

Analyse van draadvonkerosie van ZrO_2 -composieten

Annelies MIGDAL

Promotor(en): Prof.dr.ir. E. Ferraris

Co-promotor(en): *Prof.dr.ir. B. Lauwers*

Begeleider: *F. Vogeler*

Masterproef ingediend tot het behalen van de
graad van master of Science in de industriële
wetenschappen: *Elektromechanica,*
afstudeerrichting Manufacturing Engineering

Academiejaar 2015-2016

Voorwoord

Vonkerosie, in het begin een raadsel, nu een bondgenoot. Doorheen de masterproef werden alsmaar meer delen ontbloot. Het gemak waarmee door het harde keramische materiaal gesneden werd, het gesakker wanneer de draad nog maar eens brak, de euforie als de gevонkte onderdelen klaar waren. Ik heb dan ook het genoegen gehad om al deze fasen te mogen meemaken. De samenvatting van dit alles is uitgegroeid tot deze thesis.

Hierbij wil ik ook nog eens mijn dank betuigen aan mijn begeleider Frederik Vogeler die mij tijdens deze masterproef met raad en daad heeft bijgestaan. Ook wil ik mijn promotor, Professor dr.ir. Leonora Ferraris en co-promotor Professor dr.ir. Bert Lauwers bedanken voor het mogelijk maken van deze masterproef, voor de kritische noot en het bijsturen waar nodig.

Ook wil ik de mensen van de werkplaats op werktuigkunde en MTM bedanken voor de hulp bij het maken van de monsters.

Als laatste nog bedankt aan mijn familie en vrienden die het mede hebben mogelijk gemaakt dat ik terug ben gaan studeren na een paar jaar te hebben gewerkt. Bedankt voor de enorme steun op de momenten, dat het nodig was. Hierbij nog een bijzondere dank je aan mijn vriend Jean.

Annelies

© 2016, Annelies Migdal

De auteur geeft de toelating deze tekst op papier en digitaal voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor eigen gebruik. Elk ander gebruik valt onder de strikte beperkingen van het auteursrecht. In het bijzonder wordt gewezen op de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van tekstdelen.

Abstract

In industriële en medische toepassingen is de vraag naar corrosiebestendige en slijtvaste materialen groot. Keramische materialen voldoen aan deze eisen. Ze hebben een hoge hardheid en een goede thermische, corrosieve en slijtageweerstand. Door deze eigenschappen is het moeilijk en duur om het materiaal vorm te geven. Een goede alternatieve bewerkingsmethode hiervoor is vonkerosie.

Om aan vonkerosie te kunnen doen moet het materiaal geleidend zijn. Hiervoor kan een tweede geleidende fase aan het keramisch materiaal toegevoegd worden.

In deze thesis wordt de verwerking van ZrO_2 met behulp van draadvonken onderzocht waarbij de geleidende fase TiN is. Verschillende monsters met een aantal afwerkingsgraden worden gemaakt. De buigsterkte en de ruwheid word onderzocht in functie van de afwerkingsgraad. Waarbij ook de correlatie tussen de ruwheid en de buigsterkte wordt onderzocht.

Inhoudsopgave

| | |
|---|------------|
| VOORWOORD | I |
| ABSTRACT | III |
| HOOFDSTUK 1 : INLEIDING | 1 |
| 1.1. SITUERING VAN HET ONDERZOEKSOMEIN | 1 |
| 1.2. PROBLEEMSTELLING | 1 |
| 1.3. DOEL VAN HET WERK | 2 |
| 1.4. STRUCTUUR VAN DE TEKST..... | 2 |
| HOOFDSTUK 2 : LITERATUURSTUDIE | 5 |
| 2.1. BASISPRINCIPES VONKERSIE | 5 |
| 2.1.1. <i>Electrical Discharge Machining</i> | 5 |
| 2.1.2. <i>De Generator</i> | 7 |
| 2.1.3. <i>Draadvonken: Vonkspleet en offset</i> | 8 |
| 2.1.4. <i>Iso-energetische pulsen versus iso-Frequentie pulsen</i> | 9 |
| 2.2. WAT ZIJN KERAMISCHE MATERIALEN EN COMPOSieten VAN KERAMISCHE MATERIALEN..... | 10 |
| 2.2.1. <i>Materiaaleigenschappen van keramieken</i> | 10 |
| 2.2.2. <i>Keramische composieten</i> | 14 |
| 2.3. CONVENTIONELE BEWERKINGSMETHODEN | 15 |
| 2.3.1. <i>Near Net Shape</i> | 15 |
| 2.3.2. <i>Slijpen</i> | 16 |
| 2.4. VONKERSIE VAN KERAMISCHE MATERIALEN | 17 |
| 2.4.1. <i>Vonkersie van isolerende keramische materialen</i> | 17 |
| 2.4.2. <i>Material Removal Mechanism (MRM) bij geleidende keramische materialen</i> | 17 |
| 2.5. VONKERSIE VAN OP ZrO ₂ GEBASEERDE KERAMIEKEN..... | 20 |
| 2.6. BESLUIT | 22 |
| HOOFDSTUK 3 : METHODOLOGIE | 25 |
| 3.1. SAMENSTELLING ZrO ₂ | 25 |
| 3.1.1. <i>ZrO₂-Tin</i> | 25 |
| 3.2. DRAADVONKEN VAN DE MONSTERS | 26 |
| 3.3. TEKENEN EN PROGRAMMEREN MONSTERS | 27 |
| 3.4. OPMETEN VAN DE MONSTERS | 28 |
| 3.4.1. <i>Ruwheidsmetingen</i> | 28 |
| 3.4.2. <i>Buigtesten</i> | 32 |
| 3.4.3. <i>SEM</i> | 34 |
| 3.4.4. <i>CMM</i> | 35 |
| 3.5. VERWERKING GEGEVENS | 36 |
| 3.6. OVERZIET EXPERIMENTEN..... | 36 |
| HOOFDSTUK 4 : EXPERIMENTEN EN RESULTATEN | 39 |
| 4.1. RUWHEIDSMETINGEN | 39 |
| 4.2. SEM-BEELDEN | 43 |
| 4.3. BUGTESTEN | 45 |
| 4.3.2. <i>CMM-metingen</i> | 48 |
| 4.4. BESLUIT | 51 |
| HOOFDSTUK 5 : CONCLUSIE..... | 53 |
| BIBLIOGRAFIE..... | 55 |
| BIJLAGE A: BESTAND VOORBEREIDEN MET FIKUS VISUALCAM 17.1..... | 57 |
| BIJLAGE B : WERKING CHARMILLES ROBOFIL 240CC..... | 68 |
| BIJLAGE C : PROGRAMMATIE IN MATLAB | 72 |

| | |
|-------------------------|----|
| RA-GRAFIK..... | 72 |
| WEIBULL-VERDELING | 74 |
| VLAKHEID..... | 77 |

Hoofdstuk 1 : Inleiding

1.1. Situering van het onderzoeksdomein

Keramische materialen worden tegenwoordig veel gebruikt in diverse toepassingen door hun uitstekende mechanische eigenschappen, hoge sterkte en hardheid, goede thermische, corrosieve en slijtageweerstand. Hierdoor zijn keramische materialen zeer goed bruikbaar voor diverse toepassingen zowel in de industriële als in de biomedische sector bv. tandwielen, prothesen, gereedschappen, enz. ZrO_2 is een van deze keramisch materialen die vaak ingezet worden in medische toepassingen omdat dit zeer slijtvast en corrosiebestendig is. Van de meest gebruikte bestaande technische keramische materialen heeft ZrO_2 de grootste scheurgroeiweerstand en buigsterkte, ook leunt de thermische expansiecoëfficiënt ervan het dichtste aan bij de metalen zodat deze materialen makkelijk gecombineerd kunnen worden.

Vanuit de industrie komt dan ook de vraag naar een efficiënte bewerkingsmethode voor dit keramisch materiaal.

1.2. Probleemstelling

Het nadeel van dit harde keramische materiaal is de moeilijke verspaanbaarheid van de werkstukken. Met de conventionele bewerkingsmethoden wordt het bewerken een ingewikkelde en dure zaak, zeker indien er complexe vormen gemaakt moeten worden. Een goede alternatieve bewerkingsmethode hiervoor is vonkerosie (eng. electrical discharge machining). Bij vonkerosie maakt de hardheid van het materiaal niet uit, de materialen dienen wel elektrisch geleidend te zijn. De elektrische weerstand mag niet boven $100\Omega\text{cm}$ komen om vonkerosie te kunnen uitvoeren. ZrO_2 is op zich niet geleidend, maar de weerstand ervan kan verminderd worden door aan ZrO_2 een tweede elektrisch geleidende fase (WC , TiN , TiCN ,...) aan toe te voegen. Hierbij rekening houdend met het feit dat de goede mechanische eigenschappen van het keramisch materiaal behouden blijven.

Als proces wordt gebruik gemaakt van draadvonken. Dit heeft als voordeel dat zeer complexe vormen uitgesneden kunnen worden. Het diëlektricum dat gebruikt wordt is gedemineraliseerd water en is dus onschadelijk voor mens en milieu. Bij het draadvonken hoeft ook geen rekening gehouden te worden met gereedschapsslijtage doordat de draad waarmee gesneden wordt continu vernieuwd wordt. Draadvonken is een zeer traag proces en de kans op draadbreek tijdens het draadvonken van keramisch materiaal is zeer reëel, een kleine wijziging van de parameters kan al grote gevolgen hebben, waardoor onbemand bewerken moeilijk wordt. De bewerking van de stukken kan maar in één richting gebeuren, als de andere zijden nog bewerkt moeten worden, dan moet de opspanning veranderd worden.

Tot nu toe zijn er enkel al testen uitgevoerd op labo schaal, met kleinere schijven en kleinere monsters. Om het proces op industriële schaal te kunnen uitvoeren moeten de testen op grotere schijven uitgevoerd worden waarbij grotere monsters worden uitgesneden. De grotere schijven waren moeilijk te produceren of niet commercieel beschikbaar. Met de komst van hybrid spark plasma syntering werd het mogelijk om homogene grotere schijven te produceren. De bewerking van de grotere monsters

kunnen dan vergeleken worden met eerdere onderzoeken op laboschaal die gevonden werden in de literatuur.

1.3. Doel van het werk

In dit werk gaat het vooral over vonkerosie van keramische materialen en dan meer bepaald over het draadvonken van op ZrO₂ gebaseerde keramische materialen. Namelijk de bewerking van ZrO₂-TiN op grotere schaal. Het doel is om de beste parameters voor het draadvonken van ZrO₂-TiN te vinden, dit zonder de goede eigenschappen van ZrO₂-TiN teniet te doen. Aan de hand van de parameters die door Charmilles voor het draadvonken van hardmetalen gegeven zijn, ruwheidswaarden en sterkten uit de literatuur kan een vergelijking gemaakt worden met de geproduceerde monsters en kunnen de beste instelparameters gevonden worden.

Geproduceerde onderdelen uit ZrO₂-TiN moeten getest worden op hun oppervlaktegesteldheid en hun sterkte na de bewerking door middel van draadvonken. Door het draadvonken is er kans dat het oppervlak microscopische scheurtjes en defecten bevat die het materiaal kunnen verzwakken. Hiervoor worden verschillende monsters uitgesneden met verschillende afwerkingsgraden, van 1 ruwe snede tot en met 5 finiserende sneden. Met een afwerking door 5 sneden, wordt een Ra-waarde lager dan 0.5 µm beoogd. Met behulp van een 4-punts buigtest wordt de buigsterkte van het materiaal gemeten. Waarna met deze buigsterkten een Weibull-verdeling opgemaakt kan worden om de faalkansen van ZrO₂-TiN na het bewerken door draadvonken te bepalen. Hiernaast willen we de dimensionele nauwkeurigheid van het draadvonken bekijken, dit wordt gedaan aan de hand van vlakheidsmetingen met de CMM. De vlakheid die hierbij bereikt wil worden is 5µm.

Hiernaast wordt de oppervlaktegesteldheid ook bekeken doormiddel van SEM-beelden. Het oppervlak mag zo min mogelijk aangetast zijn door de bewerkingsmethode, dit kan namelijk nadelige gevolgen hebben op de sterkte en de levensduur van de onderdelen. Het materiaalverwijderingsmechanisme dat plaatsvindt wordt hierbij bekeken en vergeleken met wat in de literatuur terug gevonden kan worden. Naast smelten en verdampen kan er ook bv. Oxidatie optreden.

De invloed van de oppervlakteruwheid en de oppervlakketopologie op de buigsterkte kan worden bekeken en eventueel met elkaar in verband gebracht worden. Ook wordt gekeken naar de efficiëntie van het bewerkingsproces, namelijk de tijdsduur ten opzichte van de oppervlaktekwaliteit. Is het efficiënt om de best mogelijke oppervlakteruwheid na te streven, of kan er met minder aantal sneden al een goede oppervlakteruwheid bekomen worden in minder tijd?

1.4. Structuur van de tekst

Het eerste hoofdstuk geeft een algemene inleiding over de thesis, hierin wordt besproken wat bereikt wil worden met het onderzoek en welke problemen er zich kunnen voordoen.

Het tweede hoofdstuk is de literatuurstudie, er wordt een bondige opsomming gegeven van wat vonkerosie algemeen is en met welke belangrijke parameters rekening

gehouden moet worden tijdens het proces. De begrippen keramische materialen en composieten van keramische materialen worden uitgelegd en in hoeverre dit een invloed heeft op de bewerkingsmethode. Verschillende bewerkingsmethoden worden aangehaald, waarna vonkerosie van keramische materialen besproken wordt. Deze informatie wordt gehaald uit onderzoeken die eerder gebeurd zijn met betrekking tot vonkerosie en het bewerken van keramische materialen.

Het derde hoofdstuk gaat over de methodologie die gebruikt wordt. Hierin wordt de materiaalsamenstelling van ZrO₂-TiN besproken. De specificaties van de gebruikte machines zijn hierin terug te vinden, niet enkel deze van de draadvonkmachine Charmilles Robofil 240cc, maar daarnaast wordt ook besproken met welke middelen de metingen van de oppervlakteruwheid en de buigsterkte opgemeten worden en welke voorbereidingen dienen te gebeuren voor de metingen uitgevoerd kunnen worden.

Het vierde hoofdstuk geeft de experimentele fase en de resultaten weer. In een eerste deel werden de parameters vanwaar vertrokken werd een eerste keer uitgetest en de ruwheden werden opgemeten om te kijken welke richting uitgegaan moest worden. In een tweede deel wordt een verbetering en een validatie van de parameters weergegeven. De validatie bestond eruit de oppervlaktetopologie, oppervlakteruwheid, buigsterkte en dimensionele nauwkeurigheid te bekijken.

In het vijfde en laatste hoofdstuk wordt een conclusie getrokken uit de gevonden resultaten en worden deze resultaten vergeleken met de bestaande resultaten die in de literatuur gevonden werden.

Hoofdstuk 2 : Literatuurstudie

In de literatuurstudie worden bestaande onderzoeken doorgenomen die te maken hebben met het onderwerp, vonkerosie van ZrO₂-TiN, zodat de basisbeginselen die nodig zijn voor de experimenten duidelijk worden.

In een eerste onderdeel wordt het principe van vonkerosie in het algemeen uitgelegd, waarna er dieper op de generatorparameters ingegaan wordt die de energiepulsen sturen, vervolgens wordt er dieper op draadvonken ingegaan en dan meerbepaald op de offset en de hoeveelheid materiaalafname.

In een tweede deel worden keramische materialen en keramische composieten besproken. De verschillende materiaaleigenschappen eigen aan keramische materialen worden hier besproken.

In het derde deel worden andere bewerkingsmethoden dan vonkerosie aangehaald die gebruikt kunnen worden om keramische materialen te bewerken.

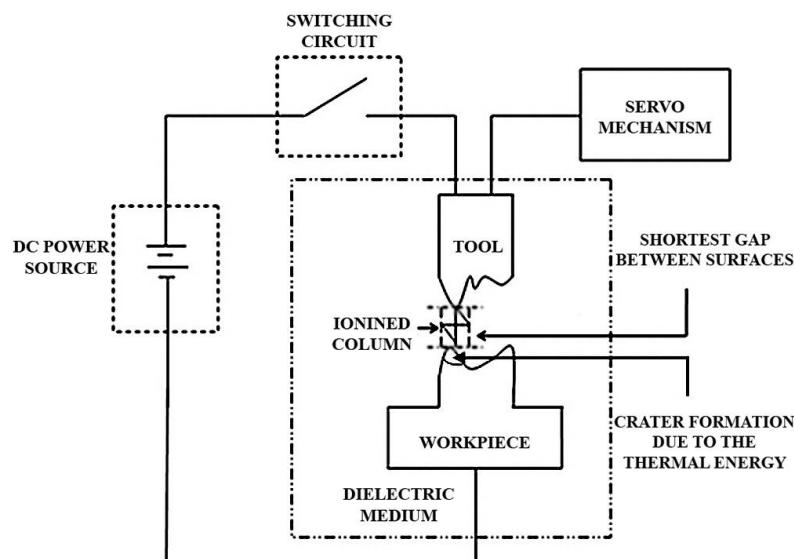
In het vierde deel wordt de vonkerosie van keramische materialen in het algemeen besproken. Eerst wordt de vonkerosie van isolerende keramieken besproken. Waarna de verschillende materiaalverwijderingsmechanismen besproken worden die bij vonkerosie van keramische materialen voorkomen.

In het laatste deel wordt er dieper op de vonkerosie van ZrO₂-composieten ingegaan en wordt bekeken welke studies hierover al gebeurd zijn.

2.1. Basisprincipes vonkerosie

2.1.1. Electrical Discharge Machining

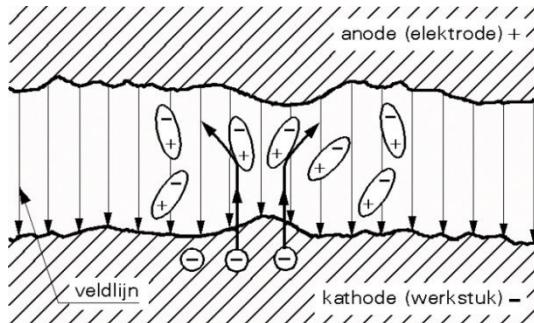
EDM of Electrical Discharge Machining is een subtractieve bewerkingsmethode waarmee harde en brosse materialen bewerkt kunnen worden. [1] Er bestaan verschillende soorten vonkerosie waaronder zinkvonken, drilling EDM, milling EDM en draadvonken, maar het principe van materiaalverwijdering is gelijklopend. Er wordt materiaal verwijderd door het aanbrengen van een elektrische ontlading tussen het gereedschap en het werkstuk.(zie Figuur 2.1-1)



Figuur 2.1-1 Basis mechanisme van vonkerosie [1]

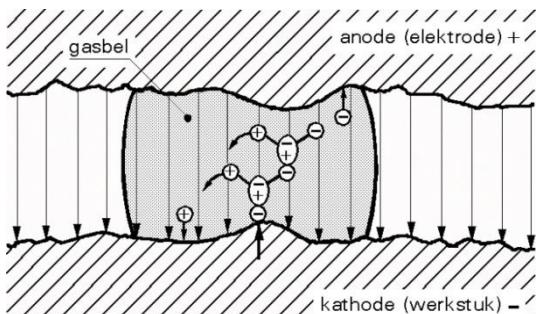
Dit gebeurt door sequentiële vonkontladingen. Het verwijderen van het materiaal gebeurd in 3 fasen die bij elke vonkontlading doorlopen worden:

De eerste fase is de ontsteekfase, waarbij door de aangelegde spanning tussen de twee elektroden een elektrisch veld ontstaat. Daar waar de hoogste veldsterkte heerst worden door de kathode elektronen(-) geëmitteerd. De elektronen verplaatsen zich naar de anode en botsen daarbij onderweg op neutrale atomen in het diëlektricum. De atomen splitsen door deze botsing op in een ion en in vele elektronen. Deze elektronen worden de secundaire elektronen genoemd. (Zie Figuur 2.1–2)

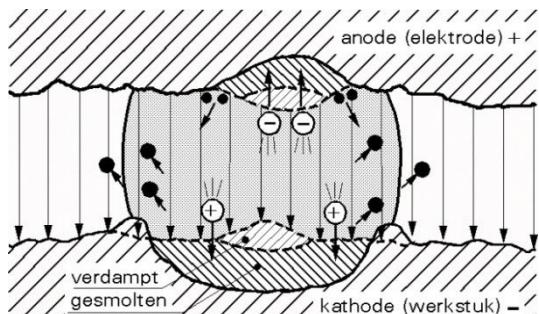


Figuur 2.1–2 Ontsteekfase [1]

De tweede fase die in het proces gebeurd is de vorming van een plasmakanaal, de ionen worden aangetrokken door de kathode en maken, door hiermee te botsen, weer nieuwe elektronen vrij (zie Figuur 2.1–3). Deze elektronen stoten opnieuw met neutrale atomen en zo ontstaat een sneeuwbaleffect die de stroom laat vergroten. Het diëlektricum gaat plaatselijk opwarmen waardoor er nog een grotere stroom gaat vloeien tussen de elektroden. Doordat deze elektronen en ionen inslaan op de elektroden warmen deze lokaal op en smelten ze (zie Figuur 2.1–4). Het smeltbad heeft een diameter van ongeveer 100 µm tot 300 µm. De erosie aan de kathode ligt hierbij wel hoger dan de erosie aan de anode, dit komt doordat de elektronenmassa veel kleiner is dan de ionenmassa.



