne skorje

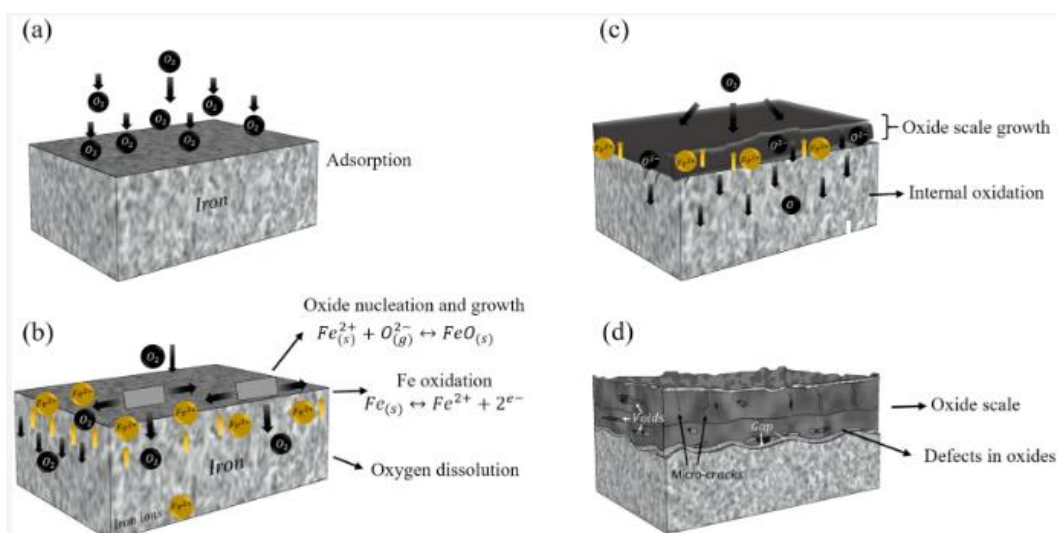
Oksidacija kovin poteče med različnimi kemijskimi reakcijami, pri čemer se tvori oksid. Na primer pri čistem železu proces oksidacije predstavlja reakcija železa (Fe) s kisikom v atmosferi (O_2). Enačba reakcije je zapisana v spodnji enačbi 1.



pri čemer je:

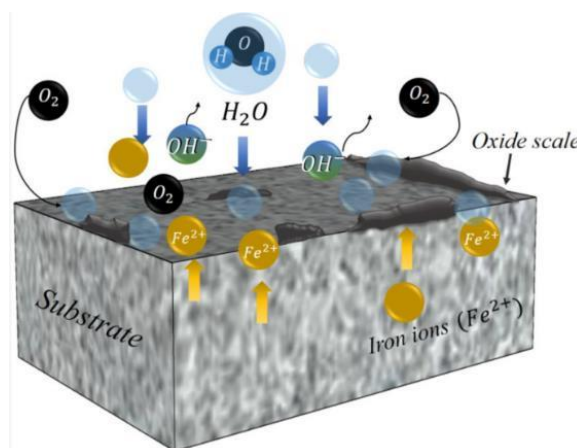
- Fe - železo
- O_2 - kisik
- x - spremenljivka
- y - spremenljivka

Reakcija železa s kisikom v atmosferi povzroči nastanek različnih vrst oksidov, kot so na primer vustit, magnetit in železov oksid oziroma hematit (FeO , Fe_3O_4 oziroma Fe_2O_3). Ta reakcija vključuje različne stopnje, pri čemer se oksidna plast oblikuje kot film ali kot ločeno oksidno jedro. Proces oksidacije se prične z absorpcijo kisika na površini železa in se nadaljuje z raztapljanjem kisika v železovem substratu. Le-ta deluje kot mesto kristalizacije za tvorbo in rast jeder oksidnih lusk. Iz tega razloga sta tako absorpcija kot difuzija odvisni od pogojev kovinske površine (na primer nagubanost, čistost,...) in napak (na primer kristalnih napak, razpok, poroznosti,...). Hitrost oziroma stopnjo oksidacije definira difuzija ionov v trdnem stanju skozi skorjo, do katere pride, ko je koncentracija kisika na površini oksida dovolj visoka. Slikovni prikaz nastanka oksidne skorje je prikazan na sliki 6 in 7. V zadnjem koraku se debelina oksidne skorje povečuje, rast razvitega oksida pa se zmanjšuje. Med nastankom oksidne skorje lahko v njej nastanejo tudi določene napake, kot so na primer mikro razpoke ali področja poroznosti [4].



Slika 6: Shematski prikaz nastanka oksidne skorje [4]

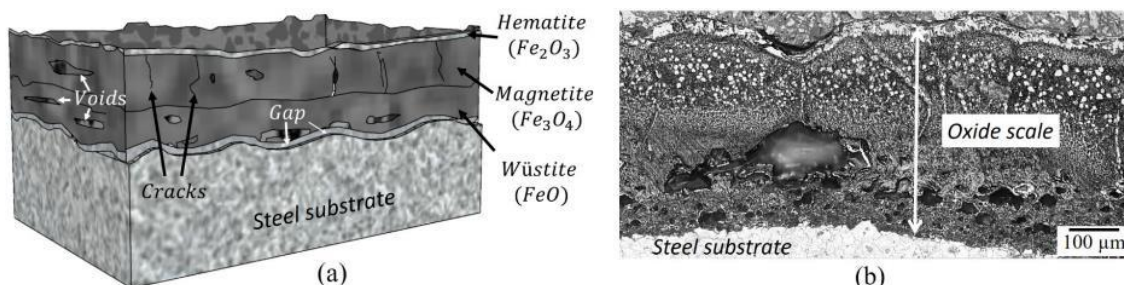
Med procesom kontinuiranega litja se tvorba oksidnih oblog prične v kalupu, ki je primarno hladilno območje. Tukaj pride jeklo v stik s kisikom iz okolja in vodo za hlajenje. Pri visokih temperaturah se dovzetnost jekla za oksidacijo poveča, kar povzroči razmeroma visoko stopnjo rasti oksidne skorje. V povezavi s tem lahko rečemo, da v atmosferi, nasičeni z vodo, kisik iz zraka in voda za ohlajanje materiala spremenita proces oksidacije, kar rezultira v debelejših oksidnih luskah. Nastanek oksidne skorje pod vplivom vodne pare poteka podobno kot v suhih razmerah, le da se stopnja difuzije poveča. Prisotnost vode poveča oksidacijsko stanje železa zaradi kisika, ki prihaja iz molekul vode [4].



Slika 7: Shematski prikaz reakcije oksidacije z zrakom in vodo [4]

Oksidna plast oziroma skorja na jeklenem slabu ali gredici je sestavljena iz različnih faz oziroma plasti, ki so v večini primerov vustit, magnetit in hematit. Kot prva plast se vedno tvori vustit, saj je najbližje substratu z najvišjo koncentracijo železa. Kot druga plast se tvori magnetit, kot zadnja plast pa se tvori hematit. Mikrostruktura oksidov je odvisna tudi od legirnih elementov, ki jih vsebuje jeklo [4].

Za aluminij je značilno, da lahko poviša temperaturo, pri kateri se tvori vustit in prispeva k odpornosti proti oksidaciji, medtem ko silicij in krom tvorita močnejšo zaščitno plast. Zaporeden prikaz elementov oksidne skorje je prikazan na sliki 8. Poleg tega silicij vpliva na nastanek debele plasti hematita, medtem ko so ogljik in drugi legirni elementi lahko koncentrirani na stičišču oksidne skorje in jekla [4].



Slika 8: Vrstni red faz na jeklenem slabu [4]

Hematit in magnetit sta glavni fazi, ki nastaneta na jeklih z več kot 0,1 % ogljika in oksidirata nad 700 °C, kar povzroči slabe adhezivne lastnosti jekla. Hematit nastaja predvsem pri višjih temperaturah, in sicer med 900 in 1050 °C. Na hitrost nastanka oksidne skorje in debelino le-te na površini slaba vplivajo različni dejavniki – atmosfera, prisotnost legirnih elementov, površina kovine – shematski prikaz je razviden na sliki 8 [4].

2.4.2 Inšpekcija površine

Pri proizvodnji slabov in gredic je izrednega pomena izvedba inšpekcije površine, saj lahko kakršnakoli napaka vpliva na izvedbo kasnejših operacij in tudi na kakovost končnega izdelka. Napake, ki se lahko pojavijo v fazi vlivanja so:

- Vzdolžne razpoke: Vzdolžne razpoke se praviloma pojavijo po sredini slaba, gledano v smeri vlivanja na kontilivu. Pri brušenju je potrebno, zaradi nadaljnje obdelave - valjanja, kolikor je le mogoče, simetrično brušenje. Glede na format vlitega slaba se razpoka na brusilnem stroju poskuša izbrusi. Primer vzdolžne razpoke je viden na sliki 9 in 10. Z brušenjem se prekine, če razpoka ni izbrušena:
 - pri formatu 250 mm pri zabrušenosti 200 mm in
 - pri formatu 200 mm pri zabrušenosti 160 mm.

V primeru, da razpoka ni izbrušena se slab odloži za komisijski pregled [4].



Slika 9: Vzdolžna razpoka na nebrušenem slabu [4]



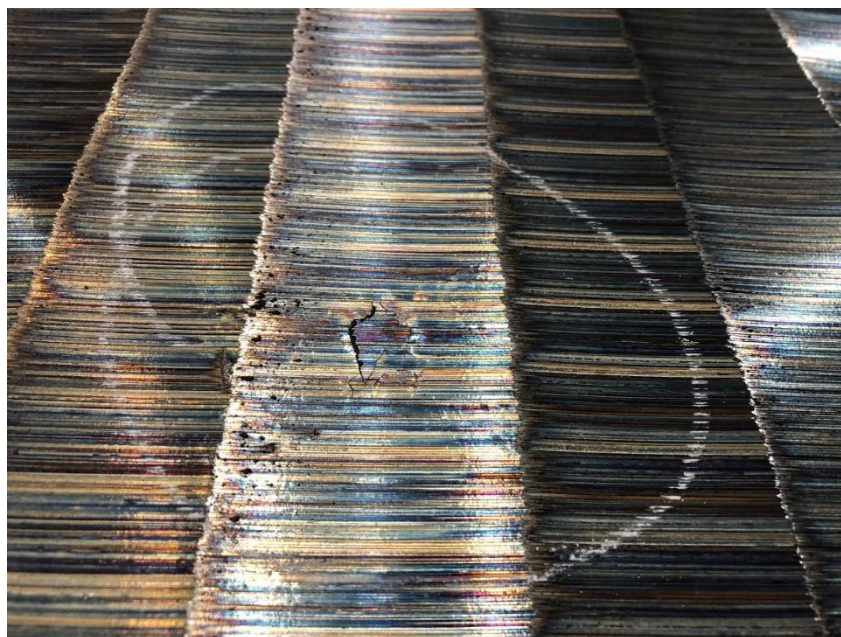
Slika 10: Vzdolžna razpoka na brušenem slabu [4]

- Lunkerji: Lunker se lahko pojavlja izključno na zadnjih pozicijah sarže in se odraža kot vodoravna razpoka na čelnem delu zadnjega dela slaba. Poleg lunkerja se na tem delu slaba lahko pojavi »manjko materiala«, ki je posledica zaključevanja vlivanja [4].



