

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Analiza procesa vrtnja stekla BK7

Zaključna naloga Razvojno raziskovalnega programa I. stopnje Strojništvo

Primož Turk

Ljubljana, september 2019

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Analiza procesa vrтанja stekla BK7

Zaključna naloga Razvojno raziskovalnega programa I. stopnje Strojništvo

Primož Turk

Mentor: izr. prof. dr. Franci Pušavec

Ljubljana, september 2019

VLOGA ZA PREVZEM TEME ZAKLJUČNE NALOGE

Univerzitetni študijski program I. stopnje STROJNIŠTVO – Razvojno raziskovalni program

Št. zaključne naloge (izpolni Študentski referat): UNI/1203

Datum prejema vloge v ŠR: 5.8.2019

Podatki o študentu:

Ime in priimek: Primož Turk Vpisna št. 23160278

Datum, kraj rojstva: 10.5.1997, Novo mesto

Podatki o zaključni nalogi:

Naslov zaključne naloge (slovenski):

Analiza procesa vrtanja stekla BK7

Naslov zaključne naloge (angleški):

Analysis of the BK7 drilling process

Mentor na FS: izr. prof. dr. Franci Pušavec

Somentor na FS: _____

Veljavnost naslova teme je 6 mesecev od oddaje Vloge za prevzem.

Podpis študenta: Primož

Podpis mentorja: 

Zahvala

Zahvaljujem se svojemu mentorju izr. Prof. dr. Franci Pušavcu za vodenje pri izdelavi te zaključne naloge. Hvala tudi zaposlenim v laboratoriju LABOD za pomoč pri opravljanju praktičnega dela. Mojim kolegom sošolcem hvala za podporo in medsebojno pomoč skozi izobraževalni proces. Posebna zahvala mojima staršema, ki sta mi omogočila študij z materialno in moralno podporo ter mojima sestrama za zgled in nesebično pomoč.

Spodaj podpisani/-a Primož Turk študent/-ka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23160278, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Analiza procesa vrtnja stekla BK7,

IZJAVLJAM,

- 1.* a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programske opreme za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 5. 8. 2019

Podpis avtorja/-ice: Primož

* Obkrožite varianto a) ali b).

Analiza procesa vrtnanja stekla BK7

Primož Turk

Ključne besede: steklo
 vrtnanje
 okruški
 obdelava
 lomljenje
 izvrtine
 vpetje

Pri vrtnanju stekla je nastanek okruškov na vhodu, predvsem pa na izhodu orodja, iz obdelovanca ključen problem. Z optimiranjem obdelovalnih parametrov vrtnanja, je to krušenje možno zmanjšati na zadovoljivo majhno vrednost. Določanje optimalnih obdelovalnih parametrov tako v tej raziskavi, kot na splošno poteka eksperimentalno na osnovi poskusov, saj jih z računanjem ni mogoče določiti. Za čimprejšnje zadovoljive rezultate je pomembno dobro pregledati obstoječo literaturo in s tem pridobiti čim več znanja o obravnavani temi. Ugotovili smo parametre obdelave, pri katerih je velikost okruškov ustrezala zahtevam raziskave in da ima veliko vlogo pri krušenju ter lomu stekla tudi način vpetja obdelovanca.

Abstract

UDC 621.941:666.1(043.2)

No.: UN I/1203

Analysis of the BK7 drilling process

Primož Turk

Key words: glass
 drilling
 chips
 machining
 fracking
 holes
 holding

With glass drilling, chip appearance at the entrance and even more so at the exit of the drill determines the quality of work. It is possible to reduce chipping to the satisfying level with the optimization of the machining parameters. Due to inability of arithmetic determination, choosing the optimal machining parameters is in this research and in general an experimental process based on tests. It is important to research existing literature about the discussed theme in order to get the satisfying experimental results as soon as possible. We chose the machining parameters at which the chipping meets the research requirements and found, that holding the workpiece plays a big role in chipping and fracking of the glass.

Kazalo

1	Uvod.....	1
1.1	Ozadje problema	1
1.2	Cilji.....	1
2	Teoretične osnove in pregled literature	2
2.1	Zgradba stekel	2
2.2	Lastnosti stekel.....	4
2.2.1	Mehanske lastnosti.....	4
2.2.2	Viskoznost	4
2.2.3	Termične lastnosti.....	5
2.2.4	Optične lastnosti	5
2.2.5	Električne lastnosti.....	5
2.3	Vrste stekel	6
2.3.1	Silicijevo	6
2.3.2	Soda - apno	6
2.3.3	Svinčevo ali kristalno	6
2.3.4	Borosilikatno.....	7
2.3.5	Aluminosilikatno	7
2.3.6	Obarvano.....	7
2.3.7	Optično	7
2.4	Obdelovanje stekla	8
2.4.1	Brušenje	8
2.4.2	Vrtanje	9
2.4.2.1	Klasično	9
2.4.2.2	USM in RUM	9
2.4.3	Kakovost obdelave.....	11
3	Metodologija raziskave.....	13
3.1	Določanje parametrov vrtanja	13
3.2	Eksperimentalni del.....	14
3.2.1	Vzorci in materiali	14
3.2.1.1	Steklo BK7.....	14
3.2.2	Metodologija preizkusov	14

3.2.2.1	Preizkuševališče vrtanja.....	14
3.2.3	Mikroskop.....	17
4	Rezultati	18
4.1	Vzorec 1	18
4.2	Vzorec 2	20
4.3	Vzorec 3	22
5	Diskusija.....	25
6	Zaključki	26
	Literatura.....	27

Kazalo slik

Slika 2-1: Shematski 2D prikaz strukture kristala [1]	2
Slika 2-2: Shematski 2D prikaz strukture stekla [1].....	3
Slika 2-3: Shematski 2D prikaz strukture soda silikatnega stekla [1]	3
Slika 2-4: Orodje za klasično vrtnanje stekla [4]	9
Slika 2-5: Shema USM [6].....	10
Slika 2-6: Shema RUM [9].....	11
Slika 3-1: Preizkuševališče.....	15
Slika 3-2: Priključek za dovod hladilnega sredstva.....	16
Slika 3-3: (a) Spodnji del vpetja. (b) Zgornji del vpetja montiran na spodnjem.....	16
Slika 3-4: (a) Sveder premera 8 mm. (b) Konica svedra s prevleko diamantnih abrazivov.....	17
Slika 3-5: Laboratorijska oprema KEYENCE VHX 6000.....	17
Slika 4-1: Vzorec 1, vhod 1, 30x povečava.....	18
Slika 4-2: Vzorec 1, vhod 1, 100x povečava.....	19
Slika 4-3: Vzorec 1, vhod 2, 30x povečava.....	19
Slika 4-4: Vzorec 1, vhod 2, 100x povečava.....	20
Slika 4-5: Vzorec 2, vhod 1, 30x povečava.....	20
Slika 4-6: Vzorec 2, vhod 1, 100x povečava.....	21
Slika 4-7: Vzorec 2, vhod 2, 30x povečava.....	21
Slika 4-8: Vzorec 2, vhod 2, 100x povečava.....	22
Slika 4-9: Vzorec 3, vhod 1, 30x povečava.....	22
Slika 4-10: Vzorec 3, vhod 1, 100x povečava.....	23
Slika 4-11: Vzorec 3, vhod 2, 30x povečava.....	23
Slika 4-12: Vzorec 3, vhod 2, 100x povečava.....	24

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
f	mm min^{-1}	podajanje
v	m min^{-1}	hitrost
n	vrt min^{-1}	vrtilna hitrost
d	mm	premer

Indeksi

c rezalna

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
USM	Ultrasonic machining – ultrasonično obdelovanje
RUM	Rotary ultrasonic machining – rotirajoče ultrasonično obdelovanje

1 Uvod

1.1 Ozadje problema

Steklo je dandanes človeku nepogrešljiv material. Kamorkoli se ozremo, lahko vidimo izdelek iz stekla. Seveda je potrebno te izdelke primerno obdelati, da zadostujejo svojim potrebam, zato poznamo veliko različnih načinov obdelav.

Kot vsi krhki in trdi materiali, je tudi steklo zahtevno za obdelavo. Le ta se v širši industriji na steklih izvaja za farmacevtske, kemijske, optične in mnoge druge namene. Zaradi vse večjih tehnoloških zahtev izdelkov, pa raziskovalci ves čas iščejo izboljšave, ki jih je v smislu ekonomičnosti in kvalitete moč najti v izumljanju novih mehanizmov ali pa tudi v iskanju idealnih parametrov obstoječih obdelav.