Figuur 2.1–3 Vorming van het plasmakanaal en ontstaan van het sneeuwbaleffect [1]



Figuur 2.1–4 Smelten, verdampen en uitstoten van het materiaal [1]

In de derde fase verminderd de stroomtoevoer en het plasmakanaal implodeert. Door de plotse drukval wordt het gesmolten materiaal van beide elektroden uitgestoten en afgevoerd via het diëlektricum. Hierdoor ontstaan kraters in het oppervlak van de elektroden.

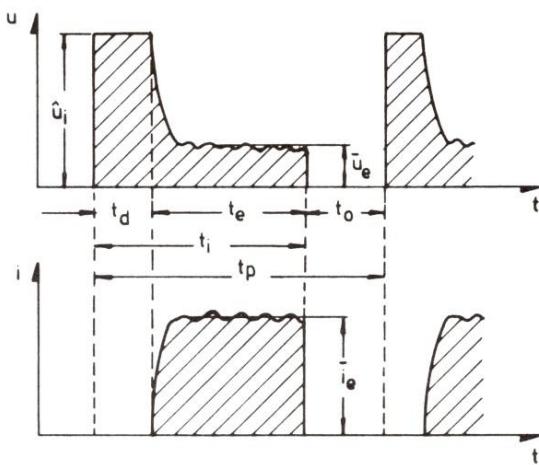
Zowel de gereedschapelekrode als het werkstuk moeten elektrisch geleidend zijn, hiervoor mag de elektrische weerstand niet groter zijn dan 100 Ωcm, ze worden beiden aanzien als elektroden. De thermische energie die vrij komt tijdens de vonkontlading zorgt voor een intense opwarming van zowel de gereedschapelekrode als het

werkstuk. Deze hitte zorgt ervoor dat van beiden materiaal gesmolten en verdampst wordt. Door een reeks van vonkonthodingen wordt het materiaal verwijderd.

Het aantal gegenereerde pulsen kan variëren tot duizenden per seconde (kHz) bij zinkvonken, terwijl dit bij draadvonken tot enkele miljoenen per seconde (MHz) kan oplopen. Doordat ook materiaal van het gereedschap wordt verwijderd, kunnen onnauwkeurigheden ontstaan op het werkstuk. Bij draadvonken speelt dit echter minder een rol doordat de draad continu vernieuwd wordt. De hoeveelheid materiaal dat van het werkstuk verwijderd wordt, wordt weergegeven door de material removal rate (MRR). De andere voornaamste parameters zijn de tool wear ratio (TWR), de oppervlakte ruwheid (R_a) van het werkstuk en de recast layer. De tool wear ratio geeft de verhouding van het volume verwijderde materiaal van het gereedschap ten op zichte van het volume verwijderde materiaal van het werkstuk. Indien er puin van het materiaal achterblijft in de werkspleet, dan stolt deze terug wat zorgt voor een Recast layer op het werkstuk. Deze laag wil men liefst zo klein mogelijk houden omdat zij vaak aanleiding geeft tot microscopische scheurtjes als gevolg van de restspanningen die zich in deze laag bevinden. De opgewarmde zone net onder de recast layer wordt de thermisch beïnvloede laag (eng. Heat affected zone (HAZ)) genoemd. Deze zone is niet gesmolten door de warmte maar wordt er wel door beïnvloed. De microscopische scheurtjes die veroorzaakt zijn in de recast layer kunnen zich doorzetten naar deze laag. De HAZ is een zachtere laag dan de rest van het materiaal wat tot een verzwakking van het werkstuk kan leiden, door het opwarmen en afkoelen van deze laag is deze harder en brosser geworden. Er wordt gestreefd om met een zo hoog mogelijke MRR een zo klein mogelijke TWR en R_a te bekomen [2]. De parameters die men hiervoor tijdens het proces kan instellen zijn de ontladingsstroom en de puls-on time. Zo ziet men dat als de ontladingsstroom vergroot men ook de MRR kan vergroten maar daarbij ook de R_a -waarde en de TWR vergroot. Een verhoging van de puls-on time zorgt dan weer voor een verhoging van de MRR, de oppervlakteruwheid en de recast laag, maar zorgt er langs de andere kant voor dat de TWR gaat dalen [3].

2.1.2. De Generator

De generator vormt een belangrijk onderdeel in het vonkersieproces. De generator levert de energiepulsen voor het proces. De tijd en de intensiteit van de pulsen kunnen hiermee dan ook ingesteld worden. Figuur 2.1-5 geeft een voorbeeld waarop de verschillende elektrische grootheden worden aangeduid. In Tabel 2.1-1 worden de verschillende grootheden benoemd.



Figuur 2.1-5 Schets van de elektrische grootheden als voorbeeld voor een statische pulsgenerator [1]

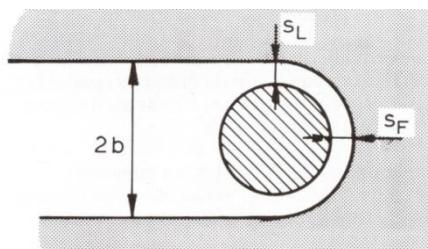
| Symbol | Benaming |
|--|-------------------------------|
| t_e | De effectieve pulsduur |
| t_d | De ontstekingsvertragingstijd |
| t_i $t_i = t_e + t_d$ | De generatorpulsduur |
| t_o | De pulsintervalijd |
| t_p $t_p = t_i + t_o$ | De pulsperiodetijd |
| f_p $f_p = \frac{1}{t_p}$ | De pulsfrequentie |
| f_e | De effectieve pulsfrequentie |
| \bar{u}_i | De open generatorspanning |
| u_e | De momentane pulsspanning |
| i_e | De momentane pulsstroom |
| W_e $W_e = \int_0^{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt = \bar{u}_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$ | De pulsenergie |
| P_e $P_e(t) = u_e(t) \cdot i_e(t)$ | Het momentaan pulsvermogen |
| \bar{u}_e | De gemiddelde pulsspanning |
| \bar{i}_e | De gemiddelde pulsstroom |
| U | De gemiddelde werkspanning |
| I | De gemiddelde werkstroom |
| A/cm^2 | De maximale stroomdichtheid |

Tabel 2.1-1 belangrijkste elektrische grootheden voor de generator [1]

2.1.3. Draadvonken: Vonkspleet en offset

Het proces dat gebruikt word voor de experimenten in de thesis is draadvonkerosie, het voordeel hiervan is dat de draad continu vernieuwd wordt en er geen rekening met de slijtage van de gereedschapelektrode moet gehouden worden. Door de continue vernieuwing kan de draad als kathode gebruikt worden en het werkstuk als anode waardoor het werkstuk nauwkeuriger afgewerkt kan worden dan bij andere vormen van vonkerosie.

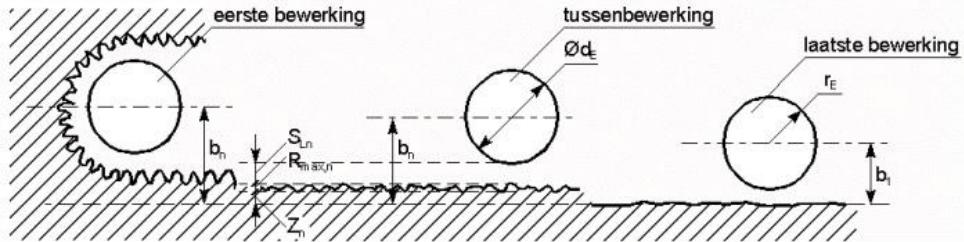
Een zeer belangrijke parameter bij het draadvonken is de vonkspleet en de offsetwaarde. [1] De vonkspleet is de zone tussen het werkstuk en de draadelekrode waarin zich de vonkontladingen voordoen tijdens het proces. Figuur 2.1-6 geeft de vonkspleet weer bij het draadvonken, S_F geeft de frontale spleet weer gemeten in de voedingsrichting, S_L geeft de zijspleet weer, deze staat loodrecht op de voedingsrichting. De snijbreedte van de draad wordt weergegeven door $2b$.



Figuur 2.1-6 Vonkspleet bij het draadvonken [1]

Bij het programmeren van de vonkbanen moet met de vonkspleet en de draaddiameter rekening gehouden worden. Om de gewenste dimensie te verkrijgen moet aan het middelpunt van de draadelekrode een offset (b_n) gegeven worden die de vonkspleet en draaddiameter compenseert. Er wordt in verschillende stappen gevonden. Bij elke finiseerstap wordt de offset dan ook kleiner zodat de gewenste dimensie zo goed mogelijk bereikt kan worden. Figuur 2.1-7 geeft de verschillende grootheden weer die mee de offset bepalen. De offset kan berekend worden met volgende formule:

$$b_n = r_E + S_{Ln} + R_{max,n} + Z_n \quad [1]$$



Figuur 2.1-7 Grootheden die mede de offset bepalen [1]

r_E = de straal van de draadelekrode

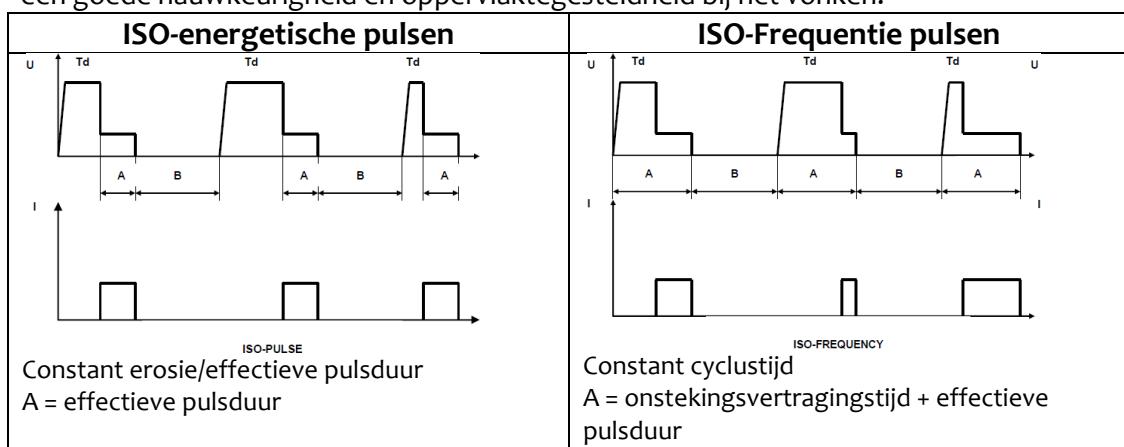
S_{Ln} = de zijspleet bij de n-de snede

$R_{max,n}$ = de grootste oppervlakteruwheid in de zijspleet van de n-de snede

Z_n = bewerkingstoegift (afhankelijk van HAZ) $\geq \frac{1}{2} R_{max,n}$

2.1.4. Iso-energetische pulsen versus iso-Frequentie pulsen

Bij vonkerosie met de charmilles 240cc kan gekozen worden tussen iso-energetische pulsen en iso-frequentie pulsen. Bij de iso-energetische pulsen is de energie die geleverd wordt tijdens de vonkontlading steeds dezelfde, dit wordt gecontroleerd door het servosysteem die de vonkspleet constant houdt. De snelheid waarbij met iso-energetische pulsen gevonden wordt varieert, t_o en t_i worden constant gehouden maar t_d kan variëren, de open generatorspanning is hoog tot er een vonk optreedt. Het opmeten van de vonkspleet wordt dan ook bepaald met t_d . De iso-energetische pulsen zorgen voor de vorm bij het vonken. Bij iso-frequentie pulsen blijft de snijnsnelheid constant, ongeacht of er een vonkdoorslag is of niet. Na t_i wordt het vermogen gewoon onderbroken, zelfs indien er geen vonkdoorslag was. Hierdoor is er bij iso-frequentie pulsen een variabele effectieve pulsduur. De iso-frequentie pulsen zorgen hierdoor voor een goede nauwkeurigheid en oppervlaktegesteldheid bij het vonken.



Figuur 2.1-8 Grafische voorstelling voor Iso-energetische pulsen versus iso-Frequentie

2.2. Wat zijn keramische materialen en composieten van keramische materialen

Keramische materialen worden bij veel toepassingen ingezet wegens hun goede mechanische eigenschappen. Zo hebben ze een hoge hardheid, zijn ze slijtage- en corrosiebestendig, hebben een lage densiteit en zijn thermisch stabiel. Ze kunnen in vele sectoren ingezet worden voor zowel statische als dynamische toepassingen. Zo worden technische keramische materialen bijvoorbeeld gebruikt als slijtvaste onderdelen en gereedschappen, medische implantaten esthetische onderdelen, enz. .

2.2.1. Materiaaleigenschappen van keramieken

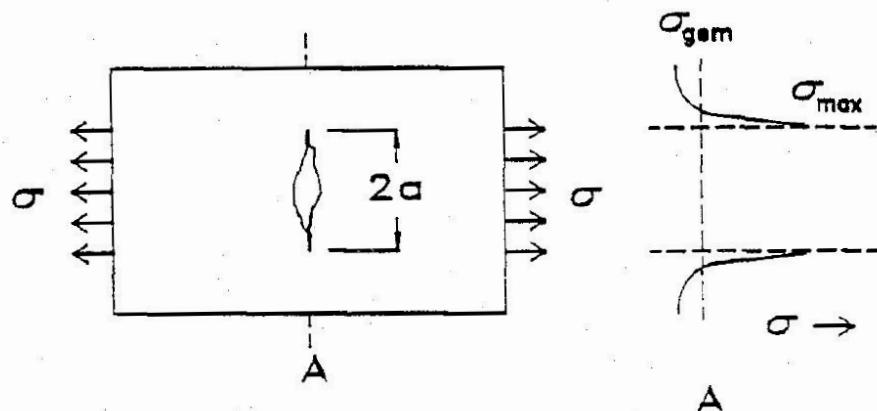
In Tabel 2.2-1 zijn de materiaaleigenschappen te vinden van de meest gebruikte technische keramische materialen, en ter vergelijking een veelgebruikte staalsoort (S275JR). In de hierop volgende alinea's wordt meer uitleg gegeven over enkele eigenschappen die vermeld staan in de tabel, en mee bepaald over de scheurgroeiweerstand, de buigsterkte en de hardheid.

| Materiaaleigenschappen | B ₄ C | SiC | Al ₂ O ₃ | Si ₃ N ₄ | ZrO ₂ | S275JR |
|--|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|-----------------------|
| Densiteit (g/cm ³) | 2,5 | 3,1 | 4 | 3,2 | 5-6 | 7,8 |
| Vickers Hardheid | 3000 | 2600 | 1800- | 1500- | 1100- | 122- |
| *Brinell hardheid | | | 2000 | 1600 | 1300 | 166,5* |
| Scheurgroeiweerstand (MPa √m) | 2,5 | 3-5 | 3-4 | 4-6 | 8-12 | 275* |
| *Vloegrens (MPa) | | | | | | |
| Buigsterkte (Mpa) | 350-400 | 400-600 | 300-500 | 700-850 | 500-1000 | 410-560* |
| *trekspanning (MPa) | | | | | | |
| Weibul Modulus | 10-12 | 10-18 | 8-12 | 18 | 10 | - |
| Young Modulus (Mpa) | 450 | 400-450 | 350-400 | 310 | 200 | 210000 |
| Thermische expansie 10 ⁻⁶ K ⁻¹ | 5,6 | 4,5-8 | 7-8 | 3,2 | 10 | 11 |
| Thermische geleidbaarheid(W/mK) @RT | 40-90 | 80-120 | 25-35 | 30-40 | 1,5-2 | 50 |
| Electrische weerstand (Wcm) @20°C | 0,1-10 | 1-5 | >10 ¹⁴ | >10 ¹⁴ | >10 ¹⁰ | 12,5*10 ⁻⁹ |
| Note | High hardness, wear resistance | High Temp. Resistance | Combination of properties, Abrasive | Good mech. Properties | Excellent Mech. Properties, thermal insulator | |

Tabel 2.2-1 Materiaaleigenschappen van de belangrijkste keramieken en een veelgebruikte staalsoort [1]

2.2.1.1: Scheurgroeiweerstand

Keramische materialen zijn brosse materialen, ze zijn zeer moeilijk plastisch vervormbaar. Dit heeft nadelen bij scheurvorming [4], een scherpe kerf gaat scherp blijven en dit zorgt uiteindelijk bij een bepaalde belasting voor een uitbreiding van de scheur. Dit in tegenstelling tot metalen die wel plastisch vervormbaar zijn. Deze gaan bij een verhoging van de spanning eerst塑性形变 en van de scherpe scheur een botte scheur maken waardoor deze niet verder gaat scheuren.



Figuur 2.2-1 Scheurinitiatie op een dunne plaat [4]

In Figuur 2.2-1 wordt de spanning weergegeven die ervoor kan zorgen dat de scheur gaat groeien. De spanningsverdeling bij de scheurtip kan gegeven worden door:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{a} \quad [4]$$

K_I is hierbij de spanningsintensiteitsfactor, σ is de aangelegde spanning loodrecht op de scheur met een lengte $2a$ en Y is een constante die afhangt van de geometrie van de scheur en zijn plaats in het materiaal. Indien het product van de aangebrachte spanning en de scheurlengte een bepaalde grootte hebben bereikt waarbij de scheur instabiel gaat groeien dan is de scheurgroeiweerstand K_{IC} bereikt. K_{IC} heeft als eenheid $\text{MPa}\sqrt{m}$.

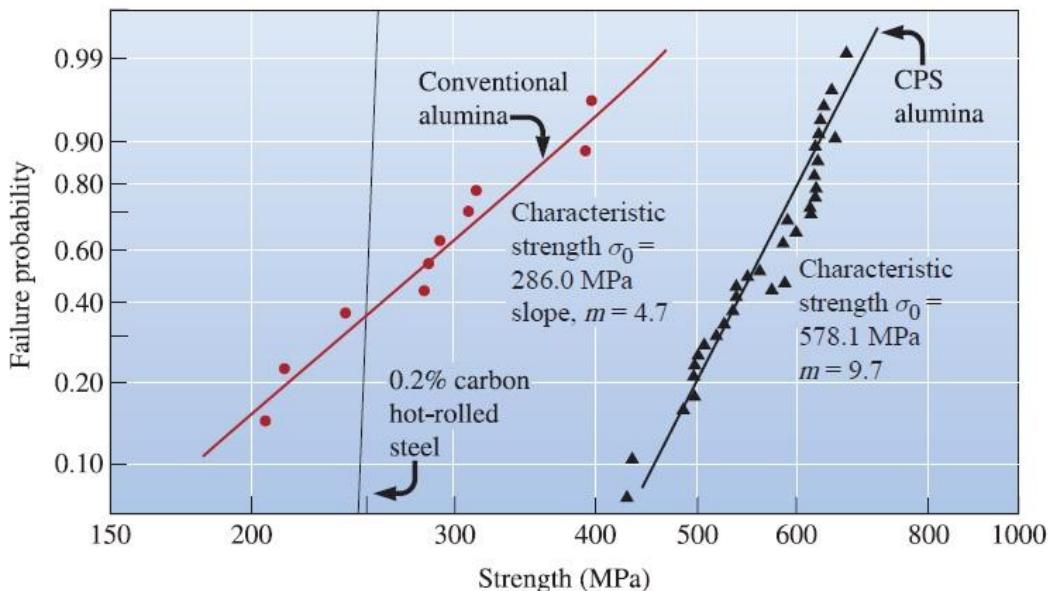
2.2.1.2. Weibull

Bij keramische materialen moet men uitgaan van een bepaalde faalkans of levensduur van het materiaal onder de gestelde belastingcondities. Hiervoor kan de Weibull-verdeling gebruikt worden, deze wordt ook wel eens “de zwakste schakel theorie” [5] genoemd omdat ze stelt dat een bepaald volume onder een uniforme spanning bezwijkt bij het grootste defect. Het is een continue verdeling die de kans op falen geeft bij een bepaald spanningspatroon. De kans op falen kan gelinkt worden aan een bepaalde spanning door de volgende formule:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-P} \right) \right] = m \ln(\sigma_f) \quad [6]$$

Waarbij P de kans op falen is, σ_f is de spanning waar het materiaal faalde en m de weibull modulus. De Weibull modulus heeft voor keramische materialen meestal waarden tussen 5 (slecht) en 25 (goed), het geeft een maat weer voor de spreiding van de sterkte. Indien de Weibull modulus en de karakteristieke sterkte van een keramisch materiaal bekend is, kan hieruit met de Weibullverdeling de faalkans berekend worden. De karakteristieke sterkte wordt bij keramische materialen bepaald met een buigtest, omdat deze veel beter bestand zijn tegen drukkrachten dan tegen trekkrachten. Deze statistische benadering gaat er wel van uit dat de defectenverdeling over alle gelijk bewerkte componenten dezelfde is en dat ze aan dezelfde soort spanning blootstaan, hetgeen in de praktijk echter niet het geval is.