Slika 11: Vzdolžno prerezan slab z lunkerjem [4]

- Ostanki livarskega praška in gnezda titanovih oksidov so prikazani na sliki 12.

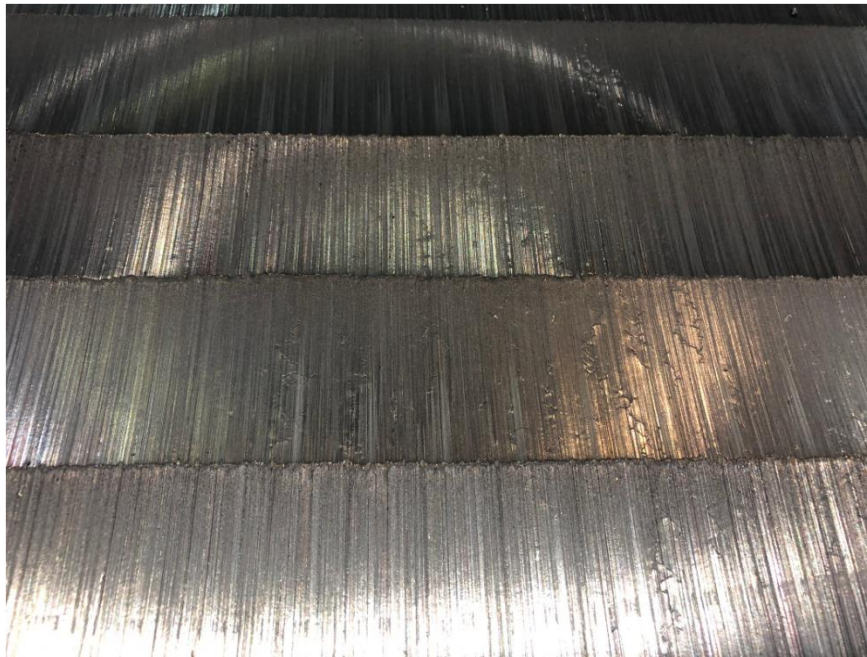


Slika 12: Ostanki livarskega praška in gnezda titanovih oksidov [4]

- Mrežaste razpoke: Mrežaste razpoke se pojavljajo najpogosteje pri formatu vlivanja 250 mm. Primer je viden na sliki 13. Gre za najpogostejšo napako pri brušenju, ki se pojavlja predvsem na prvih livnih pozicijah, kot posledica reakcije med livnim praškom in talino pri vlivanju [4].

Tako kot pri vzdolžnih razpokah tudi pri ostalih velja, da se brušenje napake prekine:

- pri formatu 250 mm pri zabrušenosti 200 mm in
- pri formatu 200 mm pri zabrušenosti 160 mm.



Slika 13: Mrežasta razpoka [4]

Nekatere od teh napak (predvsem površinske) je možno odpraviti v procesu brušenja, če gre za globinsko napako pa je potrebno slab oziroma gredico zavreči [4].

2.4.3 Materiali obdelovanja

Karakteristike materiala in oblika obdelovanja diktirajo določitev specifikacije brusne plošče. Kot že prej omenjeno, livarne izdelujejo slabe in gredice iz različnih materialov ter se s kemijsko sestavo prilagajajo kupcem glede na njihove potrebe oz. lastnosti, ki jih mora imeti končni izdelek.

Za izdelavo slabov in gredic se v večini primerov uporabljajo nerjavna in kemično obstojna jekla. Zanje je značilno, da so odporna proti kemičnim in elektrokemičnim vplivom atmosfere, vode, plinov, kislin in baz. Značilni zlitinski elementi nerjavnih jekel so:

- krom (najmanj 12 %) – povečuje kemično obstojnost in toplotno trdnost, na površini jekel se tvori zelo tanka, toda stabilna plast kromovega oksida, ki varuje jeklo pred nadaljnjo oksidacijo;
- nikelj, molibden in baker – povečajo obstojnost v neoksidirajočih kislinah;
- titan, tantal in niobij – stabilizirajo jekla (ogljik vežejo v stabilne karbide);
- ogljik ($< 0,1$ %) – vpliva na kemično obstojnost jekel.

Poznamo tri glavne vrste nerjavnih jekel, iz katerih se izdelujejo slabi: avstenitna, feritna in martenzitna jekla.

Avstenitna nerjavna jekla so najpogostejša nerjavna jekla in vsebujejo sledeče legirne elemente:

- krom: 17 – 26 %,
- nikelj: 7 – 26 %,
- ogljik: manj kot 0,12 %.

Avstenitna jekla so praviloma nemagnetna. Zanje je značilno, da so dobro odporna proti obrabi, zelo žilava in imajo povečano odpornost proti koroziji. V žarjenem stanju imajo nizko napetost tečenja in so žilava do ekstremno nizkih temperatur. Z različnimi načini preoblikovanja v hladnem stanju se lahko njihova trdnost izjemno poveča, hkrati pa se raztezek močno zmanjša. To je značilno predvsem za jekla z večjo koncentracijo ogljika. K avstenitnim jeklom spada tudi manganovo trdo jeklo, ki je po plastični deformaciji v hladnem izredno trdo. Prav tako so del avstenitnih jekel tudi nikljeva jekla, ki pa se zelo redko uporabljajo. To so jekla s posebno toplotno razteznostjo. Glede na uporabo so prisotna v najrazličnejših industrijah [5].

Feritna nerjavna jekla so prvenstveno kromova jekla s koncentracijo kroma med 12 in 18 % ter maksimalno koncentracijo ogljika do 0,1 %. Po določeni vsebnosti zlitinskih elementov se avstenit ne pojavi več niti pri višjih temperaturah. Feritnih jekel ni mogoče toplotno obdelati, ker nimajo faznih premen v trdnem stanju. Njihove lastnosti lahko zato spreminjamo le s hladno deformacijo in rekristalizacijskim žarjenjem. Za to vrsto jekla je značilno, da se pri platičnem preoblikovanju manj utrujejo kot avstenitna jekla. Njihova lastnost je, da so magnetna, kar pomeni, da jih ni možno kaliti, lahko pa se varijo in so odporna proti koroziji. Feritna nerjavna jekla so zelo pogosta v različnih industrijah, tako v industriji gospodinjskih aparatov, v arhitekturi in avtomobilski industriji [5].

Martenzitna nerjavna jekla vsebujejo minimalno 0,8 % ogljika in so po kemični sestavi zelo podobna feritnim nerjavnim jeklom. Zanje je značilno, da imajo dobre mehanske lastnosti – visoko trdnost in dobro odpornost proti obrabi. Definirana so kot kromova nerjavna jekla z 12 do 18 % kroma. Prav tako kot feritna jekla so tudi ta magnetna in jih lahko z ustrezno toplotno obdelavo poboljšamo – kalimo ali popuščamo. Zaradi dokaj visoke koncentracije ogljika pa jih ne moremo variti. Najpogosteje se ta jekla uporabljajo za vodne turbine ter razna rezilna orodja [5].

2.4.4 Ploskovno brušenje

Ploskovno brušenje z obodom brusa je končni postopek, pri katerem se uporablja vrteče se abrazivno kolo za glajenje ravne površine kovinskih ali nekovinskih materialov, da le ti dobijo bolj prefinjen videz z odstranitvijo oksidne plasti in nečistoč na površinah obdelovanca. S tem dosežemo tudi želeno površino za funkcionalni namen. Pri tem načinu brušenja ima glavno vlogo brus, podajalno gibanje pa je sestavljeno iz hitrejšega premočrtnega ali krožnega gibanja obdelovanca, vpetega na mizo stroja in počasnega prečnega podajanja. Obdelovanci so navadno vpeti na magnetno mizo. V primeru premočrtnega gibanja obdelovanca ob koncu vsakega vzdolžnega giba mize sledi prečni premik mize, ki je enak prečnemu dodajanju. Ko je odbrušena ploskev, se ob ponovnem prehodu preko obdelovanca premakne brus za razdaljo, ki je enaka globini brušenja na prehod. Količina odbrušenega materiala pri enem prehodu je odvisna od globine brušenja in prečnega pomika [6].

Sestavni deli stroja za površinsko brušenje so abrazivno kolo, naprava za držanje dela, znana kot vpenjalna glava, in batna ali vrtljiva miza. Vpenjalna glava drži material na mestu z dvema postopkoma: feromagnetne kose drži na mestu magnetna vpenjalna glava, medtem ko se neferomagnetni in nekovinski deli držijo na mestu z vakuumom ali mehanskimi sredstvi [6].

Dejavniki, ki jih je treba upoštevati pri površinskem brušenju, so material brusa in material kosa, ki ga obdelujemo.

Tipični materiali za obdelovance vključujejo lito železo in mehko jeklo. Ta dva materiala med obdelavo ne zamašita brusa. Drugi materiali so aluminij, nerjavno jeklo, medenina in nekatere plastike. Pri brušenju pri visokih temperaturah material oslabi in je bolj nagnjen k koroziji. To lahko povzroči tudi izgubo magnetizma [6].

Brusilno kolo ni omejeno na cilindrično obliko in ima lahko nešteto možnosti, ki so uporabne pri prenosu različnih geometrij na predmet, ki ga obdelujete. Ravna kolesa lahko upravljalavec prilagodi za izdelavo geometrij po meri. Pri površinskem brušenju predmeta je treba upoštevati, da se bo oblika kolesa prenese na material predmeta kot obratna slika [6].

Tipi strojev za ploskovno brušenje:

a) Horizontalno-vretenast površinski brusilniki

Obod brusne plošče je v stiku z obdelovancem, kar mu daje ravno površino. Periferno brušenje se uporablja pri visoko natančnih delih na preprostih ravnih površinah.

b) Brusilniki z navpičnim vretenom

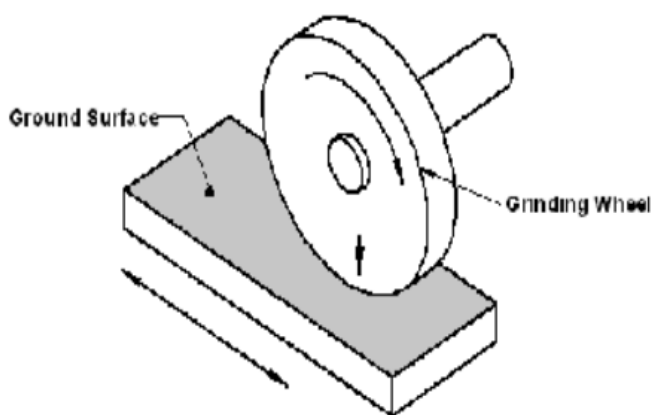
Stranska površina brusne plošče se uporablja na ravni površini. Čelno brušenje se pogosto uporablja za hitro odstranjevanje materiala, vendar lahko nekateri stroji

opravijo zelo natančno delo. Obdelovanec držimo na izmenični mizi, ki jo je mogoče spreminjati glede na nalogo.

c) Kolutni brusilniki in dvojno kolutni brusilniki.