Ker različna področja uporabe zahtevajo različne vrste stekel, ki imajo različne lastnosti, pa je iskanje idealnih parametrov obstoječih mehanizmov obdelav pogosta tema raziskav. Pri neprilagojenih parametrih obdelave namreč lahko pride do nekvalitetnega izdelka in nepotrebnih poškodb izdelka ter prevelike obrabe orodja in predolgega časa obdelovanja.

1.2 Cilji

Cilji te zaključne naloge so pridobitev teoretičnih osnov znanja o steklu, njegovi pridelavi, značilnosti in lastnosti, proizvodnja o obdelovanju stekla in tehnologijah vrtanja v steklo ter predstavitev problema krušenja in loma stekla pri vrtanju. Na praktičnem delu sledi še določitev obdelovalnih parametrov vrtanja za zadovoljive rezultate in analiza okruškov na vrtanih vzorcih optičnega stekla tipa BK7.

2 Teoretične osnove in pregled literature

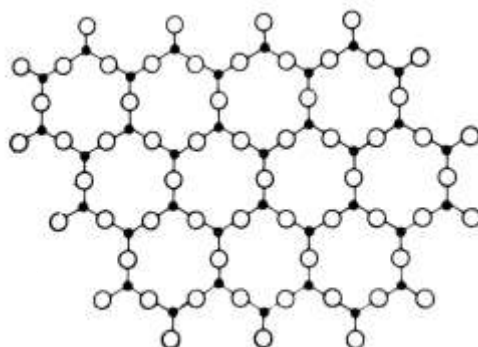
Stekla so amorfne trdnine, ki so pogosto prozorne, lahko pa tudi barvne. Njihove značilnosti so visoka trdnost in temperaturna obstojnost, krhkost, visoko tališče, negorljivost in v večini primerov netopnost z vodo ter drugimi organskimi topili.

Značilnosti stekel so lahko ob različnih strukturah zelo različne, kar jih naredi uporabne na več različnih praktičnih vsakdanjih, tehnoloških in dekorativnih področjih.

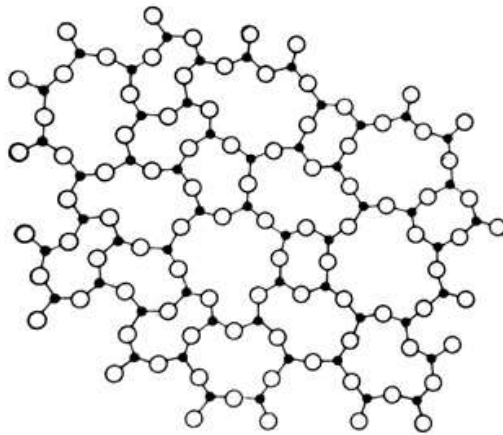
Tehnična definicija stekla bi bila » anorganski produkt fuzije, ki je bila ohlajena v trdo obliko brez kristalizacije«. Ta definicija poudarja, da je steklo nekristalizirano, to je, amorfno, torej je njegovo stanje podobno tekočemu stanju, a še vedno trdo, kot kristalizirane trdnine [1].

2.1 Zgradba stekel

Steklo je v osnovi narejeno iz kremenovega peska SiO_2 , katerega komponenti sta silicij in kisik. Ko kristalizirani kvarc segrejemo na tudi do več kot $2000^{\circ}C$ in hitro ohladimo, postane njegova struktura amorfna, nekristalizirana.



Slika 2-1: Shematski 2D prikaz strukture kristala [1]

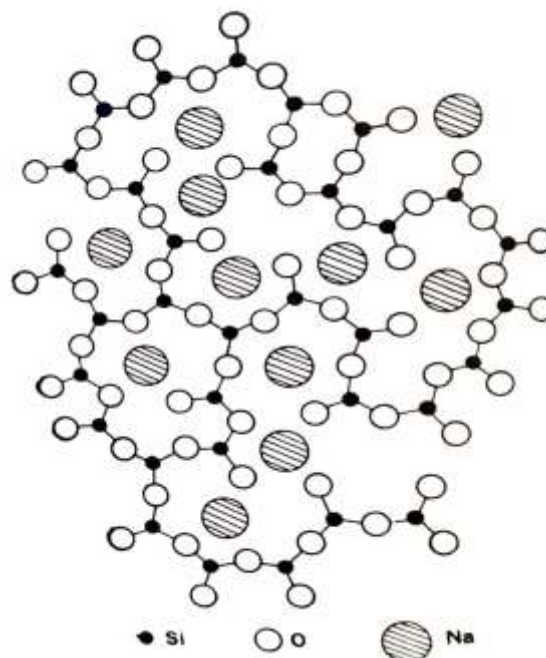


Slika 2-2: Shematski 2D prikaz strukture stekla [1]

Samo nekaj kemičnih sestavin je zmožnih samostojno formirati steklo. Od oksidov, so predstavniki le teh silicijev oksid SiO_2 , borov oksid B_2O_3 , in fosforjev oksid P_2O_5 . Ostali oksidi prisotni v steklu, kot so Na_2O , K_2O , CaO , MgO itd., so obravnavani kot modifikatorji.

Z dodajanjem modifikatorjev, lahko znižamo temperaturo tališča peska, a vplivamo tudi na ostale lastnosti stekla.

Na sliki 2.3 je primer modifikatorja natrija.



Slika 2-3: Shematski 2D prikaz strukture soda silikatnega stekla [1]

Modifikator v pesku prekine vezi med silicijem in kisikom ter se veže s kisikom. Steklo je tako mešanica več oksidov in količina posameznega oksida je lahko poljubna, a v določenih mejah. Če so te meje presežene, postane formacija stekla težka oz. nemogoča [1].

2.2 Lastnosti stekel

Tako kot vsak material, ima določene lastnosti tudi steklo. Te so zaradi že prej omenjene raznolikosti strukture stekla, lahko zelo različne. Pri različnih aplikacijah uporabe stekla, so pomembne različne lastnosti, ki jih ugotavljamo s testi.

2.2.1 Mehanske lastnosti

Steklo ima lastnosti kot kristalizirane trdnine. Ima elastične lastnosti in trdnost, da se vrne v prvotno obliko, po prenehanju delovanja obremenitev, ki ga deformirajo. Nima pa polja plastičnosti, ki je značilno za kovine, in s tem tudi ne meje elastičnosti. Razpoka se pojavi pred nastankom trajne deformacije telesa in z razpoko tudi porušitev telesa, ki je ponavadi lom v školjkasti obliki.

Pomembna lastnost stekla je tudi trdota, ki pomeni odpornost proti penetraciji drugega telesa in abraziji. Pri steklih izvajamo teste trdote kot so [1]:

- test trdote razenja
- test trdote brušenja in abrazije
- test trdote penetracije

2.2.2 Viskoznost

Je naslednja pomembna lastnost. Z vidika pridelave stekla, viskoznost neposredno vpliva na pogoje taljenja in ostale izdelovalne operacije. Povezana je tudi s primerno temperaturo termične obdelave in maksimalno temperaturo obdelovanja. Nekatere izdelovalne operacije zahtevajo viskoznost stekla v določenem razponu.

Viskoznost stekla konstantno pada z ohlajevanjem taline v hiperbolični obliki krivulje, najprej hitreje, nato počasneje.

Med ohlajevanjem ali segrevanjem, steklo prehaja skozi več stanj, sprememb. Pri segrevanju nad temperaturo 300°C, ta je odvisna od vrste stekla, najprej pride do točke popuščanja, pri kateri se notranje napetosti nekaj ur popuščajo do nizke vrednosti.

Pri malo višji temperaturi sledi točka hitrega popuščanja, pri kateri notranje napetosti v 15 minutah popustijo do zadovoljive vrednosti za komercialno steklo.

Pri visokih temperaturah, nad 600°C, nastopi točka mehčanja, ko se steklo začne ukrivljati pod lastno težo [1].

2.2.3 Termične lastnosti

Poznamo veliko termičnih lastnosti, pri steklih pa se podrobneje ukvarjamo s specifično toploto, toplotno prevodnostjo in temperaturno razteznostjo.

Specifična toplota pri steklih narašča s temperaturo in se s približevanjem absolutni temperaturni ničli, zmanjšuje proti 0.

Karakteristika toplotne prevodnosti stekel se zelo razlikuje od tiste v kristaličnih materialih. Pri slednjih se z nižanjem temperature več, dokler niso dosežene nizke temperature. Pri steklih pa se z nižanjem temperature niža tudi toplotna prevodnost in doseže zelo nizke vrednosti ko se temperatura spusti blizu absolutni ničli.

Temperaturna razteznost predstavlja pomembno lastnost za več vrst uporabe steklenih izdelkov. Ko sta na primer dva stekla ali steklo in kovina spojena skupaj, je razlika med njunima temperaturnima razteznostnima koeficientoma glavni faktor pri določanju temperaturnega razpona uporabe izdelka.