In de Weibull-grafiek heeft degene met de meeste spreiding de kleinste helling. Voor een verticale helling, dus een helling gelijk aan ∞ , geldt dat er geen spreiding zit op de spanning. De component gaat dan altijd bij eenzelfde spanning falen. Een voorbeeld van een weibull-grafiek kan gevonden worden in Figuur 2.2-2. In deze grafiek zijn twee weibull-plots te zien van alumina, de rode plot is alumina gemaakt op de klassieke manier, de zwarte plots is alumina gemaakt met extra kleine poeder partikels. Uit de grafiek is af te lezen dat de geavanceerde alumina zowel sterker als betrouwbaarder is dan de klassieke alumina. De derde grijze plot die te zien is, is deze van laaggelegeerd staal. De plot toont aan dat staal betrouwbaarder is dan het alumina, maar het gaat falen bij een veel lagere sterkte dan het geavanceerde alumina.



Figuur 2.2-2 Grafiek van een Weibull-plot voor Alumina dat geproduceert werd door twee verschillende methoden en in vergelijking met laag koolstofstaal [6]

2.2.1.3. Vickers hardheid

Waar bij metalen vaak een Brinell hardheidsmeting wordt gebruikt, wordt bij harde materialen zoals keramische materialen een Vickers hardheidsmeting uitgevoerd. De specificaties voor de test zijn te vinden in Figuur 2.2-3 en Figuur 2.2-4.

Proefkrachten voor hardheidsmeting volgens Brinell

| Kogeldia- meter D in mm | Mate- riaal- dikte in mm | Proefkrachten F in N voor belastingsgraad | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------|
| | | 30 voor staal, GG ²⁾ | 10 voor non-ferro- legeringen | 5 voor Al, Zn, Cu | 2,5 voor lager metaal | 1 voor Pb, Sn |
| 10 | > 6 | 29 420 | 9870 | 4903 | 2452 | 981 |
| 5 | 2...6 | 7355 | 2452 | 1226 | 613 | 245 |
| 2,5 | 1,5...3 | 1839 | 613 | 305,6 | 153,2 | 61,3 |
| 1 | <1,5 | 294 | 98 | 49 | 24,5 | 9,8 |

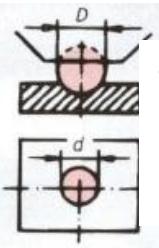
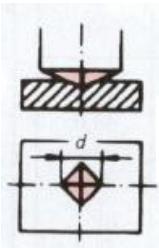
²⁾kogel-Ø10; 5; 2,5

Belastingsgraad: $0,102 \frac{F}{D^2}$

Hardheidsmeting volgens Vickers

| Macrobereik | | Bereik voor kleine belasting | |
|-------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Proef-voor-waarde | Proef-kracht F in N | Proef-voor-waarde | Proef-kracht F in N |
| HV 5 | 49,03 | HV 0,2 | |
| HV 10 | 98,07 | HV 0,3 | |
| HV 20 | 196,1 | HV 0,5 | |
| HV 30 | 294,2 | HV 1 | |
| HV 50 | 490,3 | HV 2 | 19,61 |
| HV 100 | 980,7 | HV 3 | 29,42 |

Figuur 2.2-3 Proefkrachten gebruikt gedurende de hardheidsmeting [7]

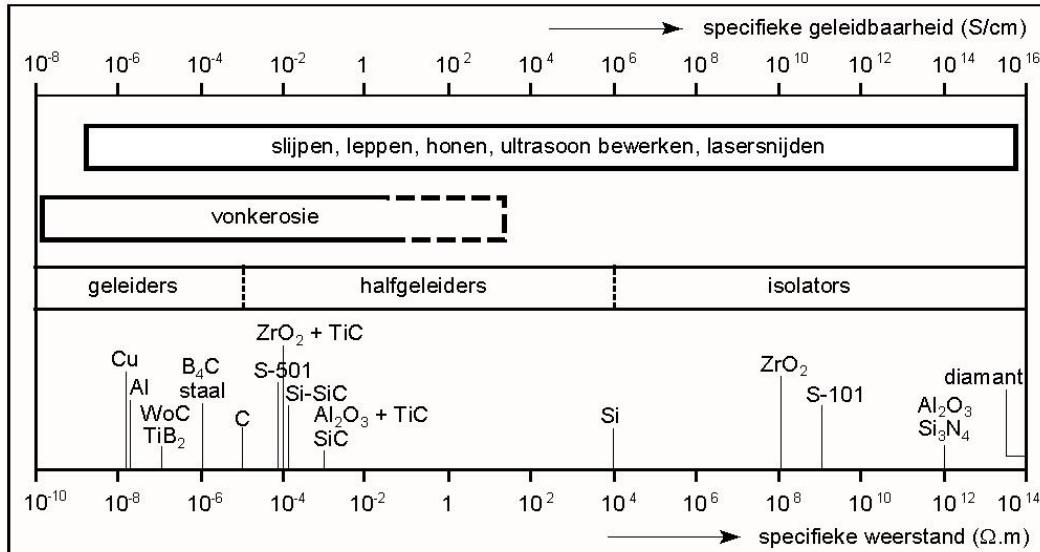
| | | |
|-----------------|--|--|
| Methode | NBN DIN EN ISO 6506-1:2006-03  aan te houden: $d = 0,24 \dots 0,6D$ $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ Brinell HBW | NBN DIN EN ISO 6507-1:2006-03  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ Vickers HV |
| Proeflichaam | Hardmetalen kogel $\varnothing 1;2,5;5;10$ mm | Diamenten piramide Tweevlakshoeken 136° |
| Meetwaarde | Diameter d van de bolkap | Diagonaal van de indruk d |
| Proefkracht | Zie tabel bovenaan | 49N... 980N Zie tabel bovenaan Proefgewicht voor kleine belasting 1.96... 49N |
| Inwerkingsstijd | 10... 15s;30s of volgens afspraak | 10... 15s;30s of volgens afspraak |
| Formule | Op de proeftoestellen worden de proefkrachten som nog in kg Brinellhardheid HBW $HBW = \frac{0.102 * F}{A}$ 0.102 = constant $A = \frac{D^2 * \pi}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ A = indrukoppervlakte in mm ² F = proeflast in N | Vickershardheid (HV) $HV = \frac{0.102 * F}{A} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2}$ 0.102 = constant $A = \frac{d^2}{1.854}$ A = indringoppervlakte in mm ² F = proeflast in N |
| Toepassing | Voor alle materialen die zachter zijn dan gehard staal: Al, Cu, St, GG,... | Voor harde en zachte materialen, bovendien ook voor folies, structuuronderzoek, hardheidsverloop,... |
| Normalisatie | 600 HBW 1/30/20ⁱ) 600 = Brinellhardheid HBW = Hardheidsaanduiding 1 = kogeldiameter 30 = 294N = Proefkracht 20 = inwerkingsstijd in seconden | 640 HV 30/20ⁱ) 640 = hardheidswaarde HBW = Hardheidsaanduiding 30 = 294N = Proefkracht 20 = inwerkingsstijd in seconden |

ⁱ) De genormaliseerde inwerkingsstijd 10... 15 s moet niet opgegeven worden.

Figuur 2.2-4 Genormaliseerde hardheidstesten voor harde en zachtere materialen [7]

2.2.2. Keramische composieten

Om vonkerosie te kunnen uitvoeren bij keramische materialen moet de elektrische weerstand ervan lager zijn dan $100\Omega\text{cm}$. Niet alle keramische materialen zijn geleidbaar. Vele van deze keramische materialen zijn zeer goede isolatoren. (zie Figuur 2.2-5) [1]



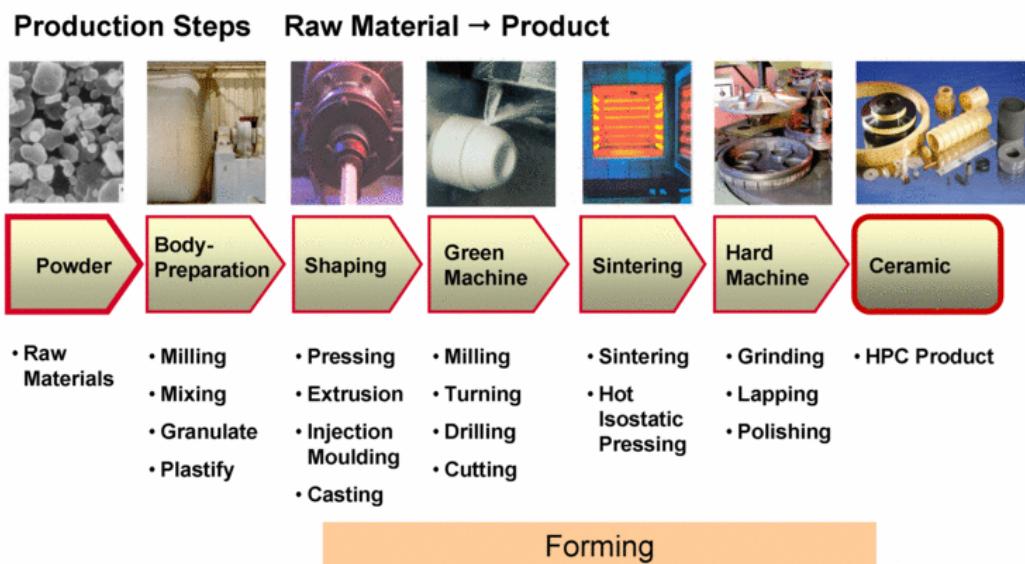
Figuur 2.2-5 Van de specifieke geleidbaarheid en weerstand voor materialen en materiaalgroepen [1]

Hierover is al onderzoek geweest naar verschillende methoden om vonkerosie uit te kunnen voeren op keramische materialen [8] [9] [10]. Er bestaan een aantal geavanceerde keramische materialen die op zichzelf al een elektrische weerstand minder dan $100\Omega\text{m}$ hebben. Voor meer isolerende keramische materialen moet aan het materiaal een tweede, elektrisch geleidende fase (TiN , WC , TiB_2 , TiCN , enz.) toevoegen om zo een geleidend keramisch composiet te bekomen dat door vonkerosie bewerkt kan worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met de mechanische eigenschappen die bewaard moeten worden. Ti_3SiC_2 is zo een geavanceerd keramisch materiaal dat de eigenschappen van keramieken en metalen combineert [8]. Het materiaal heeft een hoge modulus, een lage densiteit, een goede thermische geleidbaarheid (35 W/m K) en elektrische geleidbaarheid ($9,6 \times 10^{-6}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$), het is uitstekend schokbestendig en heeft een hoge temperatuur oxidatie weerstand. Het is een zeer goed materiaal om te gebruiken bij ingenieurs toepassingen zoals turbinebladen, elektrische contacten onder hoge belasting, lagers, enz. Hoewel het materiaal zich zeer goed laat bewerken door vonkerosie blijven er toch nog een aantal nadelen spelen. Er treden oppervlaktebeschadigingen op na de bewerking onder de vorm van microscopische scheurtjes en losse korrels in het suboppervlak. Dit zorgt voor een sterke reductie van ongeveer 25%. De diepte van de beschadigingen is ongeveer $10\text{-}15\mu\text{m}$, zodat het werkstuk nog nabewerkt zou moeten worden door polijsten of slijpen om de beschadigde oppervlakte te verwijderen. Dit verhoogt dan weer de bewerkingstijd en is minder efficiënt.

2.3. Conventionele bewerkingsmethoden

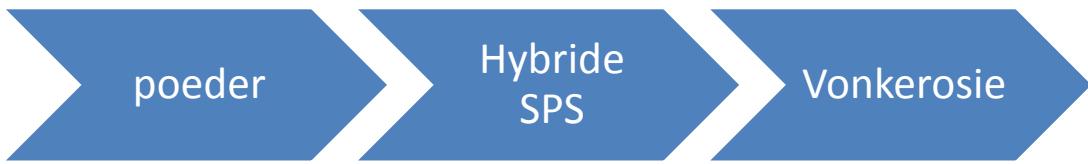
2.3.1. Near Net Shape

Een veel gebruikte methode om keramische materialen te bewerken is door deze te bewerken als ze nog in een zachte toestand zijn. In Figuur 2.3-1 is het productieproces te vinden dat doorlopen wordt indien met conventionele bewerkingsmethoden gewerkt wordt. Het ruwe keramische materiaal in poedervorm wordt eerst klaargemaakt om vorm te kunnen geven. Dit houdt in dat het materiaal nog gemixt kan worden met additieven die het latere sinteren of bewerken vergemakkelijken. Na het vormgeven door middel van extrusie, spuitgieten, persen of gieten kan het product in zachte toestand bewerkt worden door green-machining technieken. Green machining kan het frezen, snijden of draaien van het zachte werkstuk zijn. Na deze bewerking wordt het werkstuk gesinterd, dit kan bv in een oven onder druk of door Conventioneel SPS(spark plasma sintering). Bij dit laatste hard het materiaal door middel van Jouleopwarming, als gevolg van een stroom die door een cilindrische drukpers (pressing die)(bestaande uit grafiet) en door het compacte voorgevormde poedermateriaal gaat [11]. Als laatste kan het werkstuk na het sinteren eventueel bijgewerkt worden door middel van slijpen, leppen, polijsten of schuren, hierbij zijn wel speciale technieken vereist vermits het materiaal al zijn harde eigenschappen bekomen heeft, meer hierover is te vinden in alinea 2.3.2. Het gehele productieproces om harde materialen te produceren met behulp van conventionele bewerkingsmethoden is zeer arbeidsintensief en neemt veel tijd in beslag.



Figuur 2.3-1 Productie-proces keramische materialen met de conventionele bewerkingsmethoden [12]

In Figuur 2.3-2 is het productieproces voor keramische materialen te zien door middel van vonkersie, met maar 3 productiestappen die doorlopen moeten worden biedt dit een zeer goed alternatief. Het keramische materiaal voor het draadvonken wordt gemaakt door hybride SPS en dit vertrekende vanuit het keramische materiaal in poedervorm. Hybride SPS verschilt van conventioneel SPS in die zin dat het zowel Joule- als inductieve opwarming gebruikt om een gelijke warmte verdeling te verzekeren van het midden van de schijf tot aan de rand [13]



Figuur 2.3–2 Productie-proces keramische materialen door middel van vonkerosie

2.3.2. **Slijpen**

Keramische materialen kunnen in harde vorm bewerkt worden door middel van slijpen gebruik makend van met diamanten of cBN (cubic boron nitride) bekledde gereedschappen. Deze methode wordt vooral gebruikt bij het maken van medische implantaten. Slijpen is een methode die vaak gebruikt wordt bij bewerkingen waarbij een hoge dimensionele nauwkeurigheid en precisie nodig zijn. De hoge hardheid van het keramische materiaal zorgt voor een hoge gereedschapsslijtage. Dit zorgt ervoor dat de materiaalafname tijdens het slijpen onstabiel is. Wat resulteert in onnauwkeurige materiaalafname en slechte oppervlaktekwaliteit. Hierdoor wordt de levensduur van het gereedschap gereduceerd en de gereedschapskost verhoogd. Door de voortdurende gereedschapswissel wordt de bewerkingstijd eveneens verlengd.

Verschillende onderzoeken om dit op te lossen zijn reeds gebeurd. Wegener K. et al [14] bekijkt de verschillende conditioneringgereedschappen voor de slijpgereedschappen. Figuur 2.3–3 geeft het gebruik weer van de verschillende methodes in de industrie en daarnaast hoeveel onderzoek er naar gedaan word. ELID-grinding is daarbij een goede manier is om keramische materialen te bewerken. ELID-grinding kan gebruikt worden voor hoge-precisie slijpen waarbij een zeer lage oppervlakteruwheid, Ra lager dan 1nm, en een hoge glans bereikt willen worden. Door elektrolytisch in-process dressing(ELID) wordt het gereedschap gedurende de bewerking opnieuw gedresseerd. ELID zorgt voor een stabieler procesverloop en heeft een positief effect op de materiaalafname.

| | Method | Application in industry | Research activity | Application potential |
|------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| Mechanical | Fixed dressing tool | ++ | + | ++ |
| | Rotating dressing tool | ++ | + | ++ |
| | Abrasives water jet | - | + | - |
| | Slurry | - | - | + |
| Thermal | Tangential laser radiation | - | ++ | ++ |
| | Radial laser radiation | - | ++ | ++ |
| | WEDD | + | ++ | ++ |
| | SEDD | + | ++ | + |
| | ECDD | + | ++ | + |
| | ECDM | + | + | + |
| | ELID | ++ | ++ | ++ |
| & ECM | ECCD | + | + | + |
| | Photocatalyst | - | - | - |
| | US assisted dressing | - | + | + |
| | Laser assisted dressing | - | ++ | + |
| Hybrid | DEDD | - | + | + |

Figuur 2.3–3 Industrial penetration and research potential of different conditioning [14]

Daarnaast zijn er de mechanische methoden met vaste en ronddraaiende dresseergereedschappen. Hierbij kunnen we uit Figuur 2.3–3 opmaken dat deze methode in zijn maturiteitsfase is geraakt en hier verder nog weinig onderzoek naar gedaan wordt.

Slijpen zou een goede methode zijn om op ZrO₂-gebaseerde materialen te bewerken. Doordat er echter een grote gereedschapsslijtage is blijft het een tijdrovende en dure bewerkingsmethode. Ook al zijn er assisterende methoden die het gereedschap scherp houden, dit vraagt nog steeds een uitbreiding van de huidige slijpmachines die een extra kost met zich meebrengt.

De kostprijs van het slijpen van keramische materialen is nog steeds 80% van de gehele kostprijs van het productieproces.

2.4. Vonkerosie van keramische materialen

Door de hoge sterkte en taaïheid van keramische materialen is het bewerken hiervan met conventionele technologieën zeer ingewikkeld en duur [15]. Zeker indien complexe onderdelen gemaakt moeten worden.

2.4.1. Vonkerosie van isolerende keramische materialen

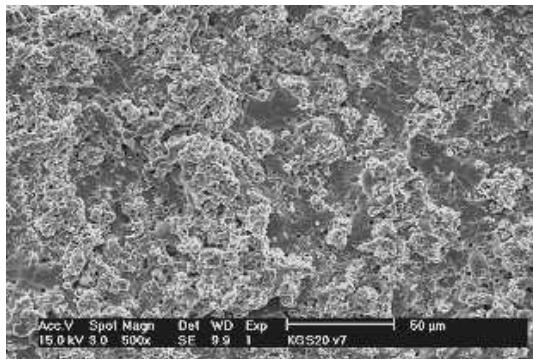
Vonkerosie zorgt hierbij voor een aantrekkelijk alternatief voor de bewerking van keramische materialen. Isolerende keramische materialen kunnen bewerkt worden met vonkerosie door gebruik te maken van een assisterende elektrode [9]. De assisterende elektrode bestaat meestal uit een goed geleidend metaal dat tegen het keramische materiaal wordt bevestigd en hier goed contact mee maakt. De assisterende elektrode zorgt voor de start van het vonkerosie proces. Door in een diëlektricum van olie te werken ontstaat er bij vonkerosie van de assisterende metaalelektrode een laag gekraakte koolstof op het oppervlak van het keramisch materiaal. Samen met de losgekomen deeltjes van de elektrode houdt dit het oppervlak van het keramisch materiaal geleidend gedurende de bewerkingstijd. Het nadeel is dat deze geleidende laag na de bewerking op het keramisch materiaal aanwezig blijft en ervoor zorgt dat het materiaal niet meer nabewerkt kan worden.