Brušenje je v tem primeru podobno površinskemu brušenju, vendar z večjo kontaktno površino med brusno ploščo in obdelovancem. Diskasti brusilniki so na voljo v navpičnem in vodoravnem tipu vretena. Dvojni kolutni brusilniki obdelujejo obe strani obdelovanca hkrati. Diskasti brusilniki pa so sposobni doseči posebej fine tolerance [6].

Ne glede na uporabljen tip brusnega stroja, je ključnega pomena da je tako stroj kot tudi brusno orodje v brezhibnem stanju. Shematski prikaz ploskovnega brušenja je viden na sliki 14.



Slika 14: ploskovno brušenje [6]

2.4.5 Brušenje v polno

Brušenje v polno je tip brušenja, ki se izvaja na posebej izdelanih strojih z zelo počasnim gibanjem mize. Pri tem brušenju se brusna plošča »potopi« v obdelovanec in s tem dokončno izdela izdelek v enem koraku. Celotna količina materiala se odbrusi v enem ali dveh korakih namesto s številnimi koraki brušenja z manjšim dodajanjem (klasično ploskovno brušenje).

Za brušenje v polno je značilno, da se odrezki oblikujejo po krožnici na kontaktni površini in ustvarjajo se zelo visoke sile, kar zahteva posebno oblikovane brusilne stroje. Prav tako je značilno, da se ustvarjajo zelo visoke temperature (do 900 °C), kar pomeni, da se poveča obraba brusne plošče. Iz tega razloga so brusne plošče za brušenje slabov izdelane s posebnimi zrni, ki omogočajo takšno vrsto obdelave. Z brušenjem v polno je prav tako možno doseganje strogih toleranc in obdelovanje posebnih litin ter kaljenih materialov [6].

2.5 Vroče stiskane brusne plošče

Vroče stisnjene plošče uporabljamo za odstranjevanje oksidne skorje, ki nastane v procesu proizvodnje jekla, in odstranjevanje lokalnih napak v materialu. Oksidna skorja na površini nastane zaradi ohlajanja jekla v procesu izdelave slaba ali gredice med litjem in brušenjem. Obdelovalnost oksidne skorje je težavna in presega trdoto jekla, ki ga obdelujemo.

Lokalne napake na slabu ali gredici so posledica več dejavnikov, najpogostejši so:

- ostanki neraztopljenih livnih praškov na površini;
- površinske napake – razpoke, ki so posledica velikih toplotnih napetosti pri ulivanju ali po njem;
- lokalna globoka »zaškajenost«, do katere pride, ko se oksidna skorja globoko vtisne v osnovni material na ravnalnih strojih.

Odstranjevanje oksidne skorje in napak je še posebno težavno pri avstenitnih jeklih, ki imajo visok delež legiranih elementov, ki v večini primerov poslabšajo obdelovalnost jekla. Zvišana temperatura pri obdelavi in težavno tvorjenje odrezka se kažeta kot glavna vzroka za poslabšano obdelovalnost.

Brušenje slabov in gredic poteka na visoko produktivnih brusnih strojih z brusnimi ploščami, ki se razlikujejo od brusnih plošč, ki jih uporabljamo za klasične postopke brušenja. Značilnost pri vroče stisnjenih brusnih ploščah je visoka zgoščenost. Kriterij za zgoščenost brusne plošče je poroznost, ki je pri teh brusih manjša od enega volumskega odstotka. Pri brusnih ploščah za klasično zunanje brušenje je poroznost v smolni ali keramični vezi med 25 in 40 volumskimi odstotki. Minimalno poroznost omogočajo visok pritisk in zvišana temperatura pri oblikovanju ter uporaba primerne vezivnega sistema [6].

Ključna za optimalno učinkovitost brusne plošče pri brušenju je pravilna izbira kombinacije zrna in vezivnega sistema. Optimalna izbira zrna pomeni kompromis med žilavostjo in krhkostjo zrna. Zrno mora biti dovolj žilavo, da se zarije v material in s tem omogoči začetek oblikovanja odrezka. Krhkost zrna pa omogoči pravočasni lom posameznega zrna, kar pomeni, da je del zrna, ki je v stiku z materialom, vedno oster. Zaradi visokih sil in temperatur, ki so prisotne pri brušenju, se v zmes brusne plošče dodajo tudi steklena vlakna oziroma sekanci. Le-ti sam brus ojačajo in zmanjšajo možnost razleta ter izpadanja brusnih zrn. Smole, ojačane s sekanci iz steklenih vlaken, imajo visoko natezno, tlačno in upogibno trdnost, kar daje pozitivne rezultate pri brušenju.

Vroče stiskana brusna plošča se uporabi v prvi fazi obdelave, kjer je potrebno s površine obdelovanca odstraniti določen procent zunanje plasti (od 2 do 4 %). Zaradi visokih temperatur obdelovancev, ki se gibljejo okoli 500 °C, mora biti tudi brusna plošča temu prilagojena in narejena tako, da omogoča karseda enakomerno učinkovito brušenje z dolgo življenjsko dobo.

Lastnosti vroče stiskanih brusnih plošč so:

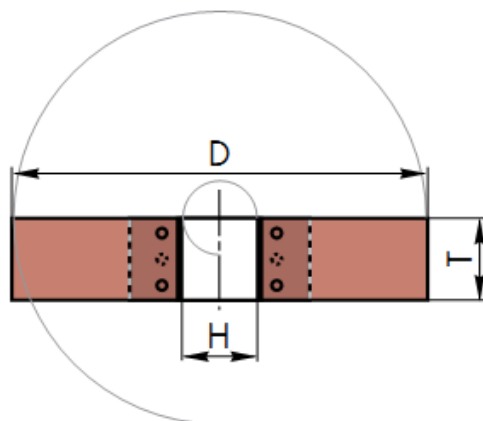
- visoka gostota in poroznost manj kot 2 %,
- masa do 280 kg,
- povišana temperatura pri oblikovanju in visoki pritiski,
- dodatne ojačitve – armiranje (armirni obroči in steklena vlakna),
- obodna hitrost 80 m/s,
- velike sile pri uporabi,
- zelo visok varnostni faktor 3,5 – pomeni, da je lahko razlet brusne plošče šele pri 150 m/s.

2.5.1 Izdelava vroče stisnjene brusne plošče

Vroče stisnjene brusne plošče se izdelujejo po posebnem postopku, ki se v določenih korakih razlikuje od izdelave ostalih bakelitnih brusnih plošč. Proces se prične v mešalnici, kjer se glede na razpisan delovni nalog pripravijo vse potrebne zmesi glede na določeno recepturno točko. Zmes za brusno plast se pripravi ločeno od zmesi za ekonomično brusno plast. Le-ta je narejena iz najcenejše kombinacije brusnih zrn, saj je nanjo nameščena kovinska prirobnica in v procesu brušenja nikoli ne pride v kontakt z obdelovancem. V naslednjem koraku sledi hladno oblikovanje, kjer se zmes nasuje v kovinsko orodje in pozicionirajo se armirni obroči. Orodje je sestavljeno iz dveh plošč – zgornje in spodnje, obroča in sornika. Zmes se poravna tako, da je homogeno razporejena v orodju. Sledi stiskanje na hladni preši. Nato se ploščo transportira na predgretje, ki traja 60 minut na 150 °C. Časovni okvir predgretja je zelo pomemben, saj se lahko v primeru prekratkega časa predgretja zgodi, da smole ne postanejo dovolj elastične in zato učinek stiskanja na vroči preši ni dosežen. V primeru predolgega časa predgretja pa reakcija smol preseže željeno točko, kar rezultira v lomu zreagirane smole med stiskanjem in posledično nastanejo razpoke v brusni plošči [6].

Po predgretju se plošča transportira do vročega oblikovanja oziroma 2000 tonske vroče preše. Tukaj se zaradi visokih temperatur prične proces tečenja smole, ki izteče iz orodja. Naslednji korak je izpahovanje brusne plošče iz orodja, pri čemer gre za zelo zahteven in težek postopek. Smola se namreč zasuši na orodje in jo je težko očistiti. Nato gre plošča na končno temperaturno obdelavo – v peč na 180 do 190 °C za 35 ur.

S tem je oblikovanje vroče stiskane brusne plošče končano, sledi še preizkus na povečano obodno hitrost, odprtje oboda plošče, izdelava luknje, kontrola debalansa in pakiranje. Shematski prikaz sestave brusne plošče je viden na sliki 15, končni izdelek pa na sliki 16.



Slika 15: Shematski prikaz prereza vroče stisnjene brusne plošče [6]



Slika 16: vroče stiskana brusna plošča [6]

2.6 Zrna za vroče stiskane bruse

Na produktivnost pri brušenju zelo vplivata oblika in velikost posameznega zrna, ki zagotavlja optimalno dolžino odrezka. Uporaba večje granulacije zrna pomeni, da lahko s kilogramom brusne plošče odbrusimo več materiala in podaljša se življenjska doba brusne plošče. Dodatna prednost je, da lahko v časovni enoti odbrusimo več materiala, ker lahko posamezno zrno oblikuje večji odrezek. Ob omenjeni spremembi granulacije se ne moremo izogniti poslabšanju površine obdelovanca, kar pa v nekaterih primerih ni dopustno. Zato so izbor oblike zrna oziroma kombinacije različnih oblik odvisne od materiala, ki ga brusimo, in določene na podlagi izkušenj vsakega proizvajalca [6].

Pri izbiri brusnega zrna upoštevamo material obdelovanca in njegovo stanje. Na splošno velja, da izberemo za brušenje jeklenih materialov korunde, za brušenje nejeklenih materialov pa silicijeve karbide. V primeru brušenja jeklenih slabov ali gredic je obvezno potrebno uporabiti kubični cirkonijev korund oziroma cirkonijev aluminijev oksid, ki prenese zelo velike sile in je obstojen tudi pri brušenju z 80 m/s. Pri izbiri velikosti brusnih zrn moramo biti pozorni na kvaliteto površine po brušenju. Za bolj fino površino se izberejo brusna zrna višje granulacije [6].

Zaradi dobrih mehanskih in kemijskih lastnosti je cirkonijev korund najpogosteje uporabljeno zrno pri izdelavi vroče stiskanih brusnih plošč [6].