Osnovno silicijevo steklo ima zelo nizek temperaturni razteznostni koeficient, okoli $5.5 \times 10^{-7} K^{-1}$, z dodajanjem oksidov se ta lahko zviša na več kot 20-kratno vrednost in s tem približa vrednosti kovin [1].

2.2.4 Optične lastnosti

Optična stekla predstavljajo velik delež uporabe stekla in imajo veliko lastnosti. Odboj, lom, absorpcija in transmisivnost svetlobe so vse pomembne lastnosti optičnih stekel.

Odboj svetlobe od polirane steklene površine je relativno majhen, odvisen je od odbojnega indeksa stekla in kota pod katerim svetloba vpada na površino.

Ko svetloba preide iz zraka na steklo, se njena hitrost zmanjša. Razmerje med hitrostjo svetlobe v zraku in steklu imenujemo lomni količnik. Ta znaša za silikatna stekla okoli 1.5 ali tudi do 2.0 za stekla z visoko gostoto [1].

2.2.5 Električne lastnosti

Steklo je široko uporabljeno v električni industriji, nasploh v lučeh in elektroniki. V tem področju uporabe so pomembne tako električne lastnosti, kot tudi zmožnost delovanja stekla na visoki temperaturi, spajanje z drugimi materiali in prepustnost svetlobe.

Električna prevodnost stekla močno narašča z višanjem temperature in z dodajanjem pravih modifikatorjev v steklo. Na primer pri navadnem silicijevem steklu, lahko električno prevodnost zvišamo z dodajanjem sode Na_2O ali kalcija Ca .

Steklo se pogosto uporablja tudi kot dielektrik, saj ima v pravilni sestavi nizke dielektrične izgube [1].

2.3 Vrste stekel

Uporaba stekel je široka, zahteve lastnosti le teh na posameznih področjih pa zelo različne. Zato poznamo več vrst stekel, ki te zahteve izpolnjujejo. Najpomembnejši faktor, ki določa lastnosti stekla, je izbira materiala, iz katerega ga pridelujemo. Malo manj pomembni faktorji pa so načini postopkov izdelave in obdelave, kot so [1]:

- hitrost segrevanja in ohlajanja
- popuščanje napetosti, odvisno od temperature in časa popuščanja
- oblikovanje
- itd.

2.3.1 Silicijevo

Narejeno je s taljenjem čistega kremenčevega peska, brez drugih sestavin. Silicij je težko taliti, saj ima visoko temperaturo tališča in je utekočinjen zelo viskozen, kar povzroči težko izločanje zračnih mehurčkov, ki nastajajo pri taljenju.

V širši uporabi čistega silicijevega stekla ne najdemo, saj ga zahtevnost pridelave in težavnost oblikovanja zaradi hitrega strjevanja naredi zelo dragega. Zato je njegova uporaba omejena na aplikacije s posebnimi zahtevami, kot so delovanje na visoki temperaturi in nizek temperaturni razteznostni koeficient [1].

2.3.2 Soda - apno

Je zgodovinsko najstarejše steklo, a zaradi ekonomičnosti pridelave še danes največ uporabljeno pri običajnih uporabah stekla, kot so steklenice, kozarci, okensko steklo, žarnice itd. Ta skupina stekla, predstavlja več kot 80% svetovnega stekla.,

Poleg kremenčevega peska, soda-apno steklo vsebuje še druge sestavine. Pomembnejši izmed teh sta soda in apno. Soda, Na_2O , znatno znižuje viskoznost in s tem omogoča nižjo temperaturo tališča, a povzroča topnost stekla z vodo. Zato dodamo še apno, CaO , ki izboljša kemične lastnosti stekla. Poleg teh dveh, se dodaja tudi kalijev oksid K_2O , aluminijev oksid Al_2O_3 in ostali. Glede na željeno uporabo, se vsebnost vsake sestavine v določenih mejah lahko spreminja [1].

2.3.3 Svinčevo ali kristalno

Če v soda – apno steklu zamenjamo apno CaO s svinčevim oksidom PbO , dobimo novo vrsto stekla, ki ga imenujemo svinčevo ali kristalno steklo. Medtem ko je vsebnost apna v soda – apno steklu omejena na največ 15%, je svinčevega oksida v kristalnem steklu lahko vse do 80%, a ponavadi okoli 25%. Svinčev oksid znižuje točko mehčanja do še nižje točke kot jo ima soda – apno steklo in izboljša karakteristike, če vsebnost ni višja od 50%.

Uporaba kristalnega stekla se je začela v 17. stoletju v umetnosti, zaradi lahke obdelave in njegovega lesk, ki je rezultat visokega lomnega količnika zaradi visoke gostote. Danes so ta

stekla poleg umetnosti uporabljena še v električnih lučeh, kjer so zahtevane njihove dobre električne lastnosti [1].

2.3.4 Borosilikatno

Poleg zmožnosti samostojnega formiranja stekla, lahko borov oksid B_2O_3 služi tudi kot dodatek k silicijevemu steklu. Pri le tem ima sicer manjši vpliv na nižanje viskoznosti in višanje temperaturnega razteznostnega koeficienta kot soda, a ima boljše kemijske lastnosti, kot je manjša topnost v vodi in kislinah. Spada med težje izdelana stekla.

Uporaba borosilikatnih stekel se je razvila v prejšnjem stoletju in obsega laboratorijsko steklovino, visokotemperaturne termometre, kuhinjsko posodo, avtomobilske žaromete itd. [1].

2.3.5 Aluminosilikatno

Silicijeva stekla, ki vsebujejo 16% ali več aluminijevega oksida, manjše količine apna CaO , Magnezijevega oksida MgO in še manj borovega oksida B_2O_3 , so aluminosilikatna stekla. Ta stekla je ponavadi težje taliti in oblikovati kot borosilikatna stekla. Imajo visoko temperaturo mehčanja in relativno nizek razteznostni koeficient, kar jih naredi primerna za uporabo pri visokih temperaturah, npr. visoko temperaturni termometri, zgorevalne komore, kuhinjska posoda za neposredne kontakte z ognjem itd. [1].

2.3.6 Obarvano

Barva je dodana steklu z dodajanjem barvil h kateremukoli zgoraj naštetemu steklu. Barvila so v glavnem kovinski oksidi, npr. nikljev, kobaltov, kromov, bakrov oksid. Koncentracija dodanih barvil je majhna, od 1% do 4%, odvisno od željene obarvanosti in moči posameznega barvila. Medtem ko imajo dodana barvila zanemarljivo majhen vpliv na fizične lastnosti stekla, je včasih potrebno modificirati ali preurediti kompozicijo osnovnega stekla z namenom, da bi dobili določeno barvo [1].

2.3.7 Optično

Stekla uporabljena v lečah in drugih optičnih elementih, so različni tipi stekel naštetih zgoraj in mnoga druga stekla, razvita za doseganje posebnih zahtev optike. Tudi obarvana stekla so uporabljena v optiki in sicer kot optični filtri.

Optična stekla morajo dosegati določeno kvaliteto glede transparentnosti, reflektivnosti, disperzije in čistosti od zračnih mehurčkov.

V začetkih optike, so bila uporabljena samo kristalna stekla in soda-apno silicijeva stekla, imenovana kronska stekla. Kasneje so bile odkrite tudi druge vrste kot so borova in fosfatna stekla, ki niso vsebovale silicija.

Dobra optična stekla morajo danes poleg dobrim optičnim lastnostim zadostovati tudi odpornosti na mehanske poškodbe in biti kemično vzdržljiva [1].

2.4 Obdelovanje stekla

Poznamo več postopkov obdelave stekla. Med strojnimi je najbolj osnovna obdelava brušenje, iz katerega potem na malo drugačen način izhajajo vrtanje, freziranje in ostali samostojni ali hibridni postopki.

Vsak način obdelave ima nastavitvene parametre kot so, podajalna hitrost obdelovanca, vrtilna frekvenca orodja, globina obdelovanja, vrsta in tok hladilne tekočine, odnašanje delcev, itd.

Pri odrezovanju trdega in krhkega materiala kot je steklo, poznamo dva mehanizma odstranjevanja materiala.

Ko je globina odrezovanja oziroma podajanje materiala na orodje preveliko, se material odstranjuje z generiranjem nenadzorovano velikih odlomljenih koščkov ali okruškov. Ta način imenujemo »lomljiv« ali »krhek« način. Hitrost odrezovanja je sicer večja, a je natančnost vprašljiva.