2.4.2. Material Removal Mechanism (MRM) bij geleidende keramische materialen

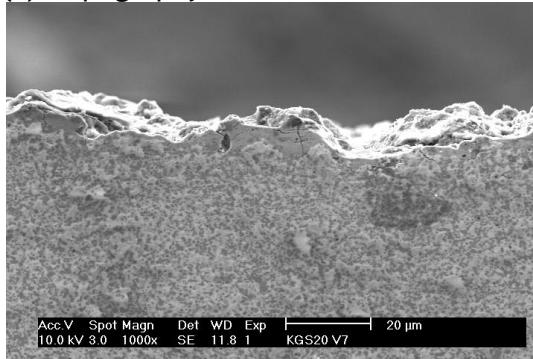
Waar bij metalen enkel sprake is van smelten en verdampen bestaan er bij keramische materialen naast het smelten en verdampen van het materiaal ook andere materiaalafnamemechanismen zoals spalling en oxidatie/decompositie [16].

2.4.2.1. Smelten – verdampen

Bij het smelten en verdampen wordt het materiaal van het werkstuk verwijderd door middel van smelten en verdampen van het materiaal onder invloed van de vonkerosie. Het materiaal wordt in het plasmakanal gesmolten en uiteindelijk verdamt. Onder de microscoop kan dit gezien worden doordat vele druppels op het gedraadvonkt oppervlak zijn achtergebleven. Zoals te zien is op Figuur 2.4-1



(a): Topography



(b): Cross section

EDM parameters (Wire EDM, rough cutting mode): ui: -120V, te: 2.4 ms; to: 15 ms

Thickness of monster: 5 mm

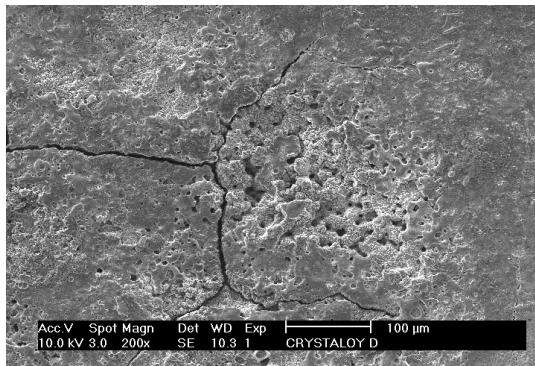
Ra: 2.71 μm / Material Removal Rate: 30.3 mm²/min

[Figuur 2.4-1 Topography and cross section of ZrO₂-TiN by Wire EDM \(roughing condition\) \[16\]](#)

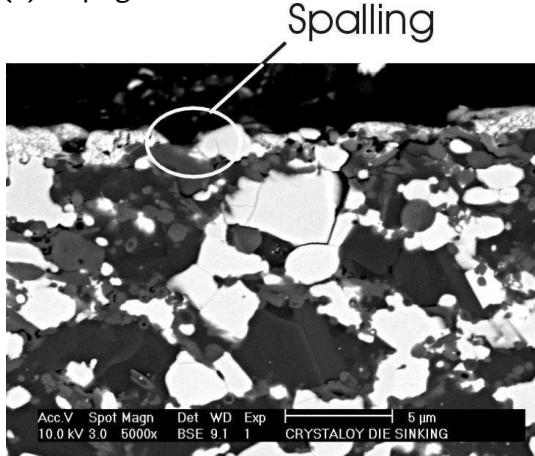
De oppervlakte- en suboppervlaktekwaliteit zijn zeer complex en hangen niet enkel af van de generator settings maar ook van de materiaaleigenschappen zoals het smeltpunt, thermische geleidbaarheid, breuktaaiheid,...

2.4.2.2. Spalling

Spalling [17] is een snelle maar ruwe manier waarop materiaal kan verwijderd worden bij EDM. Het materiaal wordt hierbij niet verwijderd door smelten en verdampen maar doordat er breuken ontstaan onder invloed van thermische schokken. Het materiaal wordt verwijderd in de vorm van grote vlokken. Hierdoor ontstaat een hogere MRR en daarbij ook een grotere proces efficiency. Het proces wordt bekomen door een voldoende krachtige en zeer hoge warmteafgifte tijdens de elektrische ontlading. De totale energie is hierbij wel lager dan de energie die nodig is bij conventionele vonkersie. Een goede homogeniteit van het keramische materiaal is vereist, de elektrisch geleidende deeltjes die aan het keramische materiaal worden toegevoegd moeten goed verspreid zitten. Het begin van de scheurtjes ontstaat vaak aan deze dispersoïden waar de resulterende spanningsconcentratie lokaal de treksterkte van het materiaal overschrijdt. Er ontstaan verticale en horizontale scheurtjes net onder het oppervlak die vrijwel parallel lopen met het vonkgeërodeerde oppervlak. Door deze scheurtjes worden er dan vlokken gevormd die verwijderd worden. Doordat er een zeer ruw oppervlak achter blijft is deze methode goed om een werkstuk ruw te bewerken, echter zal het werkstuk nog nabewerkt moeten worden. Figuur 2.4-2 geeft een voorbeeld weer van spalling bij het zinkvonken van Al₂O₃-Si_w-TiC waarbij een hoge energie input gebruikt wordt. De microscopische scheuren zijn hier duidelijk zichtbaar.



(a): Topografie



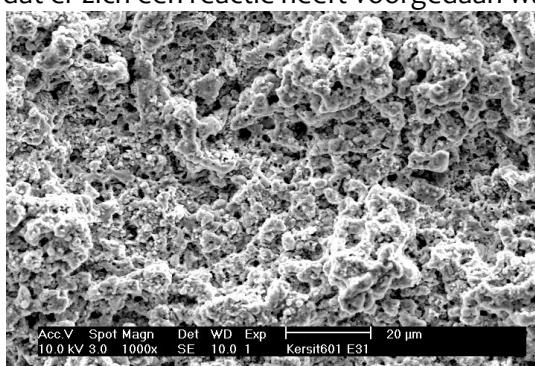
(b): Doorsnede

Vonkersie parameters (ruwheidsmodus, hoge energie input): ui: 250V, ie: 72A, te: 7.5 ms; to: 18 ms

[Figuur 2.4-2 Topografie en doorsnede van Al₂O₃-SiCw-TiC door zinkvonken in olie \[16\]](#)

2.4.2.3. Oxidatie en decompositie

Oxidatie en decompositie, is het verwijderen van materiaal door een oxidatie en decompositie. Er wordt aan het oppervlak een schuimige en poreuze laag gevormd. Figuur 2.4-3 geeft hiervan een voorbeeld weer. De zwarte poriën geven duidelijk weer dat er zich een reactie heeft voorgedaan waarbij gassen zijn ontsnapt.



Topografie

Vonkersie parameters (ruwheidsmodus):

ui: -160V, te: 2.8 ms; to: 2.3 ms

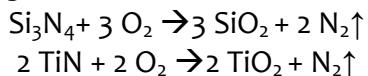
Dikte van het monster: 35 mm

Ra: 3.62 μm, MRR: 82 mm²/min

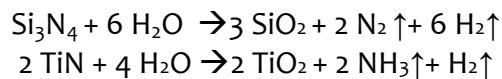
[Figuur 2.4-3 Topografie van Si₃N₄-TiN door draadvonken in gedemineraliseerd water \[16\]](#)

De schuimige structuur wordt veroorzaakt door de vele gasballen die vrijkomen tijdens bijvoorbeeld het draadvonken van Si₃N₄-TiN. De gasballen worden geproduceerd door

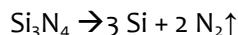
de oxidatie/decompositie van Si_3N_4 -TiN die geïnduceerd werd door de thermische energie van het vonkproces. Er kunnen zich verschillende oxidatieprocessen voordoen. Een eerste set reacties kan gegeven worden door:



Een tweede set van oxidatie reacties komen vooral voor in een waterig medium en onder hoge druk:



De decompositie van Si_3N_4 kan gegeven worden door volgende reactie bij een temperatuur boven 1700 °C:



De oxidatie/decompositie reactie zorgt voor een hogere MRR van Si_3N_4 -TiN bij draadvonken in gedemineraliseerd water. Tegelijkertijd zorgt dit ook voor een hogere oppervlakteruwheid.

Lauwers B. et al [16] stelt dat bij vonkerosie van composieten op basis van ZrO_2 , bv. ZrO_2 -TiN, er geen bewijs is dat er nog andere manieren van materiaalverwijdering voorkomen dan smelten en verdampen zoals spalling. Dit komt wellicht door de grotere breuktaaiheid van ZrO_2 in vergelijking met de andere keramische materialen. Indien men echter nano-composieten op basis van ZrO_2 wil bewerken, bv. ZrO_2 -TiCN [18], gaat er wel rekening moeten gehouden worden met spalling, dit komt doordat nano-composieten een kleinere thermische geleidbaarheid hebben. De temperatuurgradiënt tot het onbewerkte materiaal wordt hierdoor te groot waardoor spalling optreedt. Door te kiezen voor een goede stabilisator kan dit vermeden worden.

Oxidatie-reacties van ZrO_2 komt dan weer voor bij ZrO_2 -WC [19]. De reactie kan als volgt weergegeven worden:



2.5. Vonkerosie van op ZrO_2 gebaseerde keramieken

Een algemene studie over het materiaalverwijderings-mechanisme van ZrO_2 door middel van EDM is terug te vinden bij Lauwers B. et al [16]. Alle artikels die momenteel gevonden kunnen worden gaan over EDM van ZrO_2 op laboschaal, dit wil zeggen dat de maximale hoogte die bij deze studies bewerkt wordt 5mm bedraagt.

De invloed van de tweede elektrische fase op het bewerksproces wordt in verschillende papers onderzocht [20] [21]. Bij K. Bonny et al [21] is ook het bewijs te vinden dat een verhouding van 60vol.% ZrO_2 en 40 vol.% WC, $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ of TiN aanbevolen wordt om te kunnen draadvonken met gedemineraliseerd water. B. Lauwers et al [18] stellen dat de korrelgrootte van de elektrisch geleidende fase er ook toe doet. In het algemeen kan aangenomen worden dat een fijnere microstructuur leid tot een lagere thermische geleidbaarheid en dus zorgt voor een hogere snijsnelheid voor materialen waar het verwijderingsmechanisme smelten is. Deze trend wordt echter niet gevuld door ZrO_2 -WC waarbij het omgekeerde geldt, dit doordat ZrO_2 -WC nog een ander verwijderings-mechanisme kent buiten smelten, namelijk het verwijderen van materiaal door middel van chemische reacties.

De invloed van vonkerosie op het gedrag van ZrO_2 -gebaseerde composieten werd algemeen bestudeerd door Y. Perez Delgado et al [22], meer specifieke studies werden

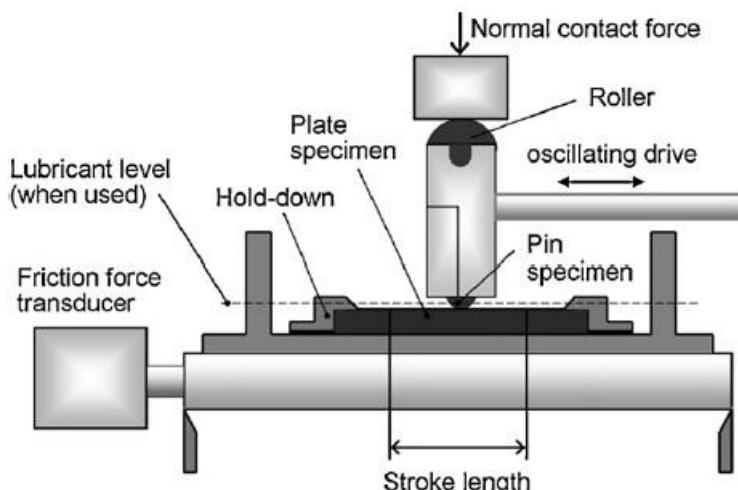
uitgevoerd voor ZrO₂-TiN [23] en ZrO₂-WC [24]. Bij al deze studies kon een aantasting van het oppervlak door EDM waargenomen worden, dit onder de vorm van een recast layer, een door warmte aangetaste sub-oppervlakte laag en microscopische scheurtjes.

Bij elke studie waar de ruwheid getest werd met meerdere sneden verbeterde de ruwheid met het aantal sneden (zie Tabel 2.5-1) en dit voor elk ZrO₂-composiet.

| Aantal sneden | ZrO ₂ -WC | ZrO ₂ -TiCN | ZrO ₂ -TiN |
|---------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 1.44 | 2.34 | 2.07 |
| 2 | 1.27 | 1.28 | 1.06 |
| 3 | 1.09 | 0.80 | 0.84 |
| 4 | 0.80 | 0.66 | 0.64 |
| 5 | 0.57 | 0.70 | 0.65 |

Tabel 2.5-1 Oppervlakteruweden : Ra-waarde (μm) van ZrO₂-composieten die gedraadvonkt werden met 1 tot en met 5 sneden [21]

De reeds uitgevoerde studies richten zich vooral op de slijtage van de ZrO₂-gebaseerde composieten [21] [22] [23] [24]. Alle testen gebeurden met een heen en weer bewegende pin op plaat tribometer, de Plint TE77, waarbij de pin bestaat uit WC-6Wt%Co (zie Figuur 2.5-1). De kracht van de pin op de plaat varieerde tussen 15 en 35N , de lengte waarover de pin op de plaat heen en weer beweegt is 15mm. De pin beweegt met een gemiddelde snelheid van 0.3 m/s , een frequency van 10Hz en de totale glijafstand bedroeg 10km.



Figuur 2.5-1 Schematische voorstelling van de Plint TE77 heen en weer bewegende pin op plaat tribometer [22]

Uit de testen blijkt dat ZrO₂-WC de beste slijtage weerstand heeft t.o.v de ZrO₂-TiCN en ZrO₂-TiN [21]. Er werd ook gevonden dat het verschil tussen de wrijving van de oppervlakken enerzijds veroorzaakt werd door de veranderde oppervlaktestructuur en oppervlaktedefecten onder invloed van vonkerosie [22] [23].

Y. Perez Delgado et al [22] stelt dat er een verband is tussen de buigsterkte van de testmonsters en hun slijtagegedrag. De hoogste slijtage vind plaats bij de monsters met de laagste sterke en de laagste slijtage vind plaats bij de monsters met de hoogste sterke. Ook werd een verband tussen de oppervlakteruwheid gevonden en het slijtagegedrag, de hoogste slijtage werd gevonden bij de monsters met de hoogste oppervlakteruwheid en neemt duidelijk af bij een verlaging van de oppervlakteruwheid. Hier mag echter niet enkel rekening gehouden worden met de oppervlakteruwheid,

maar moet ook rekening gehouden worden met de oppervlakte-integriteit, veranderingen in de microstructuur of oppervlaktespanningen.

Informatie over de buigsterkte van ZrO_2 -composieten was terug te vinden bij [16], [21] en [22]. K.Bonny et al [23] onderzocht de buigsterkten van ZrO_2 -TiN geslepen en gedraadvonkte testmonsters, deze waren getest met een 3-punts buigttest bij kamertemperatuur en bedroegen 1674 ± 314 MPa voor geslepen testmonsters en 1043 ± 30 MPa voor gedraadvonkte testmonsters met een enkele finiseersnede, de buigsterkte wordt sterk verminderd na het draadvonken door het induceren van scheurtjes en spanningen in het oppervlak.

2.6. Besluit

Vonkerosie blijkt een goede oplossing voor het bewerken van ZrO_2 -TiN, doordat dit makkelijk harde, brosse materialen kan bewerken kan het productieproces grondig ingekort worden. Waarbij bij conventionele technieken een productiecyclus van 6 stappen doorlopen moet worden kan bij vonkerosie rechtstreeks het harde materiaal gevонkt worden. Door te kiezen voor draadvonken hoeft men geen rekening te houden met de TWR, waardoor als output van het draadvonken enkel het oppervlak van het werkstuk en de Ra-waarde bekijken moeten worden. De parameters die bij de input van het proces verandering kunnen brengen zijn de ontladingsstroom en de puls-on time. Deze parameters kunnen ingesteld worden door de generatorparameters aan te passen. Andere belangrijke parameters bij het draadvonken zijn de vonkspleet en de offset, deze zorgen voor de hoeveelheid materiaal die per snede verwijderd wordt, en aldus voor de dimensionele nauwkeurigheid van het werkstuk.

Naast de goede eigenschappen die alle technische keramieken bevatten is ZrO_2 een goed materiaal om te gebruiken in industriële toepassingen doordat het ten opzichte van B_4C , SiC , Al_2O_3 , Si_3N_4 een betere scheurgroeiweerstand heeft, een beter buigsterkte en de expansiecoëfficiënt van ZrO_2 ligt dicht tegen de expansiecoëfficiënt van metalen zodat het hiermee samen gebruikt kan worden. Bij het gebruik van keramische materialen dient echter rekening gehouden te worden dat deze materialen beter belastbaar zijn op druk dan op trek. Keramische materialen verschillen ook ten opzichte van metalen door het feit dat ze bros breken en uitgegaan moet worden van een bepaalde faalkans volgens een Weibull-verdeling.

Om ZrO_2 geleidend te maken om te kunnen draadvonken dient er een tweede geleidende fase aan toegevoegd te worden. De geleidende fasen die gebruikt kunnen worden zijn TiN, TiCN, WC,... hiervan zijn de drie genoemde de meest voorkomende in combinatie met ZrO_2 . Uit de aangehaalde studies kan een verhouding van 60/40 gehaald worden voor ZrO_2 /geleidende fase.

De voorgaande studies die gedaan werden over het draadvonken van ZrO_2 -composieten beperkten zich echter allemaal tot experimenten op laboschaal, namelijk het draadvonken van schijven met een maximale hoogte van 5 mm. De Ra-waarde die gevonden werd voor ZrO_2 -TiN bedraagt $2.07 \mu m$ voor de ruwe bewerkingssnede en $0.65 \mu m$ voor 5 bewerkingssneden. De buigsterkte die gevonden werd na draadvonken van ZrO_2 -TiN bedraagt 1043 ± 30 MPa. De meeste studies richten zich allemaal op bewegende onderdelen en onderzochten daarbij de slijtageweerstand van de ZrO_2 -composieten. Er kan een verband gelegd worden tussen de sterkte en de slijtageweerstand, namelijk de slijtageweerstand vergroot bij een verhoging van de sterkte, dit geldt ook voor een

verhoging van de oppervlakteruwheid die een verlaging van de slijtageweerstand met zich meebrengt. De oppervlakteruwheid dient hierbij wel samen met de oppervlakte-integriteit bekeken te worden.

Hoofdstuk 3 : Methodologie

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de experimentele fase. Hierbij worden de gebruikte methoden en materialen die onderzocht worden dieper besproken. In een eerste deel wordt de samenstelling van het materiaal besproken. In het tweede deel wordt de configuratie van de gebruikte draadvonkmachine, Charmilles Robofil 240cc uitgelegd met aansluitend het tekenen en programmeren van de gewenste contouren. Vervolgens word een uiteenzetting gegeven over de gebruikte technieken om de ruwheden, buigsterkte, oppervlaktegesteldheid en dimensionele nauwkeurigheid te bepalen. Waarna de gebruikte programma's voor de verwerking van de gegevens meegegeven worden.

3.1. Samenstelling ZrO₂

3.1.1. ZrO₂-TiN

Het gebruikte materiaal is een op ethanol gebaseerde ZrO₂-TiN schijf met een doorsnede van 150 m voor de 11mm hoge schijf en een doorsnede van 250mm voor de 16mm hoge schijf. De schijf werd geproduceerd door hybride spark plasma sintering (SPS). Hierdoor wordt de productie van grotere homogene schijven mogelijk. De chemische samenstelling is te vinden in Tabel 3.1-1. De toevoeging van 1,1 vol% Al₂O₃ en 0,1 vol% Y₂O₃ dient ter stabilisatie en als hulp bij het sinteren.