Cirkonijev aluminijev oksid oziroma cirkonijev korund je evtektična zmes aluminijevega in cirkonijevega oksida, ki se pogosto uporablja v proizvodnji brusnih plošč in drugih abrazivnih izdelkov. Gre za sintetični material, ki združuje lastnosti tako cirkonija (cirkonijev oksid) kot aluminijevega oksida (korunda). Ima mikrokristalinično kristalno strukturo in se pridobiva s taljenjem glinice, cirkonijevega oksida, titanovega oksida in ostalih dodatkov v električni obločni peči pri temperaturi 2000 °C. Talino se hitro ohladi v posebnih talilnih agregatih, da se dobi mikrokristalična in homogena kristalna struktura. Takšna sestava in postopek izdelave mu dajejo lastnost samoostrenja. Končni efekt teh lastnosti pa je visoka kvaliteta brušenja in dolga življenjska doba pri brušenju s hlajenjem. Za to zrno je značilno, da se uporablja samo v smoleno vezanih brusnih ploščah, namenjenih za brušenje jeklenih odlitkov, nerjavnih jekel in za brušenje visokolegirnih jekel. Prav tako je zelo dobro odporen na visoke temperature pri brušenju [6].

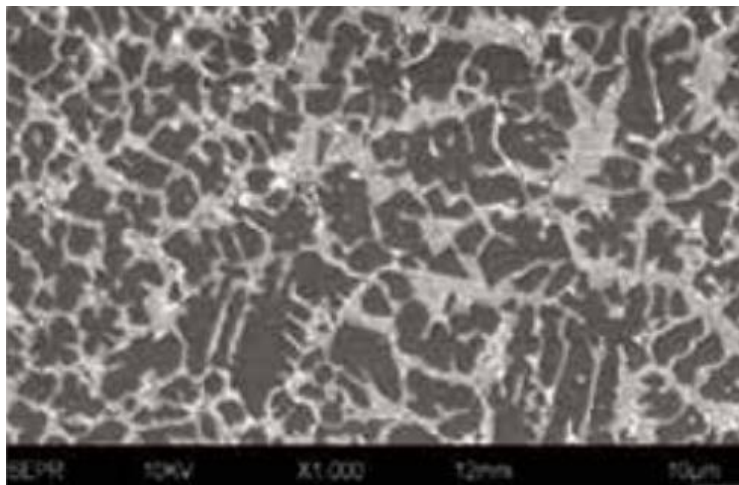
Cirkonijev korund se uporablja v različnih aplikacijah, in sicer:

- Brušenje kovin: Zaradi svoje trdote in trpežnosti je učinkovita pri brušenju in oblikovanju kovin.
- Odstranjevanje varjenja: Njegova vzdržljivost ga naredi primerne za aplikacije, kjer je potrebno odstranjevanje varjenja.
- Brušenje nerjavnega jekla: Abraziv je še posebej učinkovit pri brušenju in zaključevanju površin nerjavnega jekla.

- Premazani abrazivi: Uporablja se tudi v premazanih abrazivnih izdelkih, kot so brusni papir in brusilni trakovi za aplikacije, ki zahtevajo natančnost in dosledno površino.



Slika 17: Makrostruktura cirkonijevega korunda [6]



Slika 18: Mikrostruktura cirkonijevega oksida [6]

Tipična kemijska struktura je sestavljena iz okvirno 75 % aluminijevega oksida, 23 % cirkonijevega oksida. Markostruktura zrna je vidna na sliki 17, mikrostruktura pa na sliki 18. Preostala 2 % pa predstavljajo druge primesi – titan, silicij, kalcij, magnezij in druge [6].

Mehanske lastnosti zrna so:

- velikost kristalov: 17 μm
- gostota: 4,3 g/cm^3
- trdota po Vickersu: 21 GPa
- tališče: 1950 $^{\circ}\text{C}$.

V določenih aplikacijah, predvsem za visoko legirna jekla (avstenitna jekla) in nerjaveča jekla ter pri kupčevih zahtevah po fini površini se uporablja tudi ekstrudiran korund v obliki špagetov ali paličic. Zaradi svoje oblike ima to zrno tendenco, da se dlje časa obdrži v brusni plošči. Po kemijski sestavi je od 95 do 99 % sestavljen iz aluminijevega oksida. Po trdoti pa je zelo podoben cirkonijevemu korundu [6].

2.7 Fenol formaldehidne smole

Fenol formaldehidne smole so prvi sintetični polimeri, ki so jih začeli izdelovati za industrijsko uporabo. Le-te nastajajo pri stopenjski polimerizaciji (polikondenzaciji) fenolov in aldehydov, pri čemer se največkrat uporabljata fenol in formaldehid [7].

Fenolna smola je prevladujoči polimer v abrazivni industriji. Ima odlične lastnosti, kot sta visoka toplotna odpornost in odlična oprijemljivost na zrna. V primerjavi z drugimi toplotno odpornimi smolami je fenolna smola cenejša in jo je lažje oblikovati kot druge smole [7].

Fenol formaldehidne smole so smole, ki so v industriji nadomestile naravne smole. Za njihovo zamreževanje je potrebno dodajanje toplote oziroma segrevanje. Poznamo novolachne in rezolne smole [7].

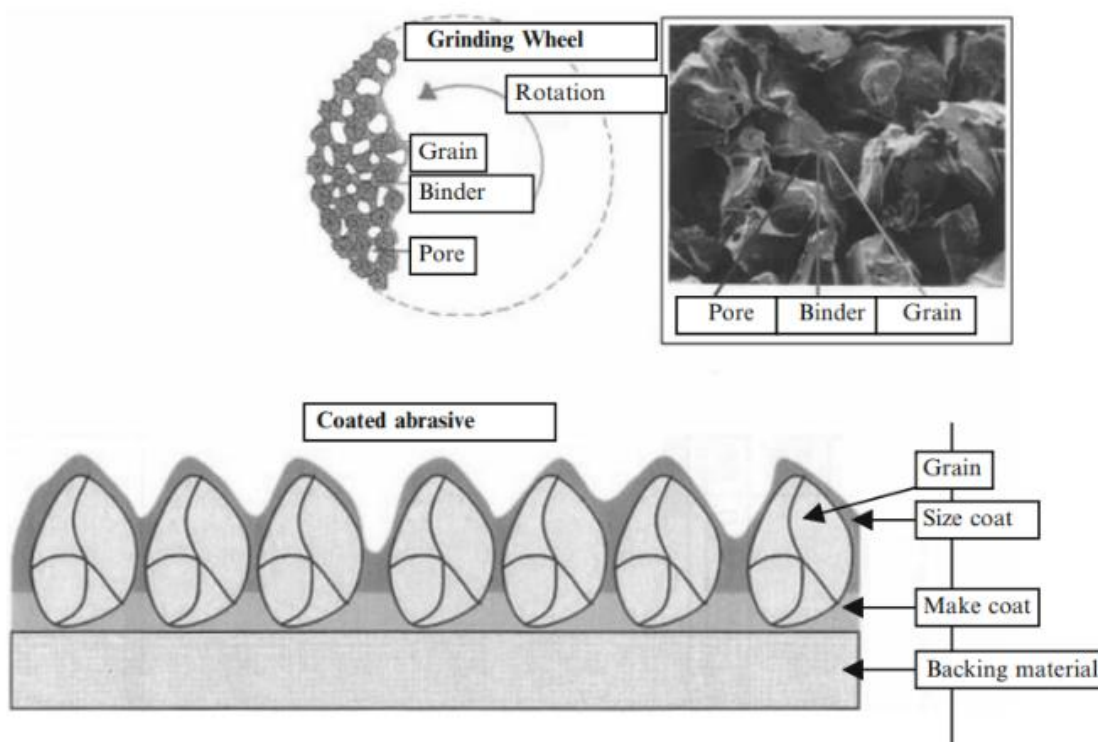
Novolachne smole imajo razmerje med fenolom in formaldehidom manjše od 1. Iz tega razloga jim je potrebno dodati zamreževalec. Glede na tip dodanega zamreževalca pa lahko spreminjamo lastnosti smole. Novolachne smole lahko razdelimo v tri skupine glede na dolžino poti tečenja: kratke (do 25 mm), srednje (od 26 do 40 mm) in dolge (nad 40 mm). Zamreževanje se prične pri 120 °C. Smola ne sme vsebovati več kot 0,7 % vlage [7].

Brusni plošči daje odlične mehanske lastnosti in dopušča velike obodne hitrosti. Ugodno je tudi za armiranje s pletivom iz steklenih vlaken, s čimer se izboljšajo mehanske lastnosti brusa. Za to vezivo je značilno, da je manj občutljivo na temperaturne spremembe [7].

Vezivni sistem ima nalogo, da zadrži brusno zrno v brusni plošči tako dolgo, da je posamezno zrno še ostro. Nato mu mora omogočiti, da izpade. Te lastnosti dajejo vezivnemu sistemu fenolne smole in polnila. Fenolne smole v procesu izdelave brusne plošče zrno oblijejo, s čimer ga zadržijo pri brušenju v brusni plošči. Pomembno vlogo pri varovanju fenolne smole pred prehitrim razpadom zaradi vpliva toplote, ki se sprošča pri brušenju, imajo polnila. S svojim razpadom pri višjih temperaturah nase prevzamejo toploto in s tem preprečijo razpad fenolne smole. Temperaturni interval v kontaktni coni brušenja je zelo širok, zato z dodajanjem različnih vrst polnil dosežemo razpade le-teh v različnih temperaturnih intervalih [7].

Ena tehnoloških ključnih lastnosti fenol formaldehidnih smol je v tem, da imajo že same po sebi tendenco karbonizacije in so zato temperaturno zelo obstojne. Ob tem ima fenol še lastnosti lovilca radikalov [7].

Na sliki 19 je shematsko prikazano kako vezivni sistem (smola) oblije brusno zrno. Proces brušenja in rezanja je zaradi mehanizacije procesov postal ena glavnih dejavnosti v številnih industrijah. Fenolna veziva so se že pred mnogimi leti izkazala za najprimernejša na tem področju, pri čemer pa niso pomembne le njihove ugodne visokotemperaturne in obrabne lastnosti, temveč tudi številne druge lastnosti, kot je na primer dobra odpornost na kemične reagentne pri mokrem brušenju [7].



Slika 19: Struktura abrazivnega orodja [7]

2.8 Polnila v vroče stiskanih brusnih ploščah

V vroče stiskane brusne plošče se poleg brusnih zrn in veziva (smole) dodajajo tudi polnila, ki so lahko aktivna ali pasivna. Najpogosteje uporabljena polnila so:

Pirit je mineralno polnilo temno sive barve s formulo FeS_2 . Pirit v obliki prahu je prikazan na sliki 20. Gre za aktivno polnilo, ki spada v skupino kovinskih sulfidov. Na brušenje vpliva tako, da znižuje temperaturo brušenja in preprečuje oksidacijo na površini brusnega orodja. Temperatura razpada pirita je med 400 in 450°C pri čemer se generira žveplo, ki preprečuje nastanek kovinskih oksidov na površini obdelovanca. V primeru bolj grobih granulacij izboljšuje brusni efekt in poroznost [8].