Ko pa zmanjšamo podajanje/globino odrezovanja na dovolj majhno vrednost, se zmanjšajo tudi sile pri rezanju in preidemo v način »prožnega« odrezovanja, pri katerem se nič več ne pojavljajo nenadzorovane razpoke ter lom materiala, ampak odstranjevanje materiala poteka v enako velikih odrezkih, tako kot to poteka pri kovinah, lesu in ostalih ne krhkih materialih. Kritična globina reza je torej pomemben faktor pri odrezovanju trdih krhkih materialov [2].

Pri odrezovanju prihaja do segrevanja kontakta orodja in obdelovanca, zato je vnos hladilnega sredstva pomemben faktor pri obdelovanju. V večini primerov pa lahko hladilno sredstvo služi tudi kot odnašalec delcev, ki negativno vplivajo na rezalni učinek. Pri steklu je hladilno sredstvo ponavadi čista voda, v bolj specialnih primerih pa se v vodo dodajajo tudi dodatki [3].

2.4.1 Brušenje

Brušenje je kompleksen abrazivni obdelovalni proces uporabljen za doseganje dobre površinske kvalitete z geometrijsko nedoločeni rezalnimi robovi. Tehnologija odrezovanja stekla, še posebej brušenje, pridobiva na pomembnosti z razširitvijo vsesplošne uporabe stekla na mnogih že prej naštetih področjih.

V procesih brušenja stekla, so kot rezalno orodje uporabljene brusne plošče, največkrat izdelane iz kombinacije diamanta, silicijevega karbida in kovine ali bakra.

Diamant je najbolj primeren za orodje za obdelavo stekla. Znan je kot en najtrših materialov na svetu, ima odlične mehanske in termalne lastnosti, kot sta nizek koeficient trenja in nizek temperaturni razteznostni koeficient, visoko trdoto ter dobro odpornost proti obrabi.

Zaradi vseh teh lastnosti, je diamant najboljše uporabljeno material v visoko kakovostnih orodjih, sploh za obdelovanje trpežnih materialov, kot so steklo, keramika in kamen [3].

2.4.2 Vrtanje

2.4.2.1 Klasično

Klasično vrtanje stekla je široko uporabljen postopek obdelave. Za industrijsko uporabo, je orodje že standardno votlo in ima na rezalni površini diamantna zrna.

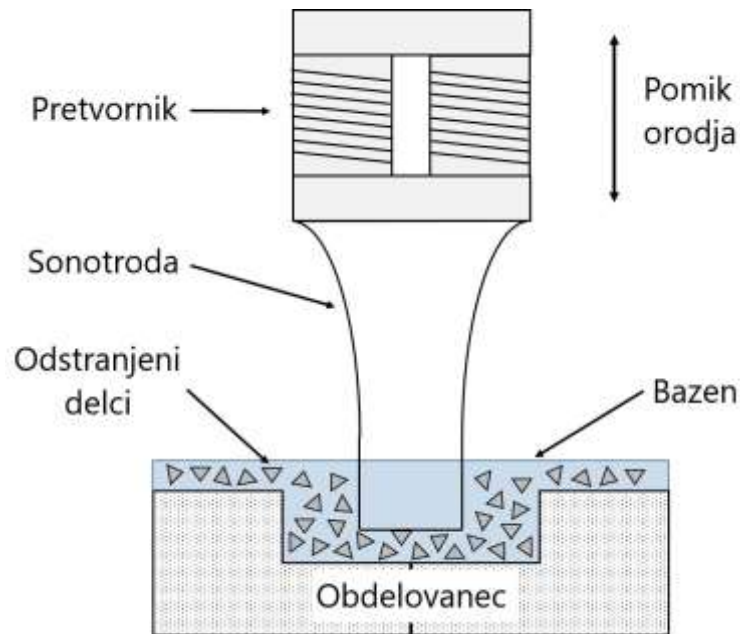


Slika 2-4: Orodje za klasično vrtanje stekla [4]

2.4.2.2 USM in RUM

USM - ultrasonic machining ali po slovensko ultrasonično obdelovanje, je način obdelave trdih in krhkih materialov. Izumljen je bil leta 1927, a v uporabni obliki opisan v industriji šele konec 40-ih let prejšnjega stoletja. Od takrat zanimanje in razvijanje uporabe tega postopka vseskozi raste.

USM z vibracijami z visoko frekvenco, ponavadi 20 kHz, in nizko amplitudo od 0.05 do 0.10 mm orodje potiska proti obdelovancu v vertikalni ali ortogonalni smeri. Do odvzemanja materiala pride z udarjanjem orodja ob obdelovanec, kjer abrazivni delci v emulziji, s katero je prekrita obdelovalna površina, načenjajo površino obdelovanca [5].

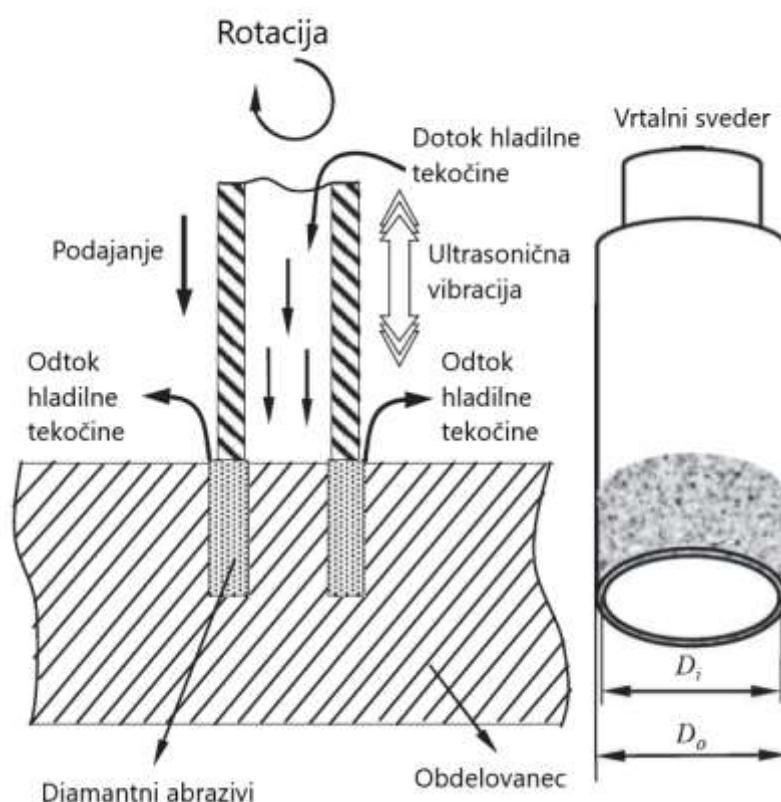


Slika 2-5: Shema USM [6]

RUM - Rotary ultrasonic machining ali po slovensko rotirajoče ultrasonično obdelovanje, je leta 1964 prvič uporabil P. Legge. Je hibriden postopek obdelave stekla ali keramike, ki ga sestavljata mehanizma odnašanja materiala vrtanja z diamantnim svedrom in USM. Združenje teh dveh mehanizmov, rezultira v višjo hitrost odnašanja materiala in natančnejšo obdelavo [5].

Poleg tega raziskave kažejo, da so pri določeni moči ultrasoničnih vibracij rezalne sile manjše in s tem tudi manjše velikosti okruškov obdelovanca na robovih [7]. V še eni raziskavi so odkrili, da ima amplituda ultrasoničnih vibracij pomembno vlogo pri segrevanju kontakta med obdelovanjem in krušenju obdelovanca [8].

V splošnem je metoda RUM med najboljšimi za izdelovanje lukenj, kratkih in dolgih, z visoko natančnostjo in kvaliteto.



Slika 2-6: Shema RUM [9]

2.4.3 Kakovost obdelave

Raziskovalci se ukvarjajo s problemom krušenja in pokanja stekla pri odrezovanju. Pokanje in krušenje stekla je slabo tako za izgled, kot tudi za funkcionalnost izdelka in njegove mehanske lastnosti, saj povečuje verjetnost nadaljevanja razpok in posledično lom stekla.

Kot že omenjeno pri 2.5 poglavju, se je nenadzorovanim lomom mogoče delno izogniti s primernimi obdelovalnimi parametri. V zgoraj naštetih raziskavah in mnogih drugih, raziskovalci ugotavljajo, da na natančnejšo obdelavo v splošnem vplivajo višja vrtilna hitrost orodja, manjša podajalna hitrost oziroma globina rezanja in manjši premeri orodja.

Pri postopku vrtnanja je glavni problem pojavljanje okruškov na vhodu, predvsem pa na izhodu svedra na obdelovancu. Ti dve področji sta še bolj občutljivi kot vmesno področje. Zato v praksi na vhodu in izhodu zmanjšamo podajalno hitrost materiala. V nekaterih primerih se velikih okruškom na izhodu izognemo tudi tako, da vrtamo iz obeh strani, vendar dobimo slabše razmere na obdelovancu kjer se obdelovanje iz obeh strani sreča.