Chemical composition

| Component | Percentage (wt % / vol %) | Supplier |
|--------------------------------|---------------------------|--|
| ZrO ₂ | 62.10 / 59.33 | Mixture of TZ-3Y + TZ-0 (Tosoh) with overall Y ₂ O ₃ content of 1.75 mol % |
| TiN | 37.15 / 39.55 | Grade C from HC Starck |
| Al ₂ O ₃ | 0.75 / 1.11 | SM8 from Baikowski |

Powder preparation

| | | |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| Powder suspension | Ethanol | |
| Type of mixer | Turbula mixer | T2A, Basel, Switzerland |
| Amount of powder mixture | g | 500 |
| Cup size | l | 2 |
| Duration | h | 24 |
| Mixing speed | Rpm | 60 |
| Milling ball material | ZrO ₂ | |
| Milling ball diameter | Mm | 3 |
| Milling ball amount | Kg | 2.5 |
| Solvent removal | Rotating evaporator | |
| Drying over night | °C | 90 |
| Sieve mesh | Mm | 400 |

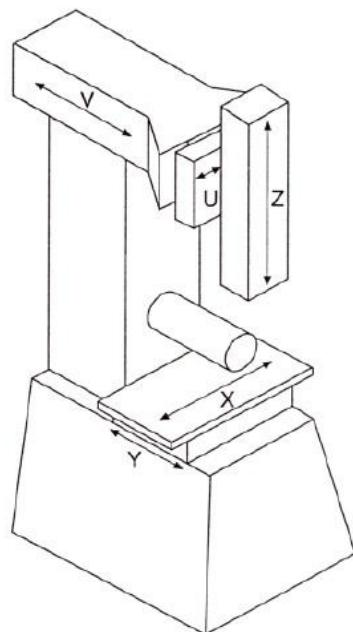
Tabel 3.1-1 Samenstelling ZrO₂

3.2. Draadvonken van de monsters

Als machine word de Charmilles Robofil 240CC (zie Figuur 3.2-1) gebruikt. Het is een 5-assige draadvonkmachine (X,Y,Z,U en V). In Figuur 3.2-2 kan de positionering van de assen in de draadvonkmachine gevonden worden. De X- en y-as zorgen voor de beweging van de draad in het werkvlak. De Z-as geeft de hoogte van de bovenste kop weer. Met de U- en V-as kan een hoek gegeven worden aan de draad zodat conisch gedraadvonkt kan worden.



Figuur 3.2-1 Charmilles Robofil 240cc



Figuur 3.2-2 Coördinatenstelsel voor draadvonkmachine

De draadvonkmachine werkt CNC-gestuurd, het programma kan van op een floppy disk ingeladen worden of er kunnen rechtstreekse commando's in het EXE-tabblad gegeven worden. Verdere specificaties van de machine kunnen gevonden worden in Tabel 3.2-1. Gedemineraliseerd water wordt gebruikt als diëlektricum (diëlektrische

conductiviteit is $11 \mu\text{S}/\text{cm}$). Een draad bestaande uit AC messing met een diameter van $0,250 \text{ mm}$ en een treksterkte van 900 N/mm^2 werd gebruikt als snijgereedschap.

| 240CC | |
|---|---|
| X, Y, Z verplaatsing | 350 x 220 x 220mm |
| U, V slag | 350 x 220mm |
| Werkstuk afmeting (LxDxH) | 1000 x 550 x 220mm |
| Max. werkstukgewicht | 750kg |
| Schuinte hoek hoogte | $\pm 45^\circ/220\text{mm}$ |
| Beschikbare draaddiameters (Standaard) | 0.15 – 0.33mm |
| Special features | Advantage Electric Chiller x, Y, U, V, Z linear glass scales |

Tabel 3.2-1 Specificaties Charmilles Robofil 240CC

Het opspannen van het stuk gebeurd met behulp van spanklemmen. Met een meetklok wordt het stuk uitgericht zodat het assenkruis van het stuk evenwijdig komt te liggen met het assenkruis van de machine. Zo wordt er tijdens de bewerkingen zo weinig mogelijk materiaal verspild. Ook dient het stuk steeds met eenzelfde klemming vastgezet te worden om variatie in de outputparameters te vermijden. De inklemming gebeurd steeds zwevend door middel van 2 klemmen op een grotere schijf en 1 klem voor kleinere onderdelen. Zo is het stroomverloop hetzelfde voor elk gevonden stuk tijdens de testen. Er dient ook op gelet te worden dat er geen delen onder of boven het stuk uitsteken, dit om de verplaatsing van de kop onder en boven het werkstuk niet te belemmeren en botsingen te vermijden. De verdere werkwijze om de machine te bedienen kan gevonden worden in bijlage B.

De symbolen van de parameters op de machine verschillen met deze uit de literatuur, in Tabel 3.2-2 kunnen de overeenstemmende symbolen gevonden worden.

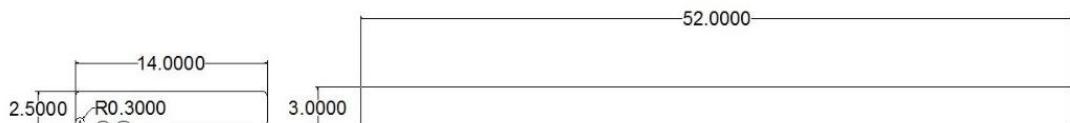
| Symbol 240CC | Symbol literature | Meaning | Unit |
|-----------------|-------------------|-----------------------------|---------------|
| Offset | B_n | Offset value/ baancorrectie | mm |
| V | \hat{U}_i | Open generatorspanning | V |
| IAL | i_e | piekstroom | A |
| B | t_o | pulsintervaltijd | μs |
| A | t_e | generatorpulsduur | μs |
| Aj | | Reference servo voltage | V |
| S | | Maximum speed | mm/min |
| WS | v_E | Lineaire afwikkelsnelheid | m/min |
| WB | F_E | draadspanning | N |
| Inj. | q | Flushing pressure | l/min |

Tabel 3.2-2 Verklaring parameters

3.3. Tekenen en programmeren monsters

Om monsters te kunnen maken met verschillende afwerkingsgraden, moeten deze getekend en geprogrammeerd worden. Het tekenen gebeurd met Draftsight 2015, dit is een opensource CADprogramma. Voor het latere programmeren dient het bestand als Dxf opgeslagen te worden. Het monster programmeren gebeurd met Fokus Visualcam 17.1. De werkwijze van het programmeren kan gevonden worden in bijlage A. Figuur 3.3-1 geeft de afmetingen van de ruwheidmonsters en de plaatjes, waaruit later de buigmonsters gemaakt kunnen worden, weer zoals ze

gedraadvonkt worden in een eerste opspanning, hierbij worden plaatjes gedraadvonkt van 3mmx52mm. Voor de buigmonsters worden de plaatjes in de hoogte ook nog eens doorgesneden met één snede zodat balken ontstaan van 3mmx4,5mmx45mm. Afhankelijk van de hoogte van de schijven, resp. 11mm en 16mm, kunnen 2 of 3 buigmonsters uit de plaatjes gehaald worden. De markeringen op de ruwheidsmonsters dienen ter identificatie.



Figuur 3.3-1 Afmetingen van de Ruwheid- en buigmonsters zoals ze uit de schijf gevонkt worden(in mm) op de charmilles Robofil 240cc

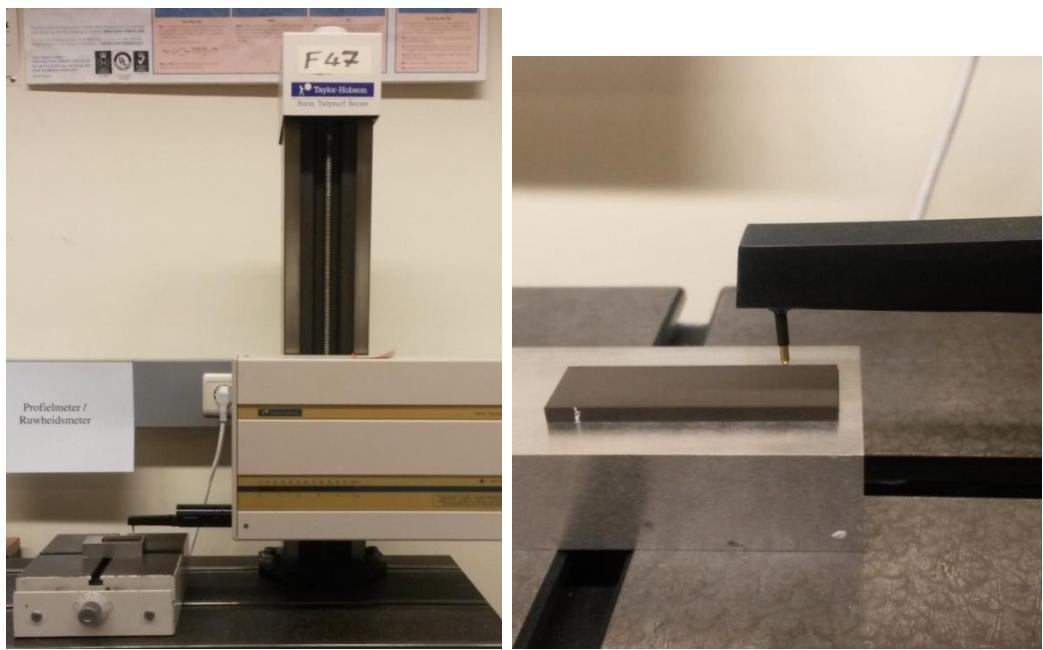
3.4. Opmeten van de monsters

3.4.1. Ruwheidsmetingen

De oppervlakteruwheid word in de industrie vaak gebruikt als waarde om het vonkerosie -proces te beoordelen. In de eerste experimenten worden de ruwheden dan ook als referentie gebruikt om te bekijken of de parameters die gebruikt worden goed zijn. Hiervoor word vooral gekeken naar de Ra-waarde en dit in vergelijking met de waarden die de fabrikant als referentie heeft opgegeven.

3.4.1.1. Apparatuur

Met de ruwheidsmeter worden de oppervlakteruwheden opgemeten. Er wordt gebruikt gemaakt van de form Talysurf 1201 van Taylor Hobson zie Figuur 3.4-1. De ruwheidsmeter heeft een naioresolutie met een minimum resolutie van 12.8nm over 10 mm . Verdere specificaties van de ruwheidsmeter zijn terug te vinden in Tabel 3.4-1



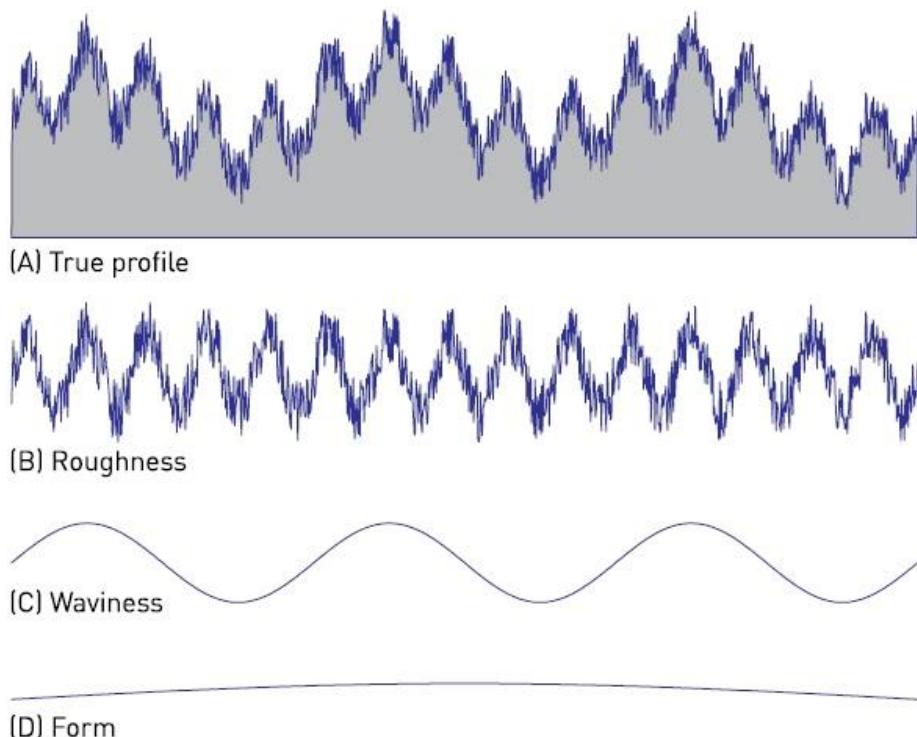
Figuur 3.4-1 Ruwheidsmeter form Talysurf 120i

| | |
|---------------------------|---|
| Uitschuif lengte | 120mm |
| Uitschuif snelheid | 10mm/sec maximum |
| Meetsnelheid | 1mm and 0.5mm/sec ±5% |
| Terugkeer snelheid | up to 5mm/sec |
| Gauge Type | Phase Grating Interferometer, 1mN force nominal |
| Meetbereik | 10mm |
| Resolutie | 12.8nm @ 10mm range |
| Range to Resolution Ratio | 780,000:1 |
| Straightness Accuracy | 0.5µm over 120mm traverse 0.2µm over any 20mm traverse |
| Data Resolutie | 0.25µm |
| Dimensies (LxDxH) | 396 x 127 x 195mm |
| Gewicht | 11.5kg |

Tabel 3.4-1 Specificaties ruwheidsmeter form Talysurf 120i

3.4.1.2. Oppervlakteruwheid

De oppervlakteruwheid kan gezien worden als een combinatie van de ruwheid, golving en vorm van het oppervlak.



Figuur 3.4-2 Oppervlakteruwheid als combinatie van ruwheid, golving en vorm

Om de ruwheid te bepalen dienen een paar filters toegepast te worden om de golving en de vorm uit het profiel te filteren. Om de golving eruit te filteren wordt een gaussiaanse filter gebruikt. Om de vorm eruit te filteren wordt een lijn geselecteerd om de vorm van het oppervlak weer te geven.

Zowel de Ra, Rz en Rt als de Pa en de Pt waarden worden opgemeten. De R-waarden geven ruwheidswaarden weer gemeten over een aantal cutoff-lengtes. De P-waarden geven de ruwheid weer over de volledige lengte van het ruwe profiel, hierbij worden geen filters gebruikt. De opgemeten lengte is steeds iets langer dan de gebruikte data lengte, dit om in en uit te lopen.

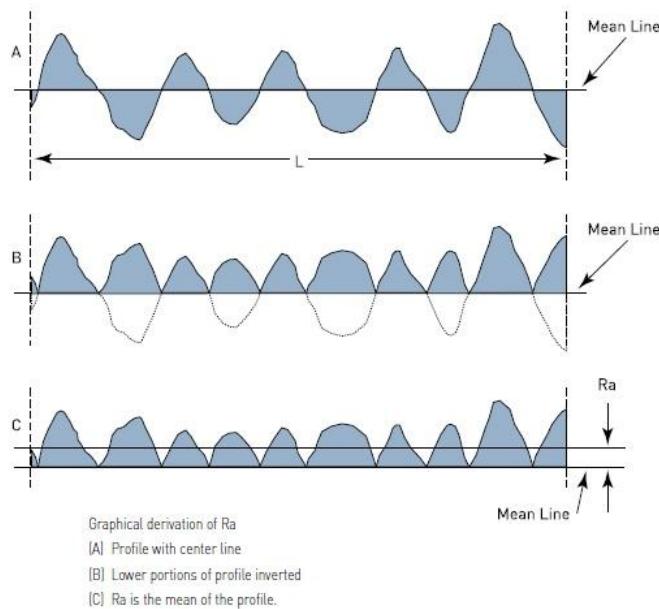
Om de cutoff-lengte te bepalen wordt gebruik gemaakt van Tabel 3.4-2

| Recommended Cut-off (ISO 4288-1996) | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------|---------------------------|-----------------------------|
| Periodic Profiles | Non-Periodic Profiles | | Cut-off | Roughness Sampling Length | Roughness Evaluation Length |
| Spacing Distance RSm (mm) | Rz (μm) | Ra (μm) | lc (mm) | lr (mm) | ln (mm) |
| 0.013 - 0.04 | To 0.1 | To 0.02 | 0.08 | 0.08 | 0.4 |
| 0.04 - 0.13 | 0.1 - 0.5 | 0.02 - 0.1 | 0.25 | 0.25 | 1.25 |
| 0.13 - 0.4 | 0.5 - 10 | 0.1 - 2.0 | 0.8 | 0.8 | 4.0 |
| 0.4 - 1.3 | 10 - 50 | 2 - 10 | 2.5 | 2.5 | 12.5 |
| 1.3 - 4.0 | 50 | 10 | 8 | 8 | 40.0 |

Tabel 3.4-2 Aanbevolen cutt-off-lengte

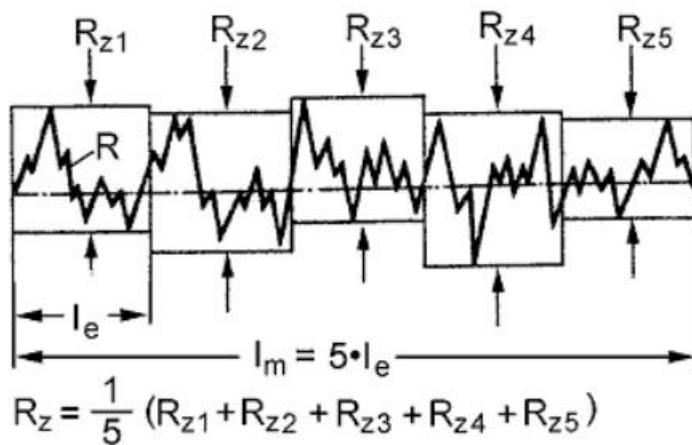
De monsters die in deze thesis gemeten worden hebben een Ra-waarde tussen 0,1 en 2,0 μm . Uit de tabel kan er afgelezen worden dat met een cutoff van 0,8mm en een evaluatielengte van 4mm gewerkt moet worden. Als volledige datalengte werd 5,5mm gebruikt. Om de ruwheid van de teststukken te meten, meten we elk monster op 3 verschillende plaatsen en dit telkens 3 keer. Hiervan nemen we een gemiddelde om de algemene ruwheid van het monster te berekenen.

Ra is het gemiddelde van de absolute waarden in de evaluatie lengte (zie Figuur 3.4-3).



Figuur 3.4-3 Grafische voorstelling Ra-waarde

Rz is het gemiddelde van de afstand tussen de hoogste piek en laagste dal per cutt-off lengte. Figuur 3.4-4 geeft een voorbeeld van de berekening van de Rz-waarde



Figuur 3.4-4 berekening Rz-waarde

Rt is de verticale hoogte tussen het hoogste en het laagste punt van de evaluatie lengte.

3.4.2. Buigtesten

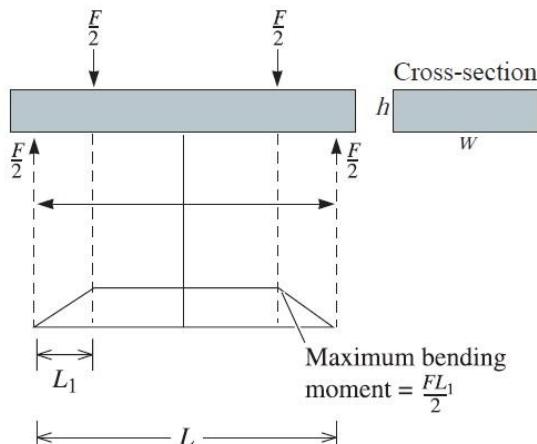
Om te bepalen in hoeverre het draadvonken de sterkte van het materiaal heeft beïnvloed word de Weibull-verdeling gebruikt. Om een representatieve Weibull-verdeling te bekomen worden van elke snede 8 tot 12 buigmonsters gemaakt en getest met een 4-punts buigtest.