Lastnosti polnila:

- Kemijska sestava: Fe: 42-46%, S: 48-52%, SiO_2 : 1,0-2,0%, Al_2O_3 : 0,5-1,5%, CaO: 0,1-0,5%
- pH: 4 - 7
- gostota: $4,6 \text{ g/cm}^3$
- tališče: 500°C



Slika 20: Pirit v prahu

Kriolit je sintetično mineralno polnilo bele barve s formulo Na_3AlF_6 . Gre za aktivno polnilo, ki spada v skupino kovinskih fluoridov in ima dobro interakcijo s fenolnimi smolami. Dodatek fluorida zvišuje temperaturo tališča železnega obdelovanca. Zaradi nizkega tališča pa ga uvrščamo tudi med mazalna sredstva [8].

Lastnosti polnila:

- Kemijska sestava: Na 22%, Al 19%, F 51%
- pH: 8
- gostota: $2,95 \text{ g/cm}^3$
- tališče: 1012°C
- trdota (Mohs): 2,5

Wollastonit je kristalno polnilo bele barve s formulo CaSiO_3 . Wollastonit v obliki praha je prikazan na sliki 21. Zanj je značilno, da pripomore pri povečanju upogibne trdnost, zmanjšuje toplotne deformacije, povečuje dimenzijsko stabilnost in zmanjša absorpcijo vlage. Prav tako zmanjšuje razpore pod obremenitvijo. Njegova uporaba se priporoča predvsem pri kompozitih, kjer je zahtevana odpornost na vlažno okolje in UV svetlobo [8].

Lastnosti polnila:

- gostota: $2,86 \text{ g/cm}^3$
- tališče: 1540°C
- trdota (Mohs): 4,5



Slika 21: Wollastonite v prahu

Cinkov sulfid je po strukturi kristalni mineral rumeno-sive barve s formulo ZnS . Spada v skupino kovinskih sulfidov. Zanj je značilno, da ima visoko temperaturno prevodnost, visoko slomno trdnost in preprečuje oksidacijo. Prav tako kot pirit in kriolit spada med aktivna polnila [8].

Lastnosti polnila:

- Kemijska sestava: Zn 51%, S 31%
- gostota: $4,090 \text{ g/cm}^3$
- tališče: 1700°C
- trdota (Mohs): 4,5

2.9 Zaviralci gorenja

Zaviralci gorenja so kemikalije, ki se dodajajo različnim materialom ali zmesem z namenom preprečevanja gorenja oziroma upočasnitve širjenja ognja. Izraz zaviralec ognja se nanaša na funkcijo določene kemikalije, ne pa na specifično sestavo. S pomočjo kemijskega ali fizikalnega delovanja zavirajo oziroma preprečujejo proces gorenja. Na proces lahko vplivajo v različnih stadijih gorenja, na primer med razpadom, vžigom ali širjenjem plamena. Količina dodanega zaviralca ognja se razlikuje glede na posamezno vrsto oziroma tip materiala, v katerega se aplicira. Pri anorganskih polnilih ga je potrebno dodati tudi do 50 % glede na težo predmeta. Običajen vnos se giblje med 5 in 20 % celotne teže materiala [9].

Kemijsko delovanje poteka na način, da zaviralci gorenja zavirajo proces gorenja v plinski fazi z nevtralizacijo H in OH radikalov. Na ta način pride do ohladitve sistema, ki ga povzroči zmanjšanje oziroma zadušitev dotoka vnetljivih plinov. Pri zmeseh v trdni fazi zaviralci gorenja delujejo kot intuminiscenti, kar pomeni, da ustvarijo na površini ogljikovo (»grafitno«) peno, ki izolira gorljivi material pred dostopom kisika in toplote. Pri tem je vloga fosfatnega dela primarno v nastanku proste fosforne kisline, ki pospešuje karbonizacijo (dehidracijo) brez gorenja, sekundarno pa v tvorbi ognjevarnega polifosfatnega filma (stekla) [9].

Poznamo različne vrste zaviralcev gorenja, in sicer halogene, fosforjeve, dušikove in anorganske. Najbolj učinkoviti so tisti zaviralci gorenja, ki delujejo kot radikalski lovilci. Med temi so tehnološko najučinkovitejši halogenirani (predvsem bromirani) zaviralci, ki so na primer še vedno nenadomestljivi v gradbeništvu za zagotavljanje ognjevarnosti organskih izolacijskih materialov (npr. stiropora) [9].

Halogenirani zaviralci gorenja vsebujejo elemente, kot so brom ali klor. Primeri vključujejo polibromirane dietil etre (PBDE) in klorirane organofosfate. Čeprav so učinkoviti, so nekateri halogenirani zaviralci gorenja deležni skrbi glede okolja in zdravja, kar je vodilo k razvoju alternativnih rešitev [9].

Fosforjevi zaviralci gorenja delujejo kot tvorci saj in ustvarjajo zaščitno plast, ki izolira material pred toploto plamena. Primeri vključujejo amonijev polifosfat in organofosfate.

Neorganski zaviralci gorenja so snovi, kot sta hidroksid aluminija in hidroksid magnezija. Delujejo na način, da sproščajo vodno paro, ko so izpostavljeni toploti, kar lahko pomaga ohladiti material in zavirati ogenj [9].

Intumescenčni zaviralci gorenja običajno vključujejo kombinacijo kisline, vira ogljika in sredstva za pihanje. Ko so izpostavljeni toploti, doživijo kemično reakcijo, ki ustvari izolacijsko plast saje, ki ščiti material pred plameni [9].

Izbira zaviralca gorenja je odvisna od dejavnikov, kot so vrsta materiala, aplikacija in regulativne zahteve. Pomembno je opozoriti, da je uporaba zaviralcev gorenja včasih kontroverzna zaradi morebitnih vplivov na okolje in zdravje. Raziskovalna in razvojna

prizadevanja potekajo, da bi našli učinkovite in okolju prijazne rešitve zaviralcev gorenja [10].

2.9.1 Vpliv uporabe zaviralca gorenja na obstojnost brusne plošče

Uporaba zaviralca gorenja v brusnih ploščah predstavlja pozitivno spremembo, saj preprečuje smoli, da se razgradi med procesom brušenja. Smola, uporabljena v vroče stiskanih brusnih ploščah, je odporna na razpad le do določene temperature, po presežku pa se razgradi, kar se negativno odraža v izpadanju brusnih zrn. S tem brusna plošča izgubi na zmožnosti odstranjevanja materiala in se tudi hitreje obrablja. Slaba stran uporabe zaviralcev gorenja pa je njihova kemijska karakteristika in okoljska varnost. Iz tega razloga so prepovedani v marsikateri industriji. V primeru aplikacije v vroče stisnjene brusne plošče ta prepoved ne velja, saj gre za profesionalno uporabo v industrijskem okolju, je pa potrebno snov klasificirati kot nevarno [10].

2.10 Nadaljnja uporaba jeklenih slabov in gredic v industriji

Ustrezno zbrušeni slabi oziroma gredice so polizdelek, ki ga je potrebno še dodatno obdelati, da dobimo končni izdelek primeren za prodajo. Dva glavna postopka obdelave slabov sta valjanje in rezanje [10].

Pri procesu valjanja jeklene slabe nadalje obdelamo s postopkom vročega valjanja, ki vključuje potiskanje pločevine skozi serijo valjev, da zmanjšamo njegovo debelino in oblikujemo različne oblike, kot so plošče, listi ali tuljave. Valjanje jekla je kovinska obdelovalna metoda, ki vključuje oblikovanje jekla s potiskanjem skozi par valjev. Ta postopek se uporablja za zmanjšanje debeline in spremembo prečnega prereza jekla, kar ustvarja različne oblike, velikosti in oblike, kot so listi, plošče, palice in konstrukcijski odseki. Postopek valjanja jekla je ključen korak pri proizvodnji različnih jeklenih izdelkov. Postopek valjanja lahko razdelimo na vroče in hladno valjanje. Proces vročega valjanja se začne s segrevanjem jeklenega polizdelka ali pločevine na visoke temperature, običajno nad njegovo temperaturo ponovnega kristaliziranja. To omogoča jeklu večjo oblikovnost in lažje deformacije. Ogrevano jeklo nato potisnemo skozi serijo valjev v valjarni. Valji se lahko razporedijo v različne konfiguracije, da dosežejo določene oblike in velikosti. Ko jeklo prehaja skozi valje, doživlja deformacijo, kar povzroči zmanjšanje debeline in povečanje dolžine. Stopnja zmanjšanja je odvisna od števila in razporeditve valjev v mlinu. Po vročem valjanju se jeklo pogosto kontrolirano ohladi, da ohrani želene lastnosti [10].

Vročemu valjanju lahko sledi še hladno valjanje, ki pločevino še dodatno stanjša. Jeklo potisnemo skozi valjarno za hladno valjanje, kjer doživlja nadaljnje zmanjšanje debeline pri sobni temperaturi. Hladno valjanje lahko doseže tesnejše tolerance in bolj gladko površino v primerjavi s toplim valjanjem. V nekaterih primerih, še posebej pri določenih zlitinah jekla, se med hladnim valjanjem lahko izvede vmesno glajenje, da se ohrani duktilnost [10].

Končna operacija je še rezanje in navijanje pločevine v kolute za enostavnejše prevažanje in rokovanje. Proces rezanja jeklenih pločevin vključuje preoblikovanje velikih, pravokotnih jeklenih pločevin v manjše, bolj obvladljive kose ali prilagojene velikosti, da izpolnjujejo specifične zahteve za nadaljnje aplikacije. Metode rezanja, uporabljene za jeklene pločevine, se lahko razlikujejo glede na dejavnike, kot so vrsta jekla, debelina in želeni končni izdelek [10].

Valjano jeklo prestane tudi pregled dimenzionalne natančnosti, površinske obdelave in drugih lastnosti, da se zagotovi skladnost z industrijskimi standardi in specifikacijami naročnika [10].

Vrste valjanih izdelkov:

- Plošče: Ravni izdelki z različnimi debelinami, uporabljeni v aplikacijah, kot so gradnja, avtomobilska industrija in gospodinjski aparati.
- Palice in drogovi: Dolgi izdelki z različnimi prečnimi oblikami, vključno z okroglimi, kvadratnimi in šestkotnimi.
- Konstrukcijske oblike: Valjane jeklene sekcije, kot so nosilci, kanali in kotniki, uporabljene v gradnji in konstrukciji.

Aplikacije:

- Gradnja: Valjano jeklo se pogosto uporablja v gradbeništvu za konstrukcijske komponente, vključno z nosilci, stebri in armaturnimi palicami.
- Proizvodnja: Različne industrije uporabljajo valjano jeklo za proizvodnjo strojev, avtomobilskih delov, cevi in široke palete drugih izdelkov.

Valjanje jekla je temeljni proces v jeklarski industriji, ki prispeva k proizvodnji raznolikega nabora jeklenih izdelkov, ki so pomembni za mnoge vidike sodobne infrastrukture in proizvodnje [10].