Pomemben faktor pri kakovosti obdelane površine pa je tudi t.i. abrazivna trdota. Ko se pri obdelavi trdega in krhkega materiala odstrani delec obdelovanca, se ta lahko ujame med površino obdelovanca in abrazivi orodja. Pri tem lahko pride do velikih sil med odstranjenim delcem in površino, kar rezultira v nastanek nove razpoke na že obdelani površini, katere

sicer orodje ne bi obdelalo. Ugotovljeno je, da je volumen odstranjenega materiala na enoto časa obratno sorazmeren s trdoto materiala obdelovanca [1].

3 Metodologija raziskave

Za praktični del zaključne naloge, smo se lotili analize krušenja stekla vrtanih vzorcev na vhodu in izhodu orodja ter morebitnega lomljenja vzorcev.

3.1 Določanje parametrov vrtanja

Ker ni nobene enačbe, s katero bi natančneje izračunali pojav in velikost okruškov, smo postavili približne parametre vrtanja glede na znanje iz zbrane literature. Le ti so že kot prvi izbrani dajali ustrezne rezultate in so bili ves čas preizkusa enaki.

Uporabili smo različne velikosti svedrov in sicer 6 mm ter 8 mm.

$$\text{Podajanje: } f = 0.4 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

$$\text{Rezalna hitrost: } v_c = 100 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Vrtilna hitrost izračunamo po enačbi (3.1) in je za premer orodja 6 mm in 8 mm različna:

$$n_{6\text{mm}} = 5300 \frac{\text{vrt}}{\text{min}}$$

$$n_{8\text{mm}} = 4000 \frac{\text{vrt}}{\text{min}}$$

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot d} \tag{3.1}$$

3.2 Eksperimentalni del

3.2.1 Vzorci in materiali

3.2.1.1 Steklo BK7

Kronsko steklo je tip optičnega stekla uporabljenega v lečah in drugih optičnih komponentah [3]. Narejeno je iz alkalijevo apnenega silicija, vsebuje približno 10% kalijevega oksida in je eno prvih nizko disperzivnih stekel.

Kronska stekla pa imenujemo tudi vsa stekla s podobnimi lastnostmi zgoraj navedenega, s poudarkom na Abbejevem številu v rangu 50 – 85. Ta rang dosegajo tudi borosilikatna stekla, ki vsebujejo okoli 10% borovega oksida, imajo dobre optične in mehanske karakteristike ter so dobro kemijsko odporna. Borov oksid B_2O_3 znižuje viskoznost silicija in rast ekspanzijskega koeficienta. Ta stekla imajo poleg učinkov prej naštetega borovega oksida tudi druge pozitivne lastnosti, kot so dobro prenašanje nenadnih termalnih sprememb in dobra odpornost pred korozivnimi efekti kislin.

Eno najpogostejših borosilikatnih stekel je tudi steklo tipa BK7, uporabljeno v preciznih lečah.

Njegove prednosti so:

- odlična optična kvaliteta
- skoraj brez zračnih mehurčkov in ostalih nečistosti
- čisto, praktično brezbarvno steklo
- zelo dobra homogenost lomnega količnika
- visoka čistost surovega materiala

Tipične aplikacije BK7 stekla:

- zahtevne optične aplikacije
- okna in leče
- bazni material za precizno optiko
- osnova za prevleke ogledal
- merjenje in senzorika
- optične prizme

Vzorci, na katerih smo izvajali vrtnanje in analizo, so iz stekla tipa BK7.

3.2.2 Metodologija preizkusov

3.2.2.1 Preizkuševališče vrtnanja

Za vrtnanje smo uporabili frezalni stroj. Vzorca 2 in 3 smo toga vpeli v pripravo na sliki 3.3, ki omogoča mirovanje obdelovanca in preprečitev delovanja momentnih sil na le tega.

Sveder na sliki 3.4 je bil votel z diamantnimi zrni na obdelovalnem delu, premerov 6 mm in 8 mm. Hlajenje je potekalo z dotokom vode znotraj svedra skozi stik orodja in obdelovanca.

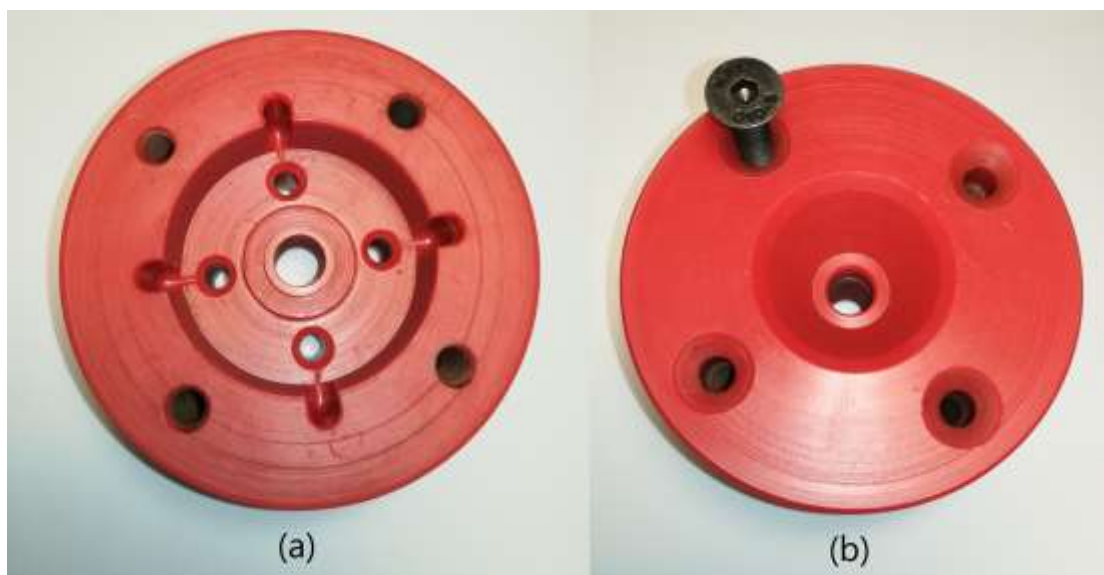
Vrtali smo iz vsake strani do sredine debeline vzorca, saj smo s tem zmanjšali verjetnost loma vzorca in velikost okruškov.



Slika 3-1: Preizkuševališče



Slika 3-2: Prikluček za dovod hladilnega sredstva



Slika 3-3: (a) Spodnji del vpetja. (b) Zgornji del vpetja montiran na spodnjem



Slika 3-4: (a) Sveder premera 8 mm. (b) Konica svedra s prevleko diamantnih abrazivov

3.2.3 Mikroskop

Za analizo vzorcev smo uporabili mikroskopski set KEYENCE tipa VHX 6000. Vzorce smo na vходу in izhodu orodja približali na različnih povečavah, jih poslikali in na sliko podali tudi merilo.



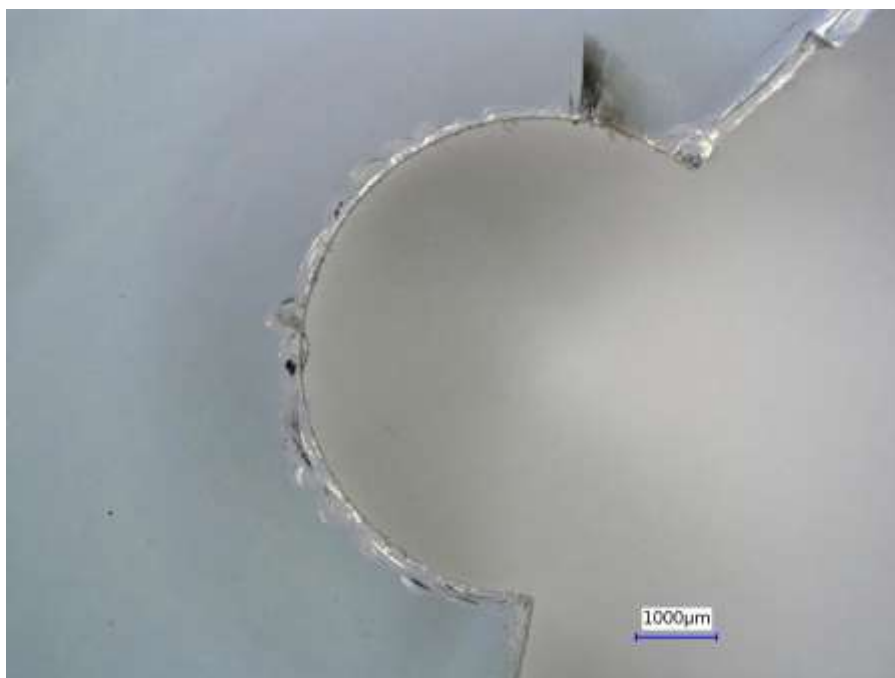
Slika 3-5: Laboratorijska oprema KEYENCE VHX 6000