3.4.2.1. Uitvoering buigtesten

De buigsterkte wordt getest met een 4-punts buigproef. Dit heeft het voordeel dat er geen kerf aanwezig is op het teststuk en het monster hierdoor zal breken op de zwakste plaats. Doordat op twee plaatsen een neerwaartse kracht wordt uitgeoefend word het moment dat op het buigmonster wordt uitgeoefend verdeeld over het gedeelte tussen deze twee punten. Het monster gaat doorbuigen en op de zwakste plaats tussen deze twee punten breken. Een nadeel is dat de buigproef minder gecontroleerd gebeurd, doordat de kracht verdeeld wordt over het monster. In Figuur 3.4-6 is te zien hoe de monsters worden opgesteld tijdens de buigproef. Volgende formule kan bij de 4-puntsbuigtest gebruikt worden:

$$\sigma_f = \frac{3FL_1}{4wh^2}$$

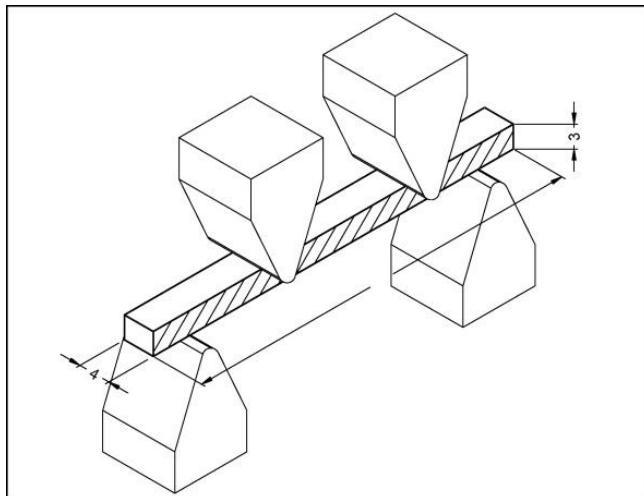
Hierbij is σ_f de buigsterkte, F is de kracht uitgeoefend op het monster, L_1 is de lengte van het buigmonster tussen de onderste steunen, w is de breedte van het buigmonster en h is de hoogte van het buigmonster.(zie Figuur 3.4-5)



Figuur 3.4-5 4-punts buigtest verklaring

Alle zijden zijn hierbij gedraadvonkt behalve de zijden die parallel lopen met de drukkracht, deze werden nog nageslepen (deze zijde is in Figuur 3.4-6 aangegeven door de arcering), over de voorbereidingen zelf is meer te vinden in alinea 3.4.2.2.

Voor elke snede werden testen gedaan op 8 tot 12 buigmonsters. Het verschil in aantal buigmonsters komt doordat in de voorbereidende fase al een aantal monsters gebroken zijn, dit als gevolg van scheurvorming en spanningen aan het oppervlak. In totaal zijn er een 80-tal buigmonsters gemaakt met een gemiddelde van 1h werk per buigmonster.



Figuur 3.4-6 Opstelling 4-puntsbuigproef

3.4.2.2. Voorbereidingen buigtesten

Om de buigtesten uit te voeren dient het uitgevonkte monster eerst nog een paar voorbereidingen te ondergaan. De vlakken waar het buigmonster werd doorgesneden, werden met een ruwe snede gedraadvonkt. Deze vlakken dienen nog nageslepen te worden zodat deze geen extra invloed op de buigtest zouden uitoefenen. Met betrekking tot de oppervlakteruwheid en scheurvorming in deze vlakken.

Het naslijpen gebeurd met een vlakslijpmachine van Jung (JF415DS), (zie Figuur 3.4-7). Om de monsters vast te houden op de machine dienen ze magnetisch te zijn, wat niet het geval is bij ZrO₂-composieten. De monsters worden daarom op een vlakke ijzeren plaat vastgekleefd met zegelwas. Hiervoor wordt de ijzeren plaat opgewarmd waarna de zegelwas en de buigmonsters erop gekleefd kunnen worden. Nadat alles is aangebracht moet deze plaat met de monsters nog een uur afkoelen zodat de was kan uitharden en de buigmonsters zeker niet zouden los komen tijdens het slijpen. De monsters zijn doorgevonkt met een dikte van 4,5mm waarbij er tot een dikte van $4\text{mm}\pm0.2$ gegaan moet worden om goed buigmonster te bekomen. Er wordt geslepen met een diamant slijpsteen met stappen van 4µm. De dikte wordt gecontroleerd met een schuifmaat. Eerst om de 0.1mm erna om de 0.01mm. Dit wordt gedaan voor beide doorgevonkte zijden. Na de eerste slijfbeurt word de ijzeren plaat weer opgewarmd zodat de was smelt en de buigmonsters van de plaat gehaald kunnen worden. Hierna worden de buigmonsters schoon gemaakt met aceton en kan het volledige proces herhaald worden voor de andere zijde.



Figuur 3.4-7 Slijpen van de buigmonsters ter voorbereiding van de buigtesten

3.4.3. SEM

De oppervlaktegesteldheid en de suboppervlaklaag worden bekeken met de SEM (Scanning Electron Microscope), de SEM die gebruikt wordt is de PHILIPS scanning electron microscope XL30 FEG (zie Figuur 3.4-8) met een resolutie van 2nm en werkspanningen van 0.2kV tot 30kV.

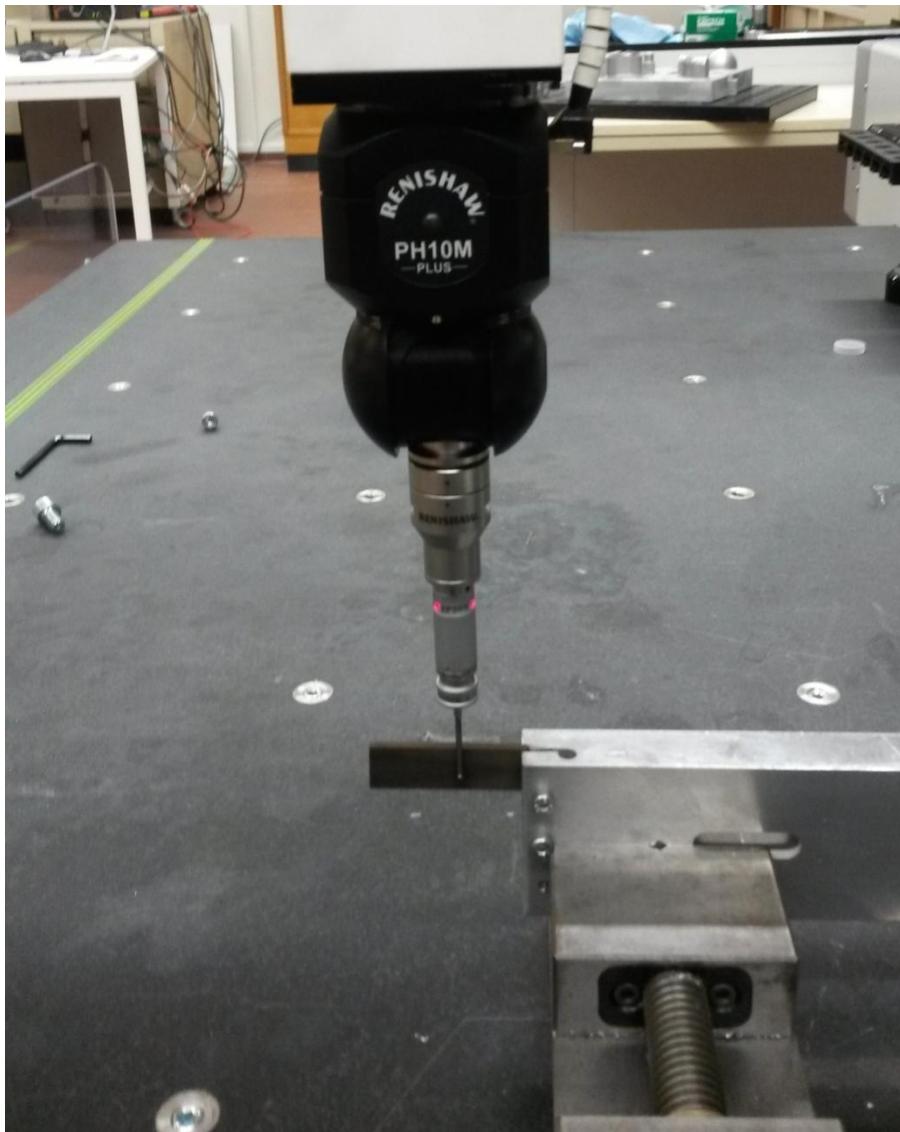


Figuur 3.4-8 Philips scanning electron microscope XL30 FEG op de afdeling MTM van de KULeuven

In deze thesis werden de oppervlakken opgemeten met 10kV en de doorsneden met 12kV. De ruwheidsmonsters worden hiervoor in twee gesneden door te draadvonken met een ruwe snede. Hierna wordt de ene helft van de monsters ingebed in fenolhars zodat het suboppervlak bekeken kan worden. Het bekeken oppervlak word na het inbedden nog opgeschuurde zodat een egaal en vlak oppervlak verkregen word. Hierna word van aan de monsters een lijn getrokken met geleidende koolstoflijm over de zijkant tot aan de onderkant van de monsters zodat een stroom kan vloeien om zo de monsters met de microscoop te kunnen bekijken. De andere helft word op een speciale houder voor de SEM gekleefd met geleidende koolstoflijm om het oppervlak te kunnen bekijken. Beide monsters worden nog een paar uur in een vacuümruimte gelegd zodat al de luchtbellen eruit gehaald kunnen worden en ze het microscopisch beeld niet verstören. Met de microscopische beelden van het suboppervlak kan gezien worden in hoeverre het gedraadvonkte materiaal door het proces is aangetast. Hierbij wordt gekeken naar de witte laag die zich gevormd kan hebben aan het oppervlak en naar scheurvorming aan het oppervlak en naar de diepte van beiden.

3.4.4. CMM

Om de dimensionele nauwkeurigheid te bepalen wordt gebruik gemaakt van een Coördinate-measuring-machine(CMM) van Nikon, namelijk de Altera 15.7.6. met als probe head PH10M plus en als sensor TP200 (zie Figuur 3.4-9). De maximale toegestane fout hiervan bedraagt $2,0\mu\text{m} + 2,5\mu\text{m}/\text{m}$. De parallelle vlakken van de gevонkte plaatjes worden opgemeten en de kromheid en evenwijdigheid van de vlakken t.o.v. een referentievlak word bekeken. De metingen gebeuren automatisch, hiervoor werd een programma geschreven waarbij het stuk eerst manueel gepositioneerd werd doormiddel van aanduiding van een vlak, een lijn en een punt. Daarna werd het automatische programma doorlopen. Voor elk vlak werden er 56 meetpunten opgemeten.



Figuur 3.4-9 Aftasten van ZrO₂-TiN gedraadvonkt plaatje op de CMM (Altera 15.7.6, Nikon) met de probe head PH10M

3.5. Verwerking gegevens

Om de bekomen gegevens te verwerken wordt met Excel en Matlab gewerkt. In Excel worden de gegevens geordend en omgezet tot een csv-bestand waarna de gegevens met Matlab in een grafiek worden gezet. De gebruikte programmering hiervoor is te vinden in Bijlage C

3.6. Overzicht experimenten

De algemene doelstellingen die voor ogen zijn bij deze thesis, is om de beste parameters te vinden en te verifiëren, die gebruikt kunnen worden om ZrO₂-TiN te bewerken met draadvonkerosie zonder dat het materiaal moet inboeten op het gebied van betrouwbaarheid en sterkte, zie alinea's 2.2.1.1 en 2.2.1.2. In Tabel 3.6-1 is te zien welke experimenten gebruikt werden om het proces te kunnen valideren en eventuele

verbeteringen in het proces aan te brengen. De experimenten werden allemaal opgesteld met de trial en error methode. Hiernaast worden ook nog SEM-beelden gemaakt om de oppervlakte-integriteit te kunnen beoordelen.

| Experiment | Doelstelling | Verificatie methode | Input/ output | Specificaties monsters (mmxmmxmm) |
|-------------------------------------|---|--|---|---|
| Ruwheidsmonsters draadvonken | Verbeteren en Verificatie van de draadvonk-parameters Een Ra-waarde van 0.5 µm bij 5 sneden | Ruwheidsmetingen 7 verschillende #sneden + aanpassingen bij de 2 ^{de} en 3 ^{de} snede | $t_e, t_o, i_e, \hat{u}_i / Ra$ | 2,5x16x14 |
| Buigmonsters draadvonken | Verificatie van de draadvonk-parameters Goede weibullmodulus behouden na draadvonken, voor ZrO ₂ ligt dit typisch rond 10 | Buigtesten • 6 verschillende sneden, telkens met 12 replica's, in totaal een 100-tal buigmonsters | $t_e, t_o, i_e, \hat{u}_i /$ buigsterkte | 3x4,5x45 |
| | Vlakheid : < 5 µm | CMM • 6 sneden met van elke snede 8 vlakken opgemeten | $t_e, t_o, i_e, \hat{u}_i /$ vlakheid | 3x16x52 |

Tabel 3.6-1 Uit te voeren experimenten en doelstellingen

De monsters worden gemaakt uit een 16mm hoge ZrO₂-TiN schijf met een diameter van 250mm met de Charmilles Robofil 240cc draadvonkmachine in gedemineraliseerd water. Als snijgereedschap werd een draad gebruikt bestaande uit AC messing met diameter 0.25 mm en een treksterkte van 900 N/mm².

Bij de ruwheidsmonsters die gemaakt worden, wordt gekeken of met de bestaande parameters de beoogde ruwheden bekomen kunnen worden. Ruwheidsmonsters met het verschillend aantal sneden werden gemaakt. Gaande van een ruwe bewerking met 1 enkele snede tot zeer fijn afgewerkte monsters met 7 sneden, hierbij telkens genummerd naar het aantal sneden waarmee het monster bewerkt is. De 1^{ste} tot de 3^{de} snede werken servo-gecontroleerd, hiermee wordt de materiaalafname optimaal gehouden en wordt de contour bepaald. De 4^{de} tot de 7^{de} snede werken met een vaste snijsgeschwindigheid om een goede oppervlaktekwaliteit te garanderen hierover is meer te vinden in alinea 2.1.4.

Aan de hand van de resultaten van de ruwheidsmonsters worden de nodige verbeteringen aangebracht in de parameters. Doordat de Ra-waarden vanaf de 4^{de} snede plots hoger zijn dan de referentie, werden de parameters van de 4^{de} snede geëlimineerd. Hierdoor blijven er 6 sneden over waarmee de buigmonsters worden gedraadvonkt. Om een efficiënt productie-proces te bekomen werden ook wijzigingen aangebracht aan de offset, meer uitleg over offset is te vinden in alinea o.

Met de verbeterde parameters werden de buigmonsters gedraadvonkt. Eerst werden er plaatjes gedraadvonkt van 3mmx16mmx52mm waar CMM metingen op gedaan werden om de vlakheid van het draadvonken te controleren, zie alinea 3.4.4. Na deze controle werden de buigmonsters gemaakt. De werkwijze voor het maken van de buigmonsters en de buigtellen zijn te vinden in alinea 3.4.2.

De parameters die gebruikt werden en de resultaten die gemeten werden worden besproken in een volgend hoofdstuk.

Hoofdstuk 4 : Experimenten en resultaten

In dit hoofdstuk worden de metingen en resultaten van de experimenten weergegeven en besproken, de werkwijze van de experimenten zelf is te vinden in het vorige hoofdstuk methodologie. Bij de ruwheidsmetingen wordt het EDM-proces gevalideerd en bekijken wat de beste parameterinstellingen zijn die gebruikt kunnen worden voor het draadvonken van ZrO₂-TiN en dit voor verschillende sneden. Voor de verschillende sneden word met de buigsterkten een weibull-grafiek opgesteld waaruit de spreiding van de faalkans van gedraadvonkt ZrO₂-TiN kan gehaald worden. De dimensionele nauwkeurigheid wordt door bepaald aan de hand van de vlakheid van de monsters. De resultaten die bekomen worden kunnen mede aan de hand van SEM-beelden verklaard worden.

4.1. Ruwheidsmetingen

Als draadvonkparameters worden de parameters gebruikt die gebaseerd zijn op de door charmilles gegeven paramters om hardmetaal te bewerken met draadvonken. Deze zijn terug te vinden in Tabel 4.1-1. De parameters die nog verder aangepast werden zijn in het geel gearceerd in de tabel. De aanpassingen zijn gebaseerd op trial and error.

| Snede | Generator | | | | | | | | Snelheid | Spoeling | Draad | | |
|-------|-----------|--------------------|-------------------|--------|------------------------|---------------------------|---------|------------|----------|----------|--------|-------|-------|
| | Puls duur | Puls interval tijd | Kortste puls duur | stroom | Open generatorspanning | Referentie servo spanning | Modulus | polariteit | | | mm/min | l/min | m/min |
| | 0,55 | 0,55 | 0,55 | A | V | V | | | | | | | |
| 1 | 0,50 | 11,0 | 0,30 | 10 | 80 | 52,0 | 1 | +/- | 10,0 | 10,0 | 8 | 1,4 | |
| 2 | 0,05 | 5,0 | 0,05 | 10 | 120 | 90,3 | 37 | +/- | 2,5 | 1,5 | 10 | 2,0 | |
| 3 | 0,05 | 20,5 | 0,05 | 4 | 60 | 42,3 | 37 | +/- | 1,4 | 1,5 | 8 | 2,0 | |
| 4 | 0,90 | 5,0 | 0,90 | 12 | 120 | 0,0 | 32 | +/- | 1,0 | 1,5 | 8 | 1,8 | |
| 5 | 0,40 | 3,0 | 0,05 | 10 | 120 | 0,0 | 32 | +/- | 0,9 | 1,5 | 8 | 1,0 | |
| 6 | 0,40 | 3,0 | 0,05 | 5 | 120 | 0,0 | 30 | +/- | 0,9 | 1,5 | 10 | 1,0 | |
| 7 | 0,40 | 1,6 | 0,05 | 6 | 240 | 0,0 | 26 | + | 0,8 | 1,5 | 10 | 1,0 | |

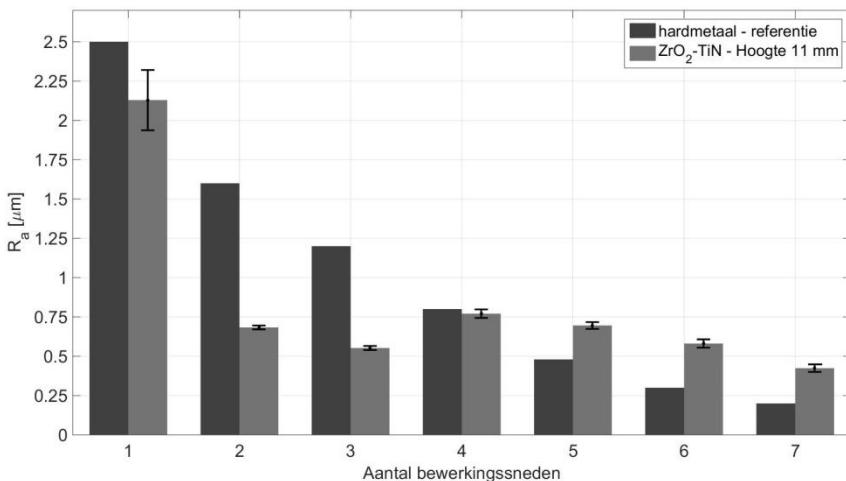
Tabel 4.1-1 Gebruikte parameters op Charmilles robofil 240cc
De parameters die nog verder aangepast werden zijn in het geel gearceerd in de tabel

Van de gedraadvonkte ruwheidsmonsters wordt enkel de ruwheid opgemeten, hierbij is het belangrijk dat de gewenste ruwheden bereikt kunnen worden. Vooral bij de finiserende sneden speelt de ruwheid een grote rol. Tabel 4.1-2 geeft de waarden weer van de gemeten Ra-waarden en van de waarden die bereikt zouden moeten worden volgens Charmilles bij het draadvonken van hardmetalen.

| #sneden | Gemeten Ra-waarde | Ra-waarde Hardmetaal volgens Charmilles |
|---------|-------------------|---|
| C1 | 2,1282 | 2,5 |
| C2 | 0,6831 | 1,6 |
| C3 | 0,5524 | 1,2 |
| C4 | 0,7710 | 0,8 |
| C5 | 0,6955 | 0,48 |
| C6 | 0,5809 | 0,3 |
| C7 | 0,4244 | 0,2 |

Tabel 4.1-2 Ra-waarden , na het draadvonken, van ZrO₂-TiN in vergelijking met de referentiewaarden van hardmetaal

In Grafiek 4.1-1 is te zien dat tot en met de 4^{de} snede de bekomen ruwheidswaarden beter blijven dan de theoretische waarden, van snede 5 t.e.m. 7 zijn deze ruwheidswaarden groter dan de referentie waarden.