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 TGA analiza

TGA je kratica za termogravimetrično analizo, ki meri spremembe mase vzorca kot funkcijo temperature (ali časa), medtem ko je vzorec podvžen nadzorovanemu temperaturnemu programu. Vzorec je izpostavljen programiranemu povečanju temperature, in rezultat spremembe mase se zabeleži. Ta tehnika se pogosto uporablja za karakterizacijo sestave in termične stabilnosti materialov. TGA je še posebej uporabna za proučevanje termičnih lastnosti materialov [11].

Glavne komponente:

- Vzorčni lonec: Material, ki se analizira, se postavi v majhno posodico ali lonec.
- Referenčni lonec: Prazna posodica se uporablja kot referenca za kompenzacijo morebitnih sprememb v eksperimentalnih pogojih, ki niso posledica vzorca.
- Tehnica: Sistem vključuje visoko občutljivo tehtnico za merjenje mase vzorčnega in referenčnega lonca.

Prvi korak pri TGA analizi je priprava majhne količine vzorca (običajno nekaj miligramov), ki se ga položi v vzorčni lonec. Le ta je izpostavljen nadzorovanemu programu temperature. To lahko vključuje postopno povečanje temperature ali druge določene profile ogrevanja. Tehnica neprekinjeno beleži maso vzorčnega lonca. Medtem ko vzorec doživlja termične prehode, kot so razgradnja ali izhlapevanje, se zaznavajo spremembe mase. Podatke, pridobljene iz TGA, lahko uporabimo za določanje sestave, termične stabilnosti, kinetike razgradnje in drugih lastnosti vzorca [11].

S TGA analizo smo želeli dobiti rezultat, katera prašna smola ima najvišjo temperaturno obstojnost in je zato tudi najbolj primerna za izdelavo etalonov. Analiza je bila izvedena v sodelovanju s podjetjem Fenolit d.d. in g. Evgenijem Erženom, ki opravlja delo samostojnega razvojnega analitika.

Za izvedbo je bilo potrebno s strani podjetja Weiler d.o.o. poslati štiri različne vzorce prašnih smol. Izbrali smo jih na podlagi preteklih izkušenj in lastnosti. Vzorce po 1 g smo označili s številkami od 1 do 4. Peti vzorec označen z BL-18S je bil predlagan s strani Fenolita. V tabeli 1 so prikazani rezultati TGA analize.

Tabela 1: Rezultati TGA analize

	Weiler Vz1	Weiler Vz2	Weiler Vz3	Weiler Vz4	BL-18S
T1 (°C)	597.5	598.4	600.4	590.9	595.8
T2 (°C)	595.6	597.2	600	592.9	597.2
T3 (°C)	596.2	600	601.3	591	599.2
$T_{(povp)}$ (°C)	596.4	598.5	600.6	591.6	597.4
Tolerančne meje	597.4	599.9	601.2	592.7	599.1
	595.5	597.1	599.9	590.5	595.7

Rezultati TGA analize so pokazali, da je temperaturno najbolj obstojna prašna smola TIP10 (vzorec 3), ki smo jo kasneje tudi uporabili pri izdelavi etalonov.

3.2 Izdelava etalonov brusne plasti brusne plošče

Eksperimentalni del magistrske naloge sem si zamislila izvesti z izdelavo etalonov vroče stiskanih brusnih plošč. Te pa se v industriji izdelujejo v dimenziji premera Ø 610 mm ali Ø 915 mm, kar pa je preveliko za laboratorijske analize, zato sem se odločila narediti etalone v dimenziji 180 x10 x 22,2 mm. Etalone smo naredili v dveh različnih variantah, pri čemer smo želeli spremljati vpliv sledečih komponent:

- zaviralca gorenja,
- sekancev iz steklenih vlaken – za etalone sem izbrala steklene sekance v dimenziji 4,5 mm; gre za silanizirana 10 mikronska pletena steklena vlakna, ki imajo v primerjavi z ostalimi visoko temperaturno obstojnost (do 1400 °C) in so silanizirana z namenom, da se dlje časa obdržijo v brusni plošči.

Izhodiščna receptura oziroma specifikacija je bila pri vseh etalonih enaka, kar pomeni, da kombinacije oziroma količine izbranih zrn nismo spreminjali. Prav tako so ostale enake tudi ostale komponente, spreminjali smo le delež zaviralca gorenja na 100 % prašne smole.

Sestava izhodiščne recepture za etalone:

		gostota	ut.delež (%)		ut%
zrno	Rod92X F14	3,70	100		
	Rod SM	3,81			
	Rod SR1	3,82			64,48%
	SO 340	3,76			
	XA	4,30			
				vol.	
vezivo	PS/ GKS	1,31	27	20,6107	9,59%
	PS tip10		100		8,84%
	PS tip 5				0,00
	FURF				0,84%
	CNSL				0,14%
	NonilF				0,19%
% v smoli ->	Sacoflam 31107	1,48	0		0,00
	pirit	5,00	35,0	7,0000	12,43%
	ZnS	4,10	5,0	1,2195	1,78%
	wollastonit	2,90	5,0	1,7241	1,78%
	andaluzit	3,10	5,0	1,6129	1,78%
	kriolit	2,95	5,0	1,6949	1,78%
	apno	3,35	4,0	1,1940	1,42%
	stekl. vlakna	2,58	14,0	5,4264	4,97%
	PAF/ BR10	2,88	0	0,0000	0,00
	halkopirit	4,19	0	0,0000	0,00
	vsota		100,00	40,4825	100,42%

V izhodiščni specifikaciji ni bilo dodanega zaviralca gorenja, saj bo le-ta služila kot referenca za primerjave z etaloni, ki pa ga bodo vsebovali. Na ta način bom lahko točno definirala, za koliko dodatek zaviralca gorenja poveča obstojnost brusne plošče.

Pri prvi verziji smo izdelali dva kosa z dodatkom zaviralca gorenja. Dodali smo ga 10 % glede na količino prašne smole. Po preračunu je to zneslo okvirno 2,5 % na celotno zmes.

Sestava recepture oziroma specifikacije z 10 % dodatkom zaviralca gorenja:

		gostota	ut.delež (%)		ut%
zrno	Rod92X F14	3,70	100		
	Rod SM	3,81			
gostota zrna	Rod SR1	3,82			64,35%
3,82	SO 340	3,76			
	XA	4,30			
				vol.	
vezivo	PS/ GKS	1,31	27	18,5496	9,63%
	PS tip10		100		8,88%
gostota Vez	PS tip 5				0,00
2,485	FURF				0,84%
	CNSL				0,14%
	NonilF				0,19%
% v smoli ->	Sacoflam 31107	1,48	10	1,8243	0,89%
	pirit	5,00	35,0	7,0000	11,59%
	ZnS	4,10	5,0	1,2195	1,78%
	wollastonit	2,90	5,0	1,7241	1,78%
	andaluzit	3,10	5,0	1,6129	1,78%
	kriolit	2,95	5,0	1,6949	1,78%
	apno	3,35	4,0	1,1940	1,43%
	stekl. vlakna	2,58	14,0	5,4264	4,99%
	PAF/ BR10	2,88	0	0,0000	0,00
	halkopirit	4,19	0	0,0000	0,00
	vsota		100,00	40,2458	100,42%

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Rezultati in diskusija

Glavni rezultati, ki sem jih dobila in lahko na podlagi njih definiram uspešnost opravljenih testiranj, so rezultati razletnega testa in brušenja z industrijskim robotom. Pred samim začetkom izvajanja testiranj je bilo moje pričakovanje, da se bodo rezultati posameznega etalona med seboj drastično razlikovali in bom lahko na koncu izpostavila primer najboljše prakse. Po pregledu rezultatov le-ti niso bili popolnoma v skladu z mojimi pričakovanji, kar pomeni, da bo s testiranjem potrebno nadaljevati in najverjetneje tudi razviti še kakšno dodatno metodo.

Pri pregledu rezultatov razletnih testov in s tem povezane termične izpostavljenosti etalonov brusnih plošč je bilo prvo spoznanje, da 40 oziroma 20-minutna izpostavljenost 550 °C povzroči prevelik razpad smole, kar je rezultiralo v slabih rezultatih pri razletem testiranju. Iz tega razloga sem v naslednjem koraku nove etalone izpostavila povišani temperaturi le za 5 oziroma 10 minut. Rezultati razletnih testov so bili v tem primeru veliko bolj relevantni, saj ni prišlo do prevelikega razpada smole med temperaturnim popuščanjem.

Pri pregledu rezultatov brušenja z industrijskim robotom sem dobila pozitiven rezultat, vezan na dodan zaviralec gorenja, saj je etalon s tem dodatkom dosegel višji G-faktor in se med samim postopkom brušenja manj porabil, kar nakazuje, da je zaviralec gorenja pozitivno vplival na razpad smole in omogočil manjše izpadanje brusnih zrn.

4.1.1 Termična analiza

Termična analiza je potekala na način, da smo etalone segrevali na 550 °C v različnih časovnih intervalih in s tem želeli preveriti obstojnost smole na temperaturo oziroma priti do odgovora, ali dodatek zaviralca gorenja izboljša obstojnost etalona pod vplivom visokih temperatur. Temperaturno popuščanje je bilo izvedeno v peči Nabertherm, ki je prikazana na sliki 22 in 23.

Temperaturo 550°C smo izbrali glede na dimenzije etalonov, ki smo jih temperirali. Dejanske temperature pri industrijskem brušenju so še nekoliko višje in lahko presežejo 700°C. Izvedba temperiranja na tako visoki temperaturi ne bi bila smiselna, saj je debelina etalonov le 10 mm in bi ga s tem uničili. Vroče stiskane brusne plošče so v večini primerov za industrijsko uporabo izdelane v debelini 76 ali 102 mm.



Slika 22: Peč za temperaturno popuščanje etalonov (notranjost)



Slika 23: Peč za temperaturno popuščanje etalonov (zunanost)

a) Temperaturno popuščanje na 550 °C 20 minut, 40 minut in 0 minut

Tabela 2: Meritve etalonov brez dodatka zaviralca gorenja

št. vzorca	D (mm)	T (mm)	H(mm)	masa (g)	masa (g) po term. popuščanju	R odčitek	D2 (g/mL)	E-modul (GPa)	razlet (o/min)
1	184,31	9,98	22,13	818,5	neuravnotežen kos				
	184,31	10,1	22,1						
		9,81							
		9,96							
	184,31	9,97	22,12						
2	184,31	9,98	22,16	817,5	790,60 (20 min)	1582	3.131	55,66	3515
	184,28	9,94	22,05						
		9,87							
		9,93							
	184,29	9,93	22,11						
3	184,33	9,93	22,1	818,0	779,78 (40 min)	1564	3.135	57,17	4350
	184,32	9,84	22,03						
		9,97							
		9,93							
	184,32	9,92	22,07						
4	184,34	9,71	22,04	811,0	811,00 (0 min)	1587	3.137	56,54	15915
	184,3	9,67	22,05						
		9,97							
		9,96							
	184,32	9,83	22,05						

Iz tabele 2 je razvidno, da se masa etalona po temperaturnem popuščanju nekoliko zmanjša. Razlog za to je razpad in izparevanje določenih komponent pri izpostavljenosti visokim temperaturam. S tem se zmanjša obstojnost zrn v brusni plošči, kar vpliva na njeno življenjsko dobo. Iz tega razloga smo k drugi verziji etalonov dodali zaviralec gorenja, ki bi zmanjšal oziroma upočasnil ta razpad.