4 Rezultati

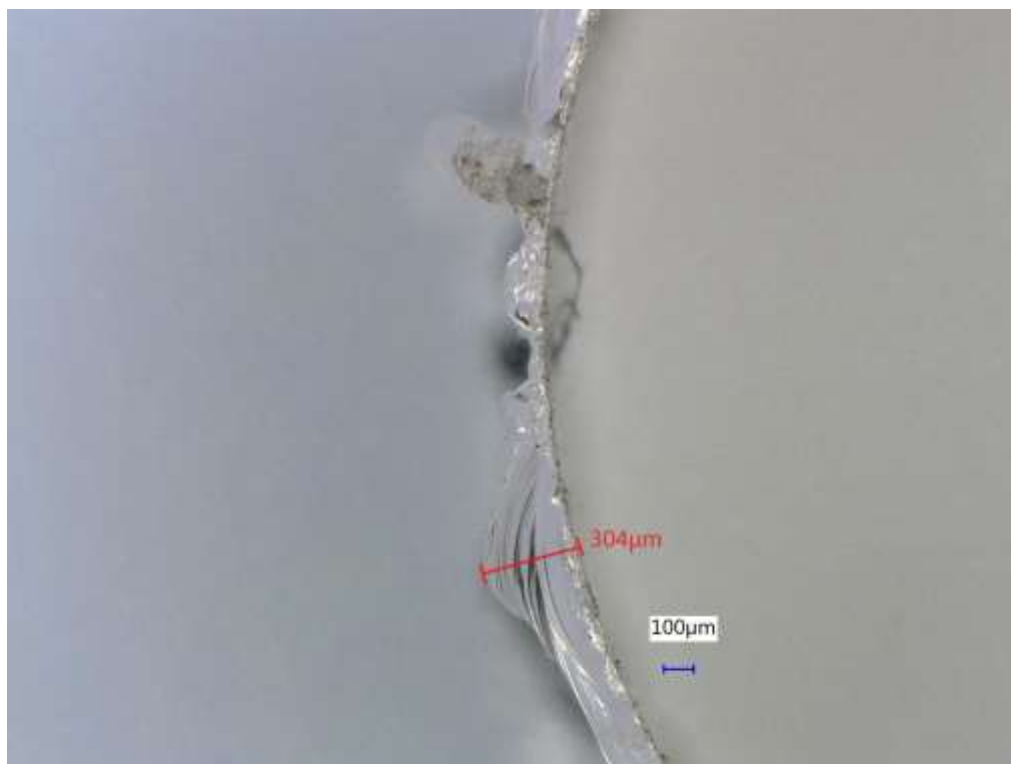
Rezultati so navedeni po vrsti, vsak vzorec posebej in vsak vhod orodja posebej, naprej pri 30x povečavi in nato še pri 100x povečavi. Merilo je bilo podano že pri slikanju vzorca z mikroskopom, velikost največjega okruška pa je kasneje izmerjena s programsko opremo ImageJ.

4.1 Vzorec 1

Vrtanje s 6 mm svedrom in vpetjem ne blizu izvrtini.



Slika 4-1: Vzorec 1, vhod 1, 30x povečava



Slika 4-2: Vzorec 1, vhod 1, 100x povečava



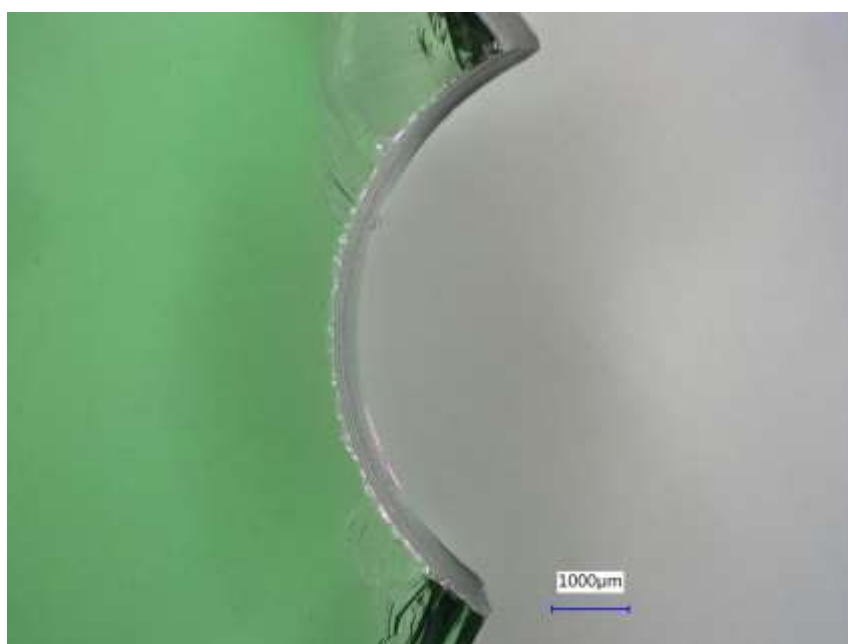
Slika 4-3: Vzorec 1, vhod 2, 30x povečava



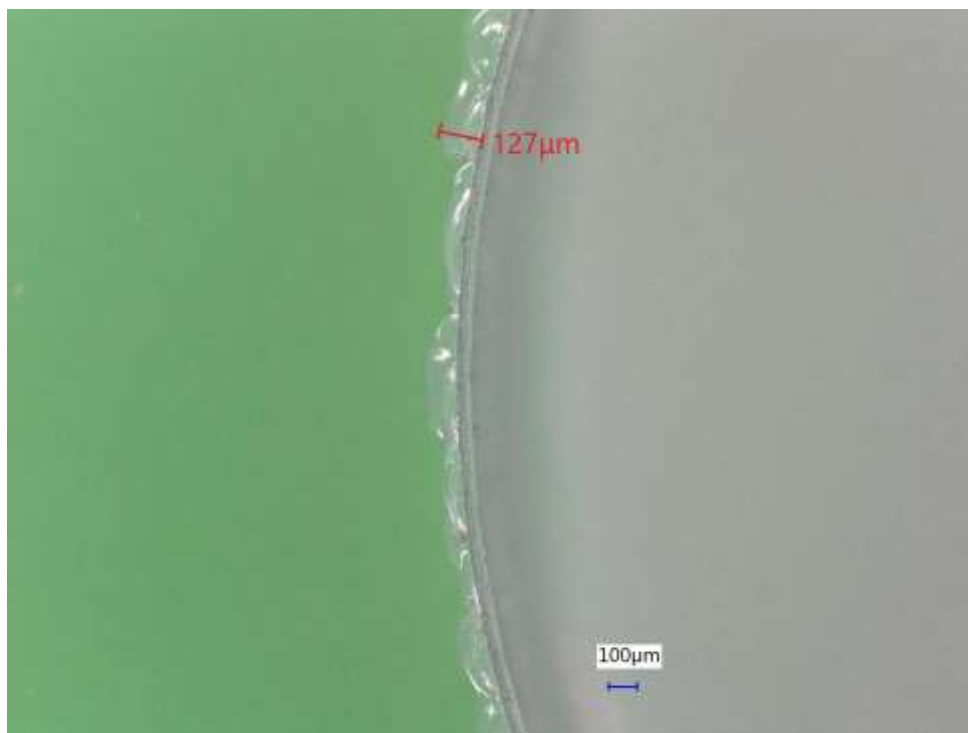
Slika 4-4: Vzorec 1, vhod 2, 100x povečava