Grafiek 4.1-1 Ra-waarden , na het draadvonken, van ZrO₂-TiN in vergelijking met de referentiewaarden van hardmetaal

Het valt op dat bij de 4^{de} snede de ruwheidswaarde verhoogd i.p.v. verlaagd. Dit zou een verklaring kunnen geven waarom de volgende sneden de theoretische waarden niet bereiken. Een verklaring voor de stijging van de oppervlakteruwheid kan gevonden worden bij de parameters die bij de 4^{de} snede ingesteld zijn(zie Tabel 4.1-3). Doordat het afname-mechanisme bij het draadvonken van ZrO₂-TiN dominerend smelten en verdampen is (zie alinea 2.4.2), veroorzaken volgende twee parameters een hogere ruwheid : de pulsduur en de stroomsterkte. Een lange pulsduur is te zien, nl. 0,90µs, een langere pulsduur geeft aanleiding tot een dieper smeltdbad op het werkstuk. De materiaalafname gaat door het diepere smeltdbad verhogen. Een hogere stroomsterkte wordt ook opgemerkt, nl. 12A, deze zorgt ervoor dat de diameter van het smeltdbad groter wordt en ook meer materiaal verwijderd.

| Snede | Input generatorparameters | | | |
|---------------|---------------------------|---------------|--------|------------------------|
| | Puls duur | Puls interval | stroom | Open generatorspanning |
| | | µs | µs | A |
| 1 | 0,50 | 11,0 | 10 | 80 |
| 2.1 en 2.2 | 0,05 | 5,0 | 10 | 120 |
| 3.1 en 3.2 | 0,05 | 20,5 | 4 | 60 |
| 4 | 0,90 | 5,0 | 12 | 120 |
| 5 | 0,40 | 3,0 | 10 | 120 |
| 6 | 0,40 | 3,0 | 5 | 120 |
| 7 | 0,40 | 1,6 | 6 | 240 |

Tabel 4.1-3 Generatorparameters Charmilles Robofil 240cc

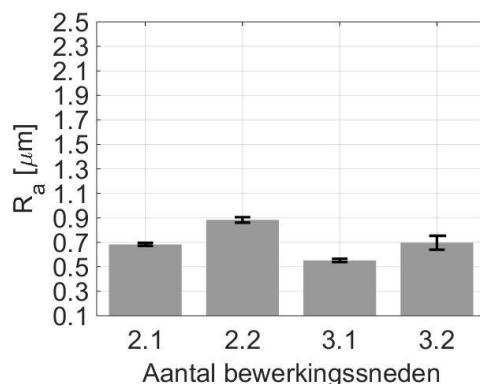
Door deze twee parameters vindt een grotere materiaalafname plaats bij de 4^{de} snede. Omdat de spoeling en snelheid hetzelfde blijven kan het gesmolten materiaal niet snel genoeg verwijderd worden en stolt het terug op het oppervlak waardoor het oppervlak ruwer is [2], [25].

Bij de ruwheidsmonsters die gemaakt zijn, zijn van de 2^{de} en 3^{de} snede een dubbel gemaakt met verschillende offset parameters. Door de offset te verkleinen wordt er bij de tweede en derde snede minder materiaal in één keer weggenomen en kan de bewerkingstijd verminderd worden zodat een efficiënter productieproces bekomen kan worden. De gebruikte offset en de bewerkingstijd in mm/min worden weergegeven in Tabel 4.1-4. De groen gearceerde offsetwaarden bij monster 2.2 en 3.2 zijn de waarden die aangepast werden.

| monster | Snede van het monster | Offset (mm) | Bewerkingssnelheid (mm/min) |
|----------------|--------------------------------------|------------------------|--|
| 2.1 | 1 | 0,256 | 6,52 |
| | 2 | 0,200 | 2,90 |
| 2.2 | 1 | 0,240 | 6,38 |
| | 2 | 0,200 | 15,79 |
| 3.1 | 1 | 0,256 | 6,56 |
| | 2 | 0,200 | 1,80 |
| | 3 | 0,182 | 1,39 |
| 3.2 | 1 | 0,235 | 5,83 |
| | 2 | 0,195 | 8,11 |
| | 3 | 0,182 | 2,50 |

Tabel 4.1-4 Originele en aangepaste Offset-waarden van de 2de en 3de snede en de bijhorende bewerkingssnelheden

Hierbij valt op dat het draadvonken bij de tweede snede van de aangepaste monster 4,5 en 5,4 keer sneller verloopt dan bij de standaard monsters. Voor de derde snede is dit bijna twee keer sneller. De totale productietijd van de aangepaste monsters werd hierdoor gehalveerd. Grafiek 4.1-2 geeft de ruwheden weer van de verschillende aangepaste sneden. Hierbij valt op dat de Ra-waarden van sneden 2.2 en 3.2 lichtjes hoger zijn dan wanneer men de standaard offset had gebruikt maar omdat dit de ruwe sneden zijn is de oppervlakteruwhed hiervan ondergeschikt aan de bewerkingssnelheid.



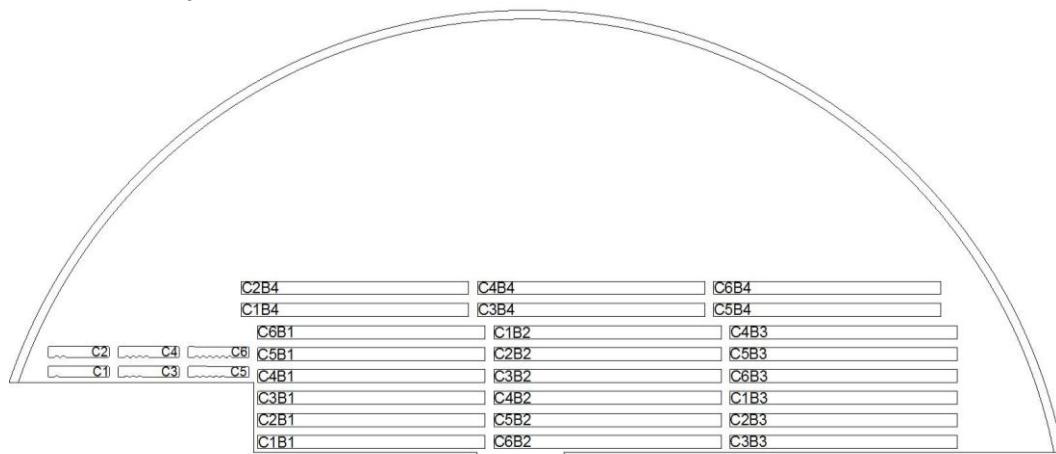
Grafiek 4.1-2 Ruwheden van 2de en 3de snede met 2.1 en 3.1 een standaard offset en 2.2 en 2.3 een aangepaste offset

Aan de hand van de ruwheidsmonsters worden de nodige verbeteringen aangebracht in de parameters. De parameters werden aangepast vanaf de 4^{de} snede. De parameters die voor de hierop volgende testen gebruikt werden zijn terug te vinden in Tabel 4.1-5.

| Snede | Puls duur | Puls interval tijd | stroom | Open generatorspanning | Offset |
|-------|-----------|--------------------|--------|------------------------|--------|
| | μs | μs | A | V | mm |
| 1 | 0,50 | 11,0 | 10 | 80 | 0.235 |
| 2 | 0,05 | 5,0 | 10 | 120 | 0.195 |
| 3 | 0,05 | 20,5 | 4 | 60 | 0.182 |
| 4 | 0,40 | 3,0 | 10 | 120 | 0.168 |
| 5 | 0,40 | 3,0 | 5 | 120 | 0.157 |
| 6 | 0,40 | 1,6 | 6 | 240 | 0.157 |

Tabel 4.1-5 Verbeterde parameters na de experimentele fase voor de bewerking van ZrO₂-TiN met de Charmilles Robofil 240CC

Met deze parameters werden de ruwheidsmonsters en buigmonsters voor de validatie gedraadvonkt. Door het weglaten van een reeks parameter, wordt het aantal sneden beperkt tot 6 sneden. In Figuur 4.1-1 is de verdeling van de uitsnijdingen in de schijf te vinden. Het cijfer na de C staat voor het aantal sneden en de B staat voor de plaatjes waaruit de buigmonsters gesneden werden. Voor de buigmonsters werd er gekeken om bewerkingen met eenzelfde aantal sneden zoveel mogelijk te spreiden over de schijf om zo beïnvloeding van de densiteit van de schijf uit te sluiten. Over de buigmonsters vind u meer in alinea 4.3

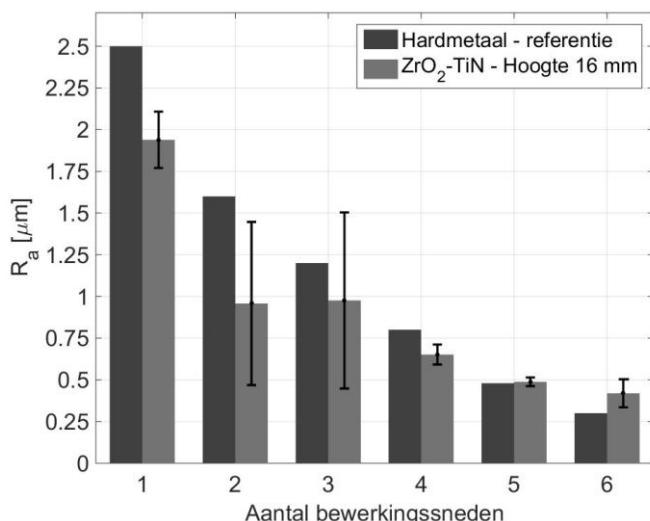


Figuur 4.1-1 Ligging van de gedraadvonkte ruwheids-en buigmonsters in een ZrO₂-TiN-schijf met Ø250mm

In Tabel 4.1-6 en Grafiek 4.1-3 zijn de Ra-waarden terug te vinden ter validatie van de verbeterde vonkparameters bij het draadvonken van ZrO₂-TiN. De metingen zijn gebeurd op 5 verschillende monsters van elke snede. Ondanks een verhoging in de Ra-waarden van de 2^{de} en 3^{de} snede door de verandering van offset, zijn de Ra-waarden van de 3 laatste finiserende sneden een stuk lager dan bij de initiële parameters. De waarden van de 3 laatste finiserende sneden leunen zo dichter aan bij de waarden die als referentie voor hardmetalen zijn opgegeven.

| #sneden | Gemeten Ra-waarde | Ra-waarde hardmetaal volgens Charmilles |
|---------|-------------------|---|
| C1 | 1,99 | 2,5 |
| C2 | 1,08 | 1,6 |
| C3 | 1,12 | 1,2 |
| C4 | 0,67 | 0,8 |
| C5 | 0,50 | 0,48 |
| C6 | 0,45 | 0,3 |

Tabel 4.1-6 Ra-waarden na het draadvonken met de verbeterde parameters, voor de verschillende sneden, van ZrO₂-TiN en hardmetaal



Grafiek 4.1-3 Ra-waarden, na het draadvonken met de verschillende parameters, voor de verschillende sneden van ZrO₂-TiN in vergelijking met de referentiewaarden van hardmetaal

4.2. SEM-beelden

In Figuur 4.2-1 zijn de microscopische beelden van de oppervlaken en de doorsnede te zien, van de 1^{ste} snede tot en met de 6desnede, van de gedraadvonkt monsters uit ZrO₂-TiN. Het beeld is gemaakt met behulp van SEM. Uit de oppervlaktetopologie kan er opgemaakt worden welke materiaalfnamemechanismen plaatsvonden gedurende het draadvonkproces.

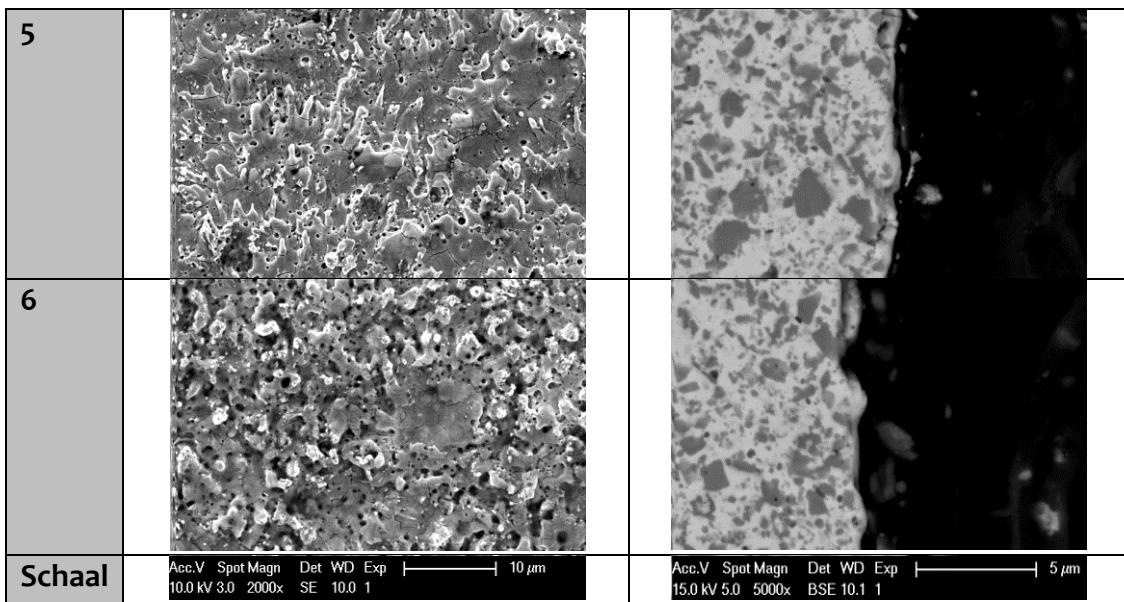
Voor de sneden 1 tot en met 5 zijn op het oppervlak duidelijk de opnieuw gestolde druppels te zien als gevolg van het smelten en verdampen tijdens het draadvonken. De minuscule scheurtjes van ongeveer 3 µm die te zien zijn, zijn het gevolg van het opnieuw stollen van de recast layer en het daardoor weer inkrimpen van de bovenste laag terwijl de laag eronder hiervan geen effect ondervond. Op de doorsneden is te zien dat de scheurtjes zich echter in de eerste snede niet beperken tot de recast layer, maar zich op sommige plaatsen doorzetten tot in de thermisch beïnvloede laag. Naarmate er meer finiserende sneden gebruikt zijn verdunt de witte laag.

Naast de gestolde druppels en uitlopers zijn op de oppervlakken ook poriën te zien. Deze kunnen verklaard worden doordat bij de oxidatie van TiN, gas van N₂ uit het oppervlak is ontsnapt. De oxidatie van Titanium vindt plaats door draadvonken van ZrO₂-TiN in gedemineraliseerd water, de thermische opwarming tijdens het proces geeft aanleiding tot oxidatie. Oxidatie van TiN gebeurt typisch boven een temperatuur van 500°C. De vergelijking voor de oxidatie van TiN kan als volgt gegeven worden :



Bij de 6de snede is te zien dat het oppervlak een schuimige structuur heeft. De reden hiervoor is dat bij deze snede dekompositie het dominerende materiaalafnamemechanisme is. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in een lagere pulsenergie die gebruikt wordt, de reden hiervoor zou gevonden kunnen worden in het feit dat de iso-pulsfrequentie veel hoger ligt dan bij de vorige snede en deze minder zorgen voor vonkdoorslagen. TiN heeft al een oxidatietemperatuur vanaf 500°C, terwijl de smelttemperatuur van ZrO₂ op 2700°C ligt. Waardoor oxidatie van TiN plaatsvindt en het smelten en verdampen van ZrO₂ minder domineert in tegenstelling tot bij de andere finiserende sneden.

| Snede | Oppervlakte | Doorsnede |
|-------|-------------|-----------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |



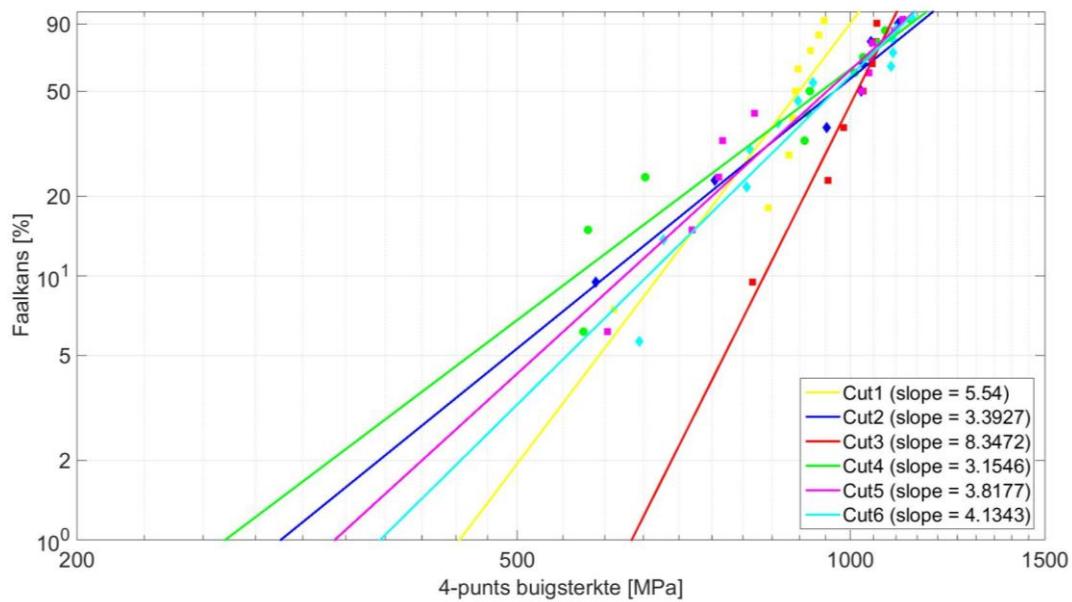
Figuur 4.2-1 SEM-beelden van het oppervlak en de doorsnede van de verschillende gedraadvonkte sneden van ZrO₂-TiN

4.3. Buigtesten

4.3.1.1. Buigsterkte

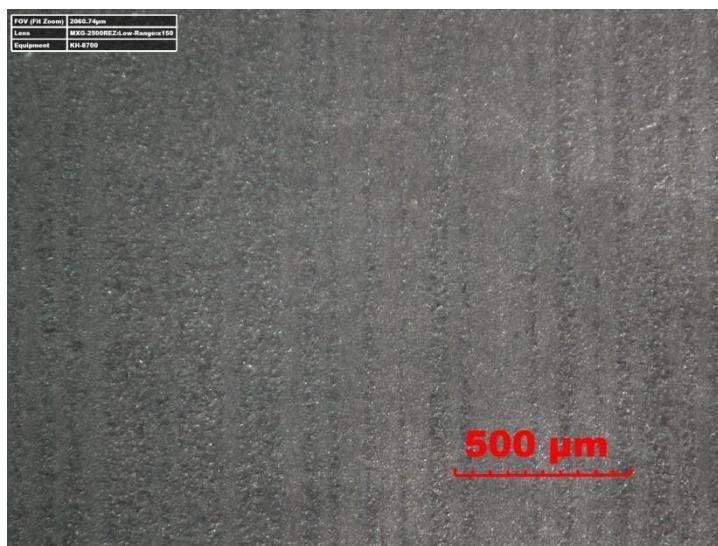
De buigtesten werden uitgevoerd op buigmonsters van de verschillende sneden. Grafiek 4.3-1 geeft de weibull verdeling weer voor de gedraadvonkte sneden van 1 ruwe snede tot en met de 6^{de} finiserende snede. Waarbij de x-as de buigsterkte, bekomen door de 4-punts buigtest weergeeft en de y-as de faalkans.

De Weibull modulus (zie alinea 2.2.1.2) geeft de helling van de curve. In de grafiek valt het direct op dat alle lijnen, behalve deze van de eerste snede, elkaar snijden op een gezamelijk punt, namelijk bij 1100 MPa en een faalkans van 70%. Bij een toenemend aantal sneden werd een translatie eerder verwacht dan een rotatie. In de grafiek is duidelijk te zien dat de translatie geld tussen de eerste en de tweede snede, maar na de tweede snede is te zien dat de lijnen van de andere finiserende sneden roteren rond het gezamenlijke punt. Dit duidt erop dat de finiserende sneden eerder zorgen voor een vermindering in variatie.