Vzorcu številka 2, ki je bil izpostavljen temperaturnemu popuščanju 20 minut, se je masa zmanjšala za 3,3 %. Vzorcu številka 3, ki je bil temperaturnemu popuščanju izpostavljen 40 minut, pa se je masa zmanjšala za 4,7 %. Iz tega lahko ugotovimo, da sta masa etalona in čas izpostavljenosti nista premo sorazmerna.



Slika 24: Mikroskopski prikaz brusne plasti (brez zaviralca gorenja) po 20 minutnem popuščanju



Slika 25: Mikroskopski prikaz brusne plasti (brez zaviralca gorenja) po 40 minutnem popuščanju

Iz slike 24 in 25 je razvidno, da je pri 40 minutnem popuščanju etalonov brez dodatka zaviralca gorenja prišlo do večjega razpada smole, saj so že izrazito vidna steklena vlakna. Prav tako je razvidno, da so zrna pri daljšem času popuščanja manj oblita s smolo, kar še dodatno nakazuje na razpad veziva oziroma smole.

Tabela 3: Meritve etalonov z zaviralcem gorenja

št. vzorca	D (mm)	T (mm)	H(mm)	masa (g)	masa (g) po term. popuščanju	R odčitek	D2 (g/mL)	E-modul (GPa)	razlet (o/min)
1	184,32	9,92	22,08	805,5	778,44 (20 min)	1606	3.068	52,44	3800
	184,35	10,0	22,04						
		9,97							
		10							
	184,33	9,98	22,06						
2	184,31	10,65	22,17	802,0	neuravnotežen kos				
	184,28	10,3	22,11						
		9,48							
		9,83							
	184,29	10,1	22,14						
3	184,32	9,98	22,11	808,0	763,41 (40 min)	1613	3.078	52,16	3735
	184,35	9,95	22,13						
		9,97							
		10,03							
	184,33	9,98	22,12						
4	184,31	9,94	22,14	810,0	810,0 (0 min)	1601	3.092	53,39	13515
	184,36	9,98	22,08						
		9,93							
		9,98							
	184,33	9,96	22,11						

Podobne rezultate sem dobila tudi pri etalonih z dodatkom zaviralca gorenja. Vzorcju številka 1, ki je bil izpostavljen temperaturnemu popuščanju 20 minut, se je masa zmanjšala za 3,4 %. Vzorcju številka 3, ki je bil izpostavljen temperaturnemu popuščanju 40 minut, pa se je masa zmanjšala za 5,8 %. Enako kot pri tabeli številka 1 sta masa etalona in čas temperaturnega popuščanja premo sorazmerna.

Glede na lastnosti zaviralca gorenja sem pričakovala, da se bo sprememba mase manjšala, vendar so rezultati pokazali drugače.



Slika 26: Mikroskopski prikaz brusne plasti (z zaviralcem gorenja) po 20 minutnem popuščanju



Slika 27: Mikroskopski prikaz brusne plasti (z zaviralcem gorenja) po 40 minutnem popuščanju

Iz slike 26 in 27 je razvidno, da je zaviralec gorenja pozitivno vplival na razpadanje smole med procesom popuščanja. V primerjavi z etaloni brez zaviralca gorenja so v tem primeru zrna ostala bolj oblita s smolo in tudi steklena vlakna so veliko manj vidna.

b) Temperaturno popuščanje na 550 °C 5 minut, 10 minut in 0 minut

Pri drugi varianti smo se odločili obdržati isto temperaturo, vendar skrajšati čas segrevanja – 0 minut, 5 minut in 10 minut. Za skrajšanje časa smo se odločili, ker so etaloni veliko manjši in tanjši v primerjavi z industrijskimi brusnimi ploščami. Le-te se zaradi svoje debeline ne segrejejo tako močno, kot so se etaloni, kar je povzročilo razpad smolne vezi in posledično prehiter razlet etalonov med razletnim testom.

Tabela 4: Meritve etalonov brez zaviralca gorenja

št. vzorc a	D (mm)	T (mm)	H (mm)	masa (g)	masa (g) po term. popuščanju	R odčitek	D2 (g/mL)	E- modul (GPa)	razlet (o/min)
1	184,4	9,99	22,03	817	810,5 (5 min)	1503	3.108	60,56	11400
	184,3	9,98							
		10,0							
		9,99							
	184,4	9,99	22,03						
2	184,4	10,0	21,97	816	816 (0 min)	1493	3.103	61,30	15100
	184,4	9,98							
		10,0							
		9,97							
	184,4	9,99	21,97						
3	184,4	9,97	21,87	817,5	817,5 (10 min)	1463	3.104	63,75	14200
	184,4	9,89							
		10,0							
		10,01							
	184,4	10,0	21,87						
4	184,4	10,06	22,06	817,5	neuravnotežen kos				
	184,4	9,96							
		9,95							
		10,0							
	184,4	10,0	22,06						

Iz tabele 3 je razvidno, da se je masa etalona brez dodanega zaviralca gorenja, ki je bil izpostavljen temperaturnemu popuščanju 5 minut, znižala za 0,8 %. Masa drugega etalona, ki je bil izpostavljen temperaturnemu popuščanju 10 minut, pa se je masa zmanjšala za 1,4 %. Glede na rezultate lahko rečem, da sta tudi v tem primeru masa etalona in čas izpostavljenosti temperaturi 550 °C premo sorazmerna. Prav tako rezultati prikazujejo manjšo spremembo mase pri krajši izpostavljenosti.

Tabela 5: Meritve etalonov z zaviralcem gorenja

št. vzorca	D (mm)	T (mm)	H (mm)	masa (g)	masa (g) po term. popuščanju	R odčitek	D2 (g/mL)	E-modul (GPa)	razlet (o/min)
1	184,50	10,03	22,18	818	neuravnovežen kos				
	184,47	10,03							
		10,09							
		10,08							
	184,49	10,06	22,18						
2	184,47	10,04	21,92	817,0	813,2 (10 min)	1500,0	3,087	59,96	11600
	184,52	10,08							
		10,03							
		10,02							
	184,50	10,04	21,92						
3	184,49	10,08	22,06	814,5	809,2 (5 min)	1532	3,071	56,81	10700
	184,43	10,02							
		10,09							
		10,09							
	184,46	10,07	22,06						
4	184,48	10,04	22,17	817,0	817 (0 min)	1506	3,092	59,72	16100
	184,49	10,03							
		10,02							
		10,04							
	184,49	10,03	22,17						

4.1.2 Razletna analiza

Za razletno analizo sem se odločila, ker so tudi vse vroče stiskane brusne plošče pred odpremo preizkušene na povišano obodno hitrost. Le-ta je definirana po standardu SIST EN 12413. Stroj s katerim je bila analiza izvedena je viden je sliki 30.

a) Etaloni brez zaviralca gorenja po 20 ali 40 minutnem temperaturnem popuščanju iz tabele 1 je razvidno, da sta etalona izpostavljeni povečani temperaturi zdržala veliko manj obratov/minuto kot etalon, ki ni bil temperaturno popuščan. Le-ta je imel razlet pri 15.915 obratih/minuto. Etalon z 20 minutno izpostavljenostjo je zdržal 3.515 obratov/minuto, etalon s 40 minutno izpostavljenostjo pa 4.350 obratov/minuto. Predvidevala sem sicer, da bosta čas izpostavljenosti in točka razleta obratno sorazmerna, vendar so rezultati pokazali nasprotno. Etalon z daljšo izpostavljenostjo je zdržal višji razlet, kar je kontradiktorno.

b) Etaloni z zaviralcem gorenja po 20 ali 40 minutnem temperaturnem popuščanju Prav tako kot pri tabeli 1 je tudi iz tabele 2 razvidno, da sta etalona z zaviralcem gorenja, ki sta bila izpostavljeni povišani temperaturi, zdržala manj obratov/minuto kot etalon, ki ni bil temperaturno popuščan. Le-ta je imel razlet pri 13.515 obratih/minuto. Etalon z 20 minutno izpostavljenostjo je zdržal 3.800 obratov, etalon s 40 minutno izpostavljenostjo pa 3.735 obratov. V tem primeru je bil rezultat razleta ne glede na čas temperaturnega popuščanja zelo podoben, kar nakazuje na določen pozitiven vpliv dodatka zaviralca gorenja. Razleten kos je prikazan na sliki 28.

c) Etaloni brez zaviralca gorenja po 5 ali 10 minutnem temperaturnem popuščanju Iz tabele 3 je razvidno, da se točke razleta med vsemi tremi etaloni več ne razlikujejo tako drastično, kot so se v prvih dveh primerih. Etalon brez izpostavljenosti povišani temperaturi se je razletel pri 15.100 obratih/minuto, etalon s 5 minutno izpostavljenostjo pri 11.400 obratih/minuto in etalon z 10 minutno izpostavljenostjo pri 14.200 obratih/minuto. Enako kot pri ostalih dveh primerih se je tudi v tem primeru etalon s krajšo izpostavljenostjo povišani temperaturi razletel hitreje, kar je kontradiktorno. Razleten kos je prikazan na sliki 29.

d) Etaloni z zaviralcem gorenja po 5 ali 10 minutnem temperaturnem popuščanju Tudi v tem primeru je rezultat podoben ostalim trem primerom. Najvišji razlet je zdržal etalon brez izpostavljenosti temperaturnemu popuščanju, in sicer 16.100 obratov/minuto. Etalon, izpostavljen 5 minut, je imel razlet pri 10.700 obratih/minuto, etalon, izpostavljen 10 minut, pa pri 11.600 obratih/minuto.



Slika 28: Razlet etalona z dodatkom zaviralca gorenja



Slika 29: Razlet etalona brez zaviralca gorenja



Slika 30: Stroj za preizkus brusne plošče na povečano obodno hitrost

4.1.3 Industrijsko brušenje z robotom

Brušenje z etaloni je, enako kot razletni testi, potekalo v testirnici poslovne enote Weiler d.o.o. Zreče na stroju znamke Maritini, ki ima moč 3000 W. Za brušenje smo izbrali inox material, ki se tudi v brusni industriji najpogosteje uporablja pri tej vrsti brusnih plošč. Brušenje je bilo izvedeno s 5000 obrati/minuto (RPM) in 10 % približevanjem. Vsak etalon smo dvakrat izpostavili 10 rezom, torej skupaj 20 rezom, kar je na koncu trajalo 660 sekund. Pred začetkom brušenja in po končanem ciklu smo izmerili maso etalona in obdelovanca ter izračunali G-faktor. Le-ta nam pove razmerje med odbrusom in porabo brusne plošče. Cilj je pridobiti čim višji odbrus obdelovanca s čim manjšo porabo brusne plošče. Odbrus obdelovanca sem izmerila tako, da sem ga stehala pred brušenjem in po njem ter v tabelo zapisala razliko – odbrusek. Tudi porabo etalona sem izmerila na enak način – kot razliko mase pred brušenjem in po njem [12].