4.2 Vzorec 2

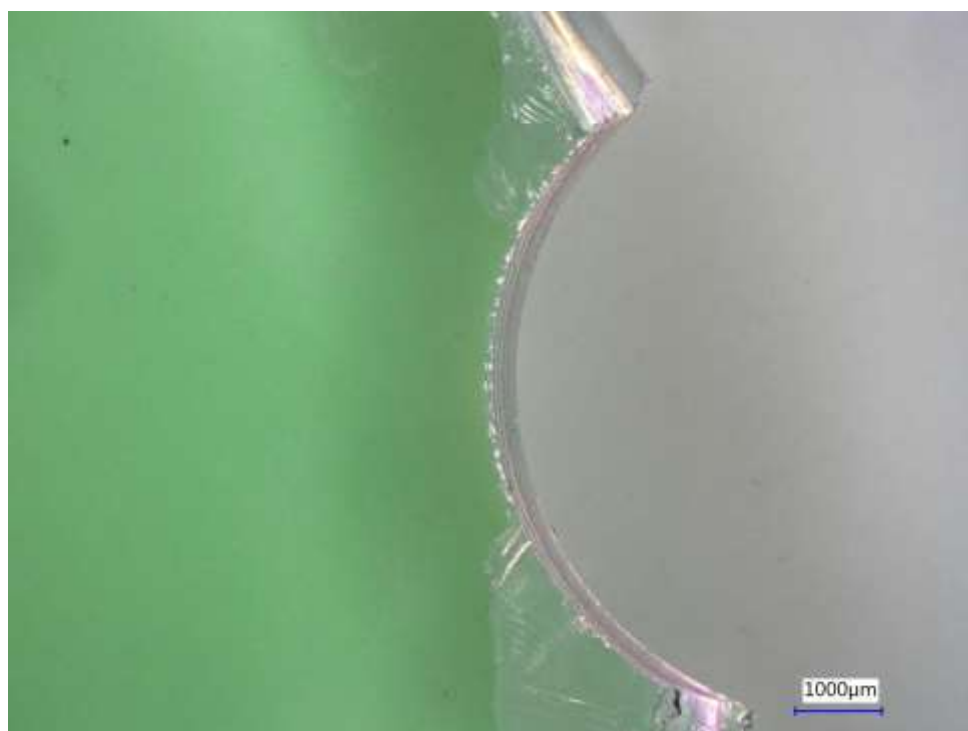
Vrtanje z 8 mm svedrom in vpetjem ne blizu izvrtini.



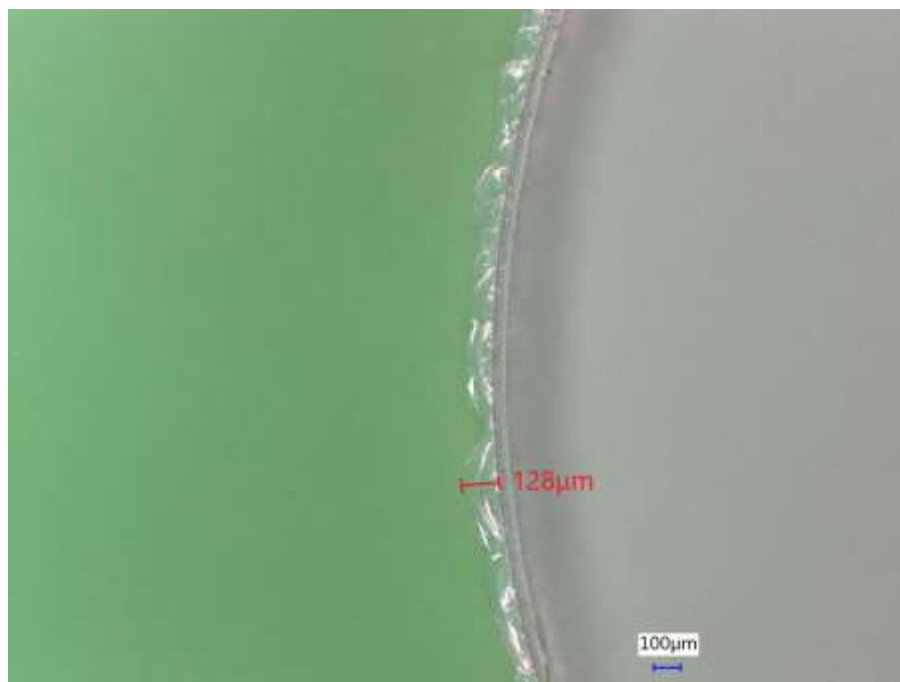
Slika 4-5: Vzorec 2, vhod 1, 30x povečava



Slika 4-6: Vzorec 2, vhod 1, 100x povečava



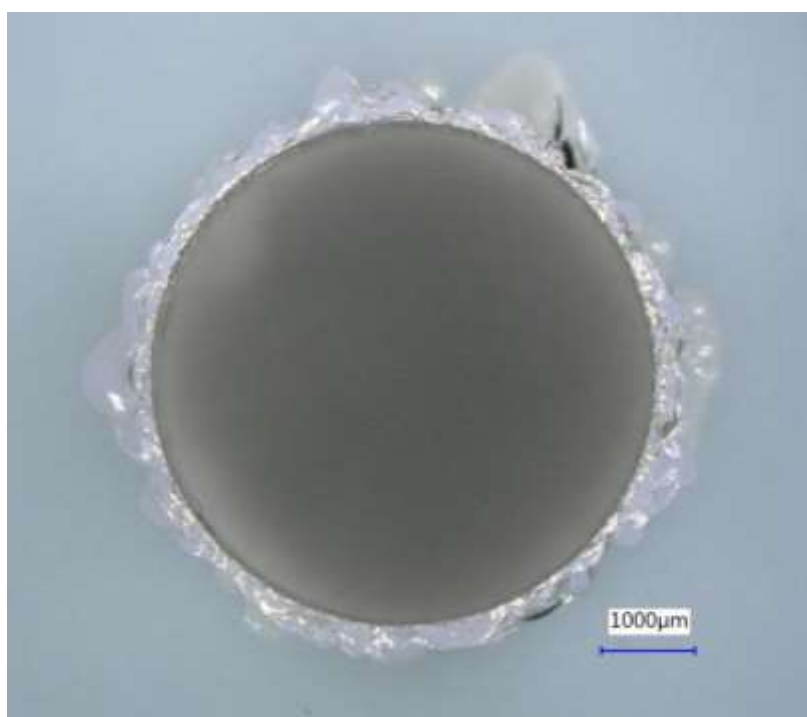
Slika 4-7: Vzorec 2, vhod 2, 30x povečava



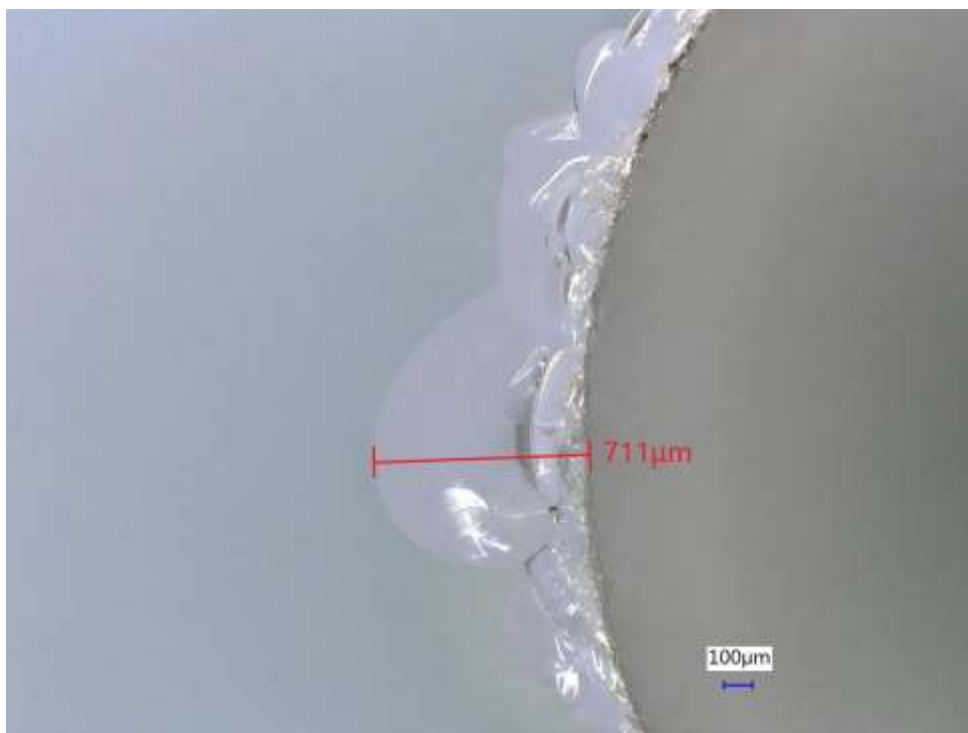
Slika 4-8: Vzorec 2, vhod 2, 100x povečava