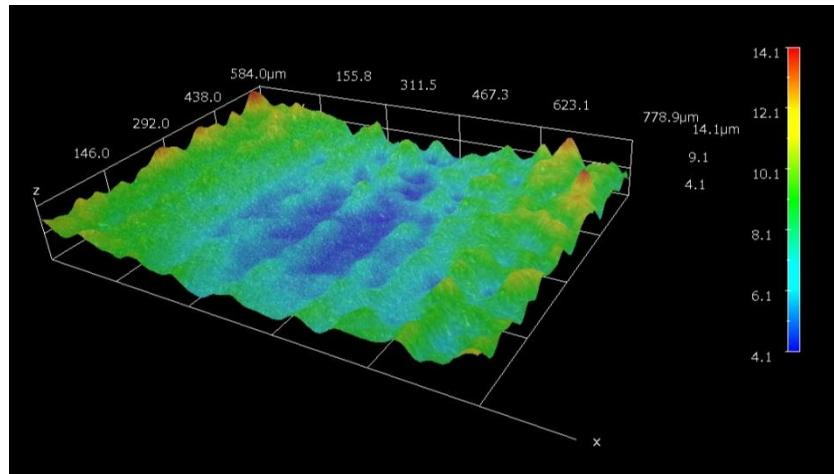


Grafiek 4.3-1 Weibull verdeling voor de buigsterkte van snede 1 tot en met snede 6

Hoewel verwacht zou worden dat de monsters met zes sneden de beste resultaten zouden geven, aangezien deze de beste oppervlakteruwheid hebben (zie paragraaf 0), is dit hier echter niet het geval. De monsters met drie sneden geven hierbij de beste weibull modulus en geven dus de hoogste betrouwbaarheid, hoewel deze een veel hogere ruwheid hebben dan de monsters met meer finiserende sneden. De verklaring kan gevonden worden door de doorsneden (zie Figuur 4.2-1) nader te bekijken. Op de doorsnede van de derde snede is te zien dat deze een vloeidend oppervlak heeft, terwijl bij de hogere finiserende sneden het oppervlak meer putten en bulten bevat met scherpe overgangen, weliswaar met een lagere hoogte dan de golving in de derde snede. De scherpe overgangen bij de 6^{de} snede zijn duidelijk te zien in de vorm van lijnen op het gedraadvonkte oppervlak. (zie Figuur 4.3-1 en Figuur 4.3-2)



Figuur 4.3-1 Oppervlak van een buigmonster met 6 sneden, gedraadvonkt op Charmilles Robofil 240cc
 $t_e: 0.40\mu s$, $t_o: 1.6\mu s$, $u_i: 240V$, $I_e: 6A$; $R_a: 0.45\mu m$



**Figuur 4.3-2 3D-Oppervlak van een buigmonster met 6 sneden, gedraadvonkt op Charmilles Robofil 240cc
te: 0.40μs, to : 1.6μs, ui : 240V, ie : 6A ; Ra: 0.45μm
(genomen met de 3D digitale microscoop van Hirox KH8700)**

4.3.1.2. Breukvlakken

De breukvlakken van na de buigtesten worden nader bekeken met de 3D digitale microscoop van Hirox, KH8700, dit bij buigmonsters van ZrO₂-TiN gedraadvonkt met 6 sneden. ZrO₂-TiN geeft brosse breuken(zie alinea 2.2.1)bij de buigtesten. Elke imperfectie of scheurtje zorgt ervoor dat het keramische materiaal zwakker wordt en op die plek gaat splijten [26]. Bij de breukvlakken die gevormd werden, kon bij alle sneden gezien worden dat de breuken gevormd werden door splijten, de breukvlakken zijn typisch glad en er wijzen geen karakteristieke oppervlaktekenmerken in een bepaalde richting van de oorsprong van de breuk. Het splijten gebeurd typisch langs wijd verspreide, opeengepakte vlakken.

| | Breukvlak zijaanzicht | Breukvlak oppervlakte |
|---|-----------------------|-----------------------|
| A | | |
| B | | |

Tabel 4.3-1 Breukvlakken bij de 6de snede na buigtest

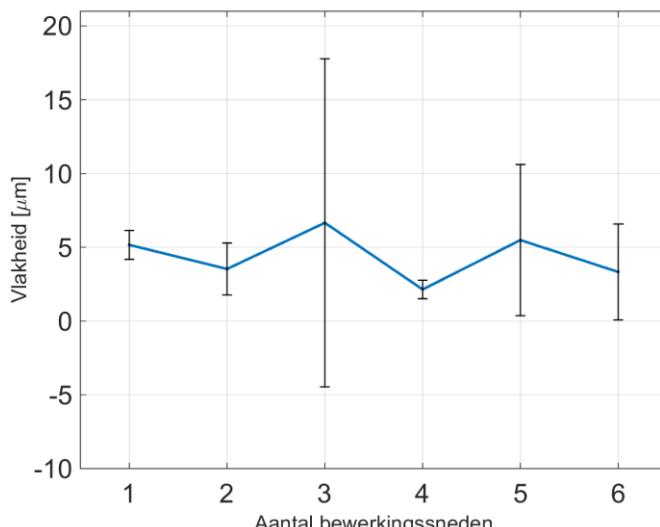
4.3.2. CMM-metingen

Om de dimensionele nauwkeurigheid van het draadvonken te beoordelen, werd met de CMM de vlakken van de gedraadvonkte plaatjes opgemeten en daarvan de vlakheid berekend. De methode van opmeten kan gevonden worden in alinea 3.4.4 In Tabel 4.3-2 zijn de vlakheidswaarden te vinden die opgemeten zijn na het draadvonken van de plaatjes voor de buigmonsters, maar voor deze werden doorgesneden tot buigmonsters. Voor elke snede werd het voor- en achtervlak opgemeten, per plaatje zijn er 2 vlakheidswaarden te vinden en dit telkens voor 4 plaatjes. De groen gearceerde waarden in de grafiek geven de beste vlakheden van elke snede weer, de oranje gearceerde waarden de slechtste. Alle waarden die buiten tolerantie zitten zijn onderlijnt. Het valt hierbij op dat bij de eerste snede veel meer vlakken uit het tolerantieveld zijn dan bij de andere sneden. Er zit bij de derde snede 1 uitschieter in van een vlakheid van 39,4 μm , maar dit is waarschijnlijk te wijten aan een foutieve meting.

| # gemeten vlakken | 1 snede | 2 sneden | 3 sneden | 4 sneden | 5 sneden | 6 sneden |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 4 | 5,6 | 4,5 | 1,2 | 4,8 | 2,1 |
| 2 | 4,6 | 1,8 | 2,5 | 1,9 | 16,1 | 1,7 |
| 3 | 6,4 | 2 | 39,4 | 1,5 | 1,9 | 1,4 |
| 4 | 5,8 | 1,8 | 1,8 | 3 | 2,4 | 1,4 |
| 5 | 4,2 | 4,3 | 3,6 | 2,8 | 1,9 | 11,1 |
| 6 | 6,4 | 2,1 | 2,5 | 2,3 | 9,9 | 3,5 |
| 7 | 5,2 | 2,9 | 2,5 | 2,6 | 1,3 | 4,1 |
| 8 | 5,5 | 4,1 | 2,2 | 1,8 | 5,8 | 1,5 |
| Gemiddelde | 5,2 | 3,5 | 6,7 | 2,1 | 5,5 | 3,3 |
| Standaard- afwijking | 1 | 1,8 | 11 | 0,6 | 5,1 | 3,3 |

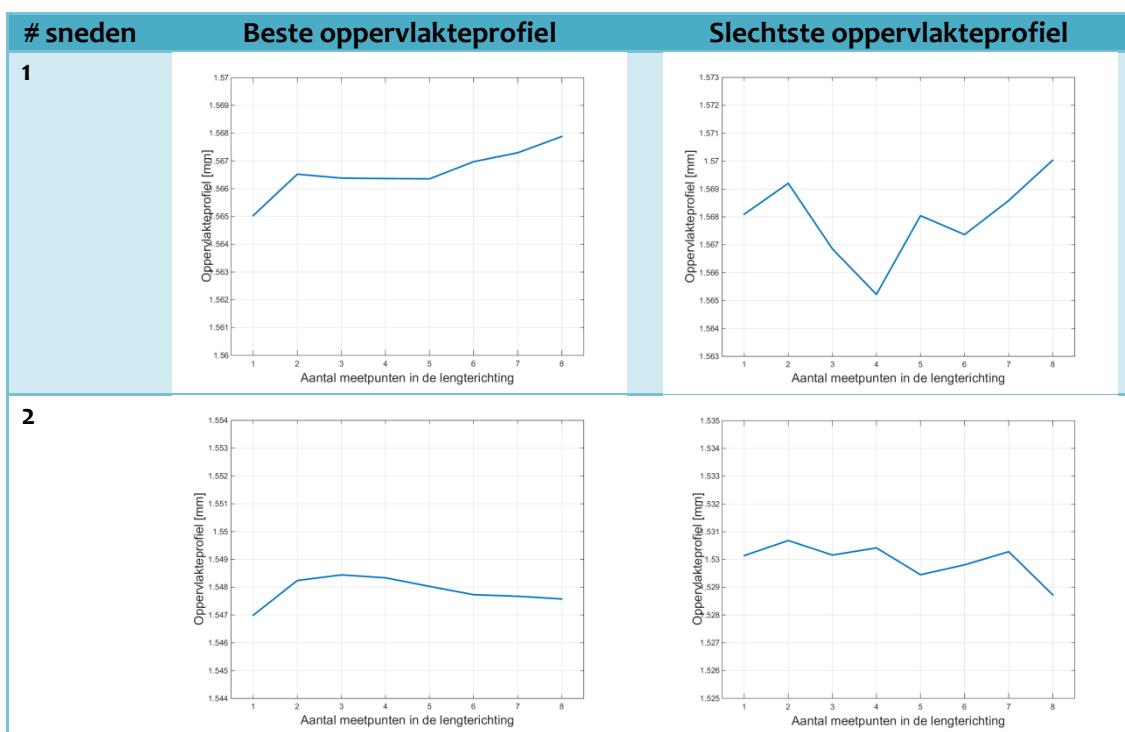
Tabel 4.3-2 Vlakheid (in μm) van de opgemeten vlakken van de plaatjes voordat deze tot buigmonsters werden omgevormd.

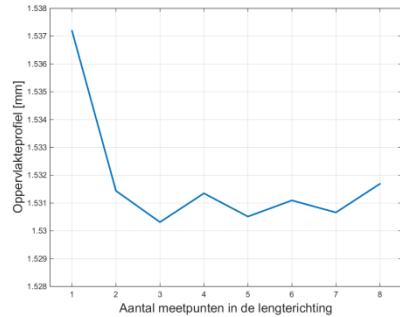
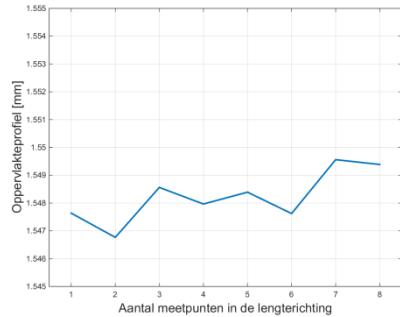
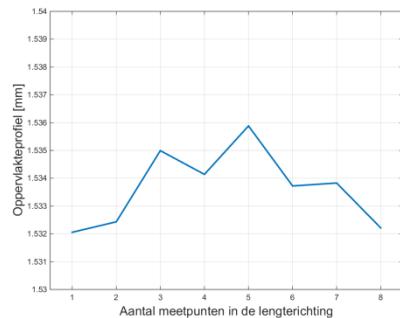
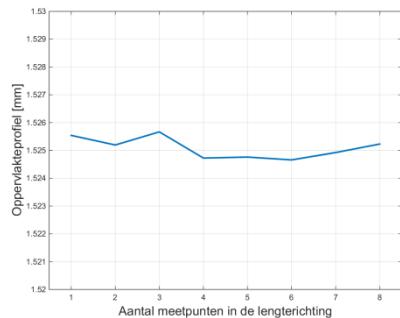
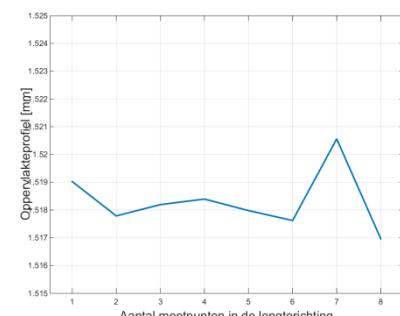
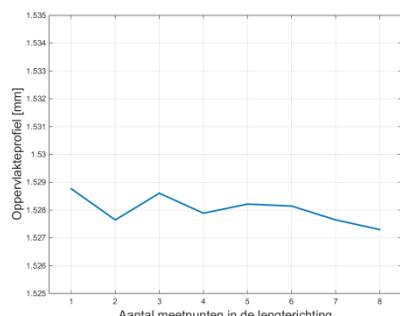
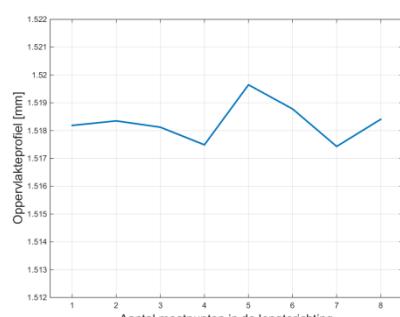
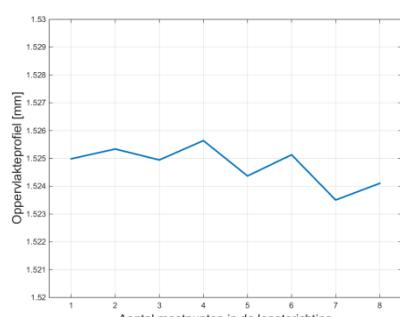
In Grafiek 4.3-2 zijn de gemiddelde meetwaarden van de vlakheid per snede uitgezet alsook de standaardafwijking van deze meetwaarden. In de grafiek kan afgelezen worden dat de gemiddelde vlakheid voor alle sneden varieert rond 5 μm . De gemiddelde vlakheid is het beste bij vier en zes sneden en het slechtste bij drie sneden. (zie Figuur 4.2-1). De beste vlakheid is te vinden bij het draadvonken met 4 sneden, hierbij kwam geen enkele waarde van de vlakheid boven 3 μm . De eerste ruwe snede heeft het meeste aantal metingen boven 5 μm . Bij de finiserende sneden zijn er ook nog uitschieters, maar minder frequent. Hieruit kan opgemaakt worden dat finiserende sneden helpen voor de vlakheid.



Grafiek 4.3-2 De gemiddelde meetwaarden en standaardafwijking per bewerkingssnede

In Tabel 4.3-3 zijn de beste en de slechtste oppervlakteprofielen te vinden van elke snede, en dit over 8 meetpunten in de lengterichting van de plaatjes. Daarbij kan gezien worden dat bij het slechtste profiel van de drie snede inderdaad een uitschiet voorkomt in het begin van het profiel. Het profiel van de vier sneden geeft hierbij het beste resultaat.



3**4****5****6**

Tabel 4.3-3 De beste en de slechtste oppervlakteprofielen van elke snede

4.4. Besluit

De oppervlakteruwheden die opgemeten zijn, zijn bij alle sneden, met uitzondering van zesde snede, onder de vooropgestelde ruwheidswaarden die Charmille geeft voor het draadvonken van hardmetalen. De ruwheid bij de zesde snede is beter dan de ruwheid van de 5^{de} snede, maar ten opzichte van de referentie-waarde ligt deze iets hoger. De doelstelling om een Ra-waarde van 0.5 µm met 5 sneden te kunnen halen werd gehaald. De productie-efficiëntie kon hierbij ook verbeterd worden door een kortere productietijd bij heet draadvonken.

Bij de buigtesten is voor alle sneden, behalve voor de 1ste ruwe snede, een duidelijke verzameling van buigsterkten te zien rond 1100 MPa en dit bij een faalkans van 70 %. Hieruit kan besloten worden dat de finiserende sneden meer de variatie in de buigsterkte beïnvloeden.

Verwacht werd dat de zesde snede de kleinste variatie zou hebben, doordat bij de zesde snede ook de kleinste ruwheid gemeten is, dit is echter niet het geval. De kleinste variatie kan gevonden worden bij de 3de snede, dus bij het bewerken met 1 ruwe snede en 2 finiserende sneden. Op de SEM-beelden is te zien dat dit komt doordat het oppervlak van de 3^{de} snede vloeinder is, met minder brute overgangen. Bij de 4^{de}, 5^{de} en 6^{de} snede is de oppervlakteruwhedan wel beter, het oppervlak bevat steilere pieken en dalen. Vooral bij de 6^{de} snede is een schuimige structuur op het oppervlak te vinden. Dit zou erop wijzen dat in deze snede naast smelten en verdampen als materiaalverwijderingsmechanisme ook dekompositie plaatsvindt. Bij de andere sneden is het dominante materiaalverwijderingsmechanisme smelten en verdampen.

Bij de 1ste snede is er nog een duidelijke witte laag aan het oppervlak te zien, hiernaast zijn er duidelijk microscopische scheurtjes van ongeveer 3 µm te zien die zich in de witte laag bevinden en zelfs er voorbij gaan. Dit kan aangeven waarom de buigsterkte bij de eerste snede meer naar links ligt. De witte laag vermindert al een groot deel vanaf de 2^{de} snede. Dit verklaart waarom de weibull-grafiek tussen de 1^{ste} ruwe snede en de andere sneden eerder transleert dan roteert.

De dimensionele nauwkeurigheid van het draadvonkproces werd gecontroleerd door de vlakheid op te meten. Van de gemiddelde waarden hadden de 2^{de}, 4^{de} en 6^{de} snede een vlakheid onder 5 µm. Bij de 3^{de} snede kan er wel aangenomen worden dat er waarschijnlijk een foutieve meting in één punt gebeurd is. Het draadvonken met vier sneden geeft de beste vlakheid met een maximum van 3 µm, dit kan ook gezien worden in het oppervlakteprofiel.

Hoofdstuk 5 : Conclusie

In de industrie wordt de oppervlakteruwheid vaak gebruikt als maatstaf om het EDM-proces te evalueren. De parameters die bij een vorig onderzoek gevonden werden, konden nog verbeterd worden waardoor een betere ruwheid bekomen werd bij een minder aantal sneden, namelijk een $R_a=0.45 \mu\text{m}$ bij 6 sneden. Deze 6 sneden bestonden uit 1 ruwe snede waarna 5 finiserende sneden volgden. Dit zorgt voor een verhoogde procesefficiëntie doordat de doorlooptijd kon gereduceerd worden. De ruwheden zijn over het algemeen beter dan wat voorzien was door de EDM-fabrikant.

De resultaten van de buigtesten werden uitgezet in een Weibull-grafiek, deze tonen aan dat er echter geen samenhang is tussen de oppervlakteruwheid en de buigsterkten. De beste ruwheid kan gevonden worden bij de 6^{de} snede terwijl de beste buigsterkten gevonden konden worden bij de 3^{de} snede. Dit wordt ondersteund door SEM-beelden van het gedraadvonkte oppervlak, hierbij is te zien dat bij de 3^{de} snede het oppervlak lichtjes golvend is, zonder abrupte overgangen.

De gemiddelde vlakheid lag voor alle sneden rond $5\mu\text{m}$. De beste vlakheid kon gevonden worden bij de 4^{de} snede waar de maximale vlakheid $3 \mu\text{m}$ is.

Hieruit volgt dat er geen samenhang is tussen de oppervlakteruwheid, de oppervlakte-integriteit en als gevolg de buigsterkte. Indien het mechanische gedrag belangrijker is dan de afwerking van het oppervlak, is het beter om de oppervlakte-integriteit te bekijken dan de oppervlakteruwheid. Voor verder onderzoek zou het goed zijn om een link te hebben tussen de oppervlakte topologie en het mechanische gedrag, doordat dit makkelijk en snel op te meten is. Frequentie-analyse zou hierbij een mogelijke oplossing kunnen bieden, omdat dit de mogelijkheid geeft om bepaalde topologische vormen te onderscheiden.

Bibliografie

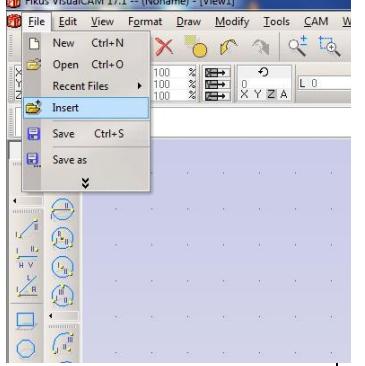