Tabela 6: Meritve brušenja etalonov

dimenzija	kvaliteta	masa [g]	odbrusek [g]	poraba [g]	G-faktor	št. rezov	čas reza [s]	material
180x10x22,23	standard	806,9	240,3	5,8	41,43	10	330	inox
			240,3	4,2	57,21	10	330	inox
skupaj			480,6	10	48,06	20	660	
180x10x22,23	z zaviral. gorenja	805,5	240,3	6,1	39,39	10	330	
			240,3	2,9	82,86	10	330	
skupaj			480,6	9	53,4	20	660	

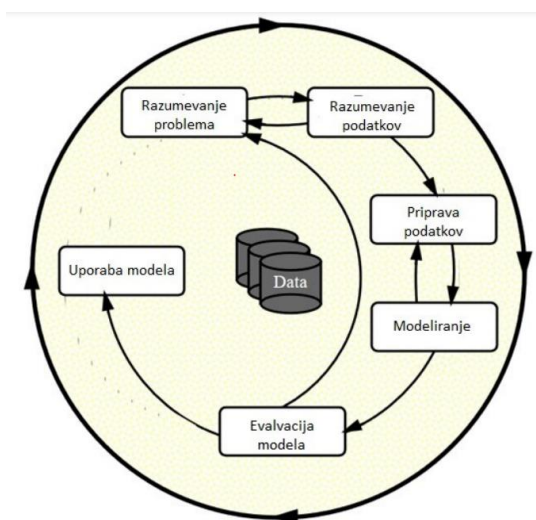
Iz tabele 5 je razvidno, da je etalon, ki smo mu dodali zaviralec gorenja, dosegel višji G-faktor. Oba etalona sta odbrusila enako količino materiala, vendar se je etalon z dodanim zaviralcem gorenja manj porabil, kar potrjuje pozitiven vpliv tega dodatka na obstojnost brusne plošče. Enako kot pri industrijskem brušenju so se tudi pri brušenju v testirnici pojavile dovolj visoke temperature, da je prišlo do razpada smole. Zaviralec gorenja je zmanjšal oziroma upočasn timer razpad smole in s tem povečal obstojnost etalona. Iz tega razloga je bila tudi poraba manjša [12].

4.2 Definiranje razvojnega sistema

S končanimi analizami in testiranjem na etalonih sem prišla do korakov izvedbe razvojnega sistema, ki bo podjetju Weiler d.o.o. v prihodnosti pomagal pri hitrejšem razvijanju in preizkušanju novih izdelkov. V preteklosti je razvoj novih izdelkov potekal na način, da smo izdelali industrijsko brusno ploščo in le-to preizkusili pri enem izmed kupcev. Tak način je s seboj prinesel kar nekaj slabosti v primerjavi s testiranjem v podjetju, in sicer [13]:

- Izdelava brusne plošče traja dlje časa kot izdelava etalonov.
- Izdelava brusne plošče je za podjetje dražja kot izdelava etalonov.
- Termin testiranja je bil prilagojen kupcu, kar je lahko včasih pomenilo tudi nekaj mesecev čakanja.
- Prisotnost pri testiranju pri kupcu ni vedno možna, zato so tudi rezultati lahko okrnjeni.

Z vpeljavo razvojnega sistema bomo lahko hitreje prišli do želenih rezultatov in testirali več različnih variant etalonov v enem sklopu. Po končanem razvoju v podjetju pa se bo najboljša varianta testirala še pri kupcu na industrijskem testu [14].



Slika 31: Shematski prikaz delovanja zaokroženega sistema [14]

Temeljni gradnik vsakega podjetja je njegov izdelek ali storitev, katerega je potrebno neprestano izboljševati in nadgrajevati, če želimo ostati konkurenčni na tržišču. Dobro definiran in izpopolnjen razvojni sistem pripomore k hitrejšemu in učinkovitejšemu razvoju izdelkov [15].

5 SKLEP

Glede na dobljene rezultate pri več različnih metodah testiranja etalonov vroče stiskanih brusnih plošč je naš zaključni sklep, da smo z dodatkom zaviralca gorenja v brusni plošči naredili korak naprej v razvoju, vendar rezultati niso pokazali pričakovanega učinka oziroma je le-ta veliko manjši. V času izvajanja testiranj in pregledovanja rezultatov smo prišli do sklepa, da bo za željen končni izid potrebnih še več testiranj in raziskovanja na področju delovanja zaviralcev gorenja. Eden izmed ključnih nadaljnjih korakov je izdelava etalonov s premerom 300 mm, ki jih bomo lahko vpeli na ustrežnejši brusilni stroj in bodo tako tudi rezultati veliko bolj verodostojni. Naše delo v tej magistrski nalogi je bil prvi poskus dodajanja zaviralca gorenja v vroče stiskane brusne plošče z namenom povečanja obstojnosti plošče pri brušenju in podaljšanja življenjske dobe. V naslednjih korakih je naš namen testirati še druge tipe zaviralcev gorenja in poiskati najbolj učinkovitega ter le-tega na koncu vpeljati v redno proizvodnjo industrijskih brusnih plošč. Lahko pa z gotovostjo rečemo, da smo na pravi poti in verjamemo, da nam bo uspelo najti najustreznejšo različico, ki bo Weilerjeve vroče stiskane brusne plošče povzpela na višji nivo.

Pri definiranju razvojnega sistema pa je z magistrsko nalogo bil narejen korak naprej in bomo tak sistem uporabljali tudi v prihodnje pri iskanju in preizkušanju drugih dodatkov, ki bi lahko pozitivno vplivali na delovanje vseh vrst brusnih plošč. Glavni cilj pri tem je bil definirati korake in voditi ustrezno evidenco rezultatov ter jih sistematično beležiti, saj lahko le na tak način najdemo pomanjkljivosti in prednosti ter iščemo izboljšane verzije za najboljši možni končni izid.

V industriji brusnih plošč je ključnega pomena konstantno iskanje izboljšav in implementiranje le-teh v izdelke. Le na tak način si je možno zagotoviti konkurenčno prednost in biti vodilen na tržišču. Z definiranjem razvojnega sistema smo si omogočili hitrejšo pridobitev rezultatov delovanja potencialne nove komponente in tudi hitrejšo zmožnost korigiranja v primeru nezadovoljivih rezultatov.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Jackson, M. in Hitchiner, M. (2013). High performance grinding and advanced cutting tools. New york: Springer Heidelberg Dordrecht.
- [2] Kokošar, G. in Svetina, G. (2010). Priročnik za operaterje brusilnega stroja. Jesenice: izdelano za podjetje Acroni d.o.o.
- [3] Badger A. J. (2001). Ask the grinding doc. Švedska: Cutting tool engineering.
- [4] Jackson M. J., Davim J. P. (2011). Machining with Abrasives. London: Springer.
- [5] Marinescu I., Hitchiner M., Uhlmann E., Rowe B. in Inasaki I. (2007). Handbook of Machining with Grinding
- [6] Snovi, postopki in gradiva za spoznavanje brušenja. (2005). Maribor: izdelano za podjetje Comet d.d.
- [7] Pilato, L. (2010). Phenolic Resins: A century of Progress. New york: Springer.
- [8] Abrasives 101. (2019). Maribor: izdelano za podjetje Weiler d.o.o.
- [9] Wikipedia, the free encyclopedia. (2022). Flame retardant. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Flame_retardant
- [10] Flame Retardants. (2016). National Institute of Environmental Health Sciences. Dostopno na: https://www.niehs.nih.gov/health/materials/flame_retardants_508.pdf
- [11] A begginers Guide Thermogravimetric Analysis. (2015). USA: PerkinElmer.
- [12] Linke B., (2016). Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools. Švica: Springer Nature.
- [13] Peter Z. (2001). Razvojni sistem: diplomska naloga. Ljubljana.
- [14] Nejc Č. (2023). Razvoj sistema za preopznavanje obrazov. Maribor.
- [15] Kljajić Boštnar, M. (2001). Modeliranje strojno učenje – Machine Learning.

SEZNAM SLIK

Slika 1: primer brušenja z vroče stiskano brusno ploščo	5
Slika 2: Pravilno sestavljen par brusnih plošč	6
Slika 3: nadzorna plošča brusilnega stroja Danieli	7
Slika 4: primer razletene brusne plošč	9
Slika 5: Proces proizvodnje slaba [17]	11
Slika 6: Shematski prikaz nastanka oksidne skorje [16].	12
Slika 7: Shematski prikaz reakcije oksidacije z zrakom in vodo [16]	12
Slika 8: Vrstni red faz na jeklenem slabu [16]	13
Slika 9: Vzдолžna razpoka na nebrušenem slabu [4]	14
Slika 10: Vzдолžna razpoka na brušenem slabu [4]	14
Slika 11: Vzдолžno prerezan slab z lunkerjem [4]	15
Slika 12: Ostanki livarskega praška in gnezda titanovih oksidov [4]	15
Slika 13: Mrežasta razpoka [4]	16
Slika 14: ploskovno brušenje [2]	19
Slika 15: Shematski prikaz prereza vroče stisnjene brusne plošče [2]	22
Slika 16: vroče stiskana brusna plošča [2]	22
Slika 17: Makrostruktura cirkonskega korunda [2]	24
Slika 18: Mikrostruktura cirkonskega oksida [2]	24
Slika 19: Struktura abrazivnega orodja [2]	26
Slika 20: pirit v prahu	27
Slika 21: Wollastonite v prahu	28
Slika 22: Peč za temperaturno popuščanje etalonov (notranjost)	37
Slika 23: Peč za temperaturno popuščanje etalonov (zunanost)	38
Slika 24: Mikroskopski prikaz brusne plasti (brez zaviralca gorenja) po 20 minutnem popuščanju	40
Slika 25: Mikroskopski prikaz brusne plasti (brez zaviralca gorenja) po 40 minutnem popuščanju	40
Slika 26: Mikroskopski prikaz brusne plasti (z zaviralcem gorenja) po 20 minutnem popuščanju	42
Slika 27: Mikroskopski prikaz brusne plasti (z zaviralcem gorenja) po 40 minutnem popuščanju	42
Slika 28: Razlet etalona z dodatkom zaviralca gorenja	46
Slika 29: Razlet etalona brez zaviralca gorenja	46
Slika 30: stroj za preizkus brusne plošče na povečano obodno hitrost	47

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Rezultati TGA analize.	33
Tabela 2: Meritve etalonov brez dodatka zaviralca gorenja	39
Tabela 3: Meritve etalonov z zaviralcem gorenja	41
Tabela 4: Meritve etalonov brez zaviralca gorenja	43
Tabela 5: Meritve etalonov z zaviralcem gorenja	44
Tabela 6: Meritve brušenja etalonov	48

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

FTPO - Fakulteta za tehnologijo polimerov