4.3 Vzorec 3

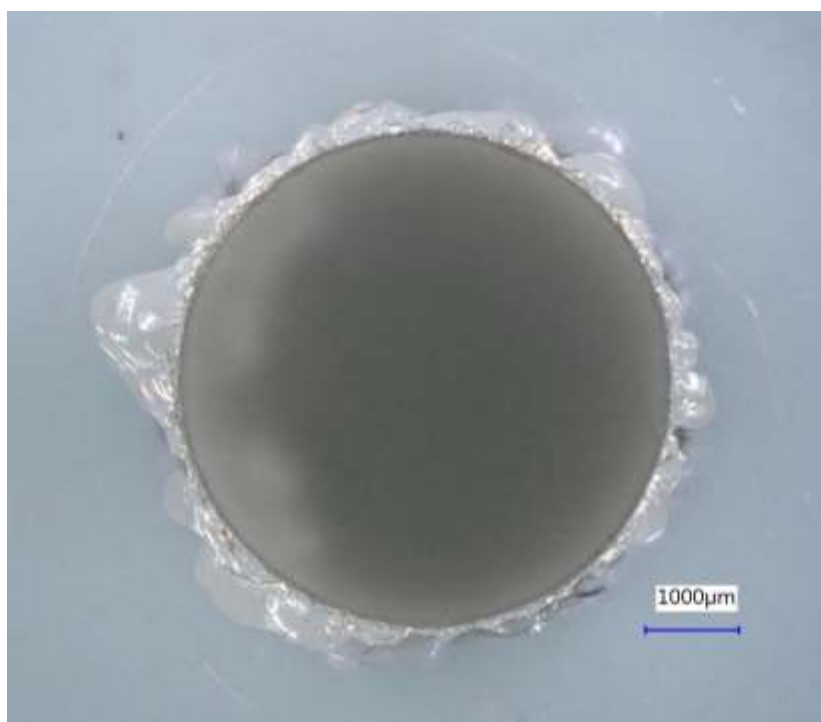
Vrtanje s 6 mm svedrom in vpetjem blizu izvrtine.



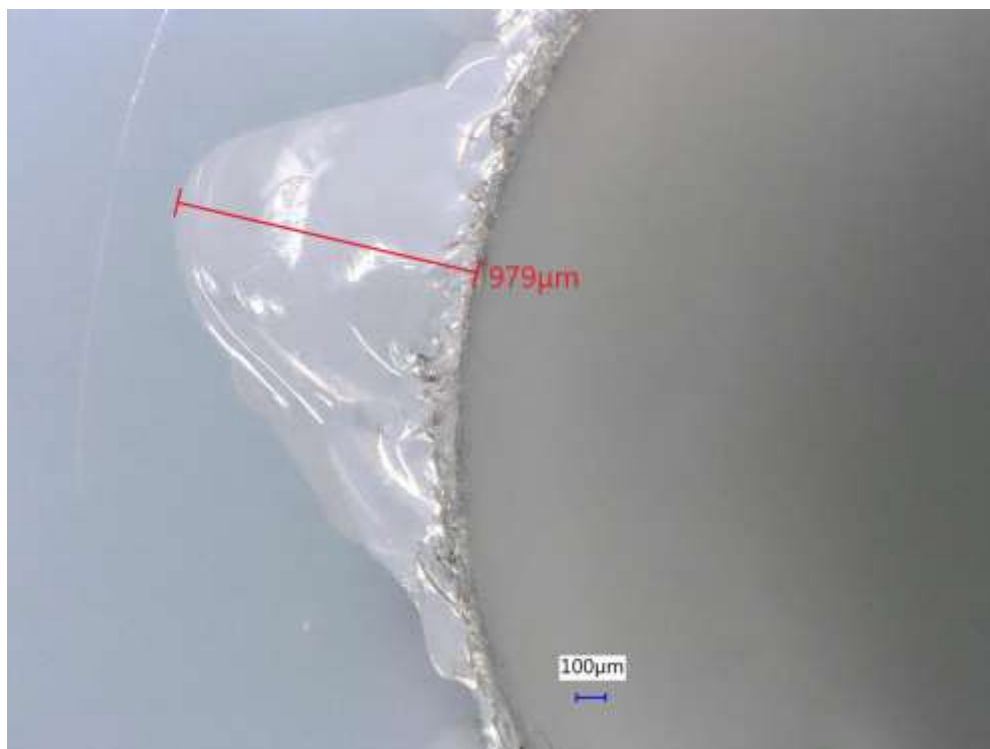
Slika 4-9: Vzorec 3, vhod 1, 30x povečava



Slika 4-10: Vzorec 3, vhod 1, 100x povečava



Slika 4-11: Vzorec 3, vhod 2, 30x povečava



Slika 4-12: Vzorec 3, vhod 2, 100x povečava

5 Diskusija

Pri preizkušanju smo naleteli na nepričakovan problem. Vzorci so se pri vrtanju zlomili na več kosov. Ugotovili smo, da je bil glavni vzrok tega problema vpetje oziroma podpora, ki smo jo pripravili pod vzorcem. To smo namreč nastavili tako, da je bil vzorec podprt na robovih, precej stran od izvrtine, ki smo jo vrtali. Pri obremenitvi orodja na obdelovanec, je tako na vzorec delovala prevelika momentna sila, zaradi katere so notranje momentne napetosti povzročile lom vzorca. Ko smo obdelovanec podprli bližje izvrtini, je bil problem odpravljen in dobili smo obdelan vzorec 3.

Prva dva vzorca sta torej vrtana z vpetjem stran od izvrtine. Razlikujeta se v velikosti svedra. Pri vzorcu 1 je izvrtina 6mm in ima večje okruške kot pri vzorcu 2 kjer je izvrtina 8mm, a velikost svedra nima vpliva na velikost okruškov. Vzorec 3 je ostal cel, saj smo ga vpeli bližje izvrtini in se tako v njem niso pojavljale dodatne momentne napetosti.

Izmerjena razlika v velikosti okruškov med vzorci je zgolj slučaj. Krušenje je problematično, saj nastaja zelo naključno. Kljub temu pa je dokazano in med našimi testi potrjeno, da na velikost okruškov vplivajo obdelovalni parametri, v glavnem rezalna hitrost in podajalna hitrost. Večja kot je rezalna hitrost, manjši so okruški in manjša kot je podajalna hitrost, manjši so okruški.

6 Zaključki

- 1) Določili smo obdelovalne parametre procesa vrtanja stekla BK7
- 2) Ugotovili smo vpliv obdelovalnih parametrov na krušenje stekla
- 3) Pokazali smo, da ima vpetje obdelovanca pomembno vlogo pri vrtanju stekla
- 4) Izmerili smo velikost okruškov na vseh orodjih v obdelovanec

Doprinos tega zaključnega dela je v prvi vrsti pomemben za vse nadaljnje postopke klasičnega vrtanja stekla BK7 v industriji in drugih rabah, saj so bile ugotovljene velikosti okruškov pri izbranih obdelovalnih parametrih in problemi, ki se pojavijo ob tej obdelavi stekla. Izmerjene velikosti okruškov, lahko bodočim izvajalcem vrtanja stekla BK7 pomagajo pri izbiri postopka vrtanja glede na željeno kvaliteto končnega vrtanega izdelka.

Predlogi za nadaljnje delo

Za nadaljnje delo je možno postopek vrtanja stekla BK7 in znanja, ki so bila ugotovljena v tem delu, raziskati še z drugimi postopki kot sta USM in RUM.

Literatura

- [1] E. B. Shand: *Glass engineering handbook: Second edition*. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., New York, Toronto, London, 1958.
- [2] Takashi Matsumura, Mitsuto Kakishita: *Parametric glass milling with simultaneous control*. Journal of manufacturing processes **15** (2013) str. 1-7.
- [3] Sabri Öztürk, Mehmet Fatih Kahraman: *Modeling and optimization of machining parameters during grinding of flat glass using response surface methodology and probabilistic uncertainty analysis based on Monte Carlo simulation*. Measurement **145** (2019) str. 274-291.
- [4] Sveder za klasično vrtanje. Dostopno na: https://images.homedepot-static.com/productImages/574_a0841-6ca3-4ece-8f45-921821720e79/svn/rubi-specialty-drill-bits-5961-64_1000.jpg, ogled: 25.8.2019.
- [5] *Machining ceramics with rotary ultrasonic machining*. Ceramic industry magazine (2001)
- [6] USM shema. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_machining, ogled: 2.8.2019.
- [7] Y. Hu, H. Wang, F. Ning, Y. Li, W. Cong: *Surface grinding of optical BK7/K9 glass using Rotary ultrasonic Machining: an experimental study*. V: MSEC 2017: *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Los Angeles, CA, USA, 4-8.6.2017.
- [8] F. Ning, H. Wang, W. Cong, P.K.S.C. Fernando: *A mechanistic ultrasonic vibration amplitude model during rotary ultrasonic machining of CFRP composites*. Ultrasonics **76** (2017) str. 44-51.
- [9] DeFu Liu, W.L.Cong, Z.J.Pei, Yong Jun Tang: *A cutting force model for rotary ultrasonic machining of brittle materials*. International journal of machine tools and manufacture **52** (2012) str. 77-84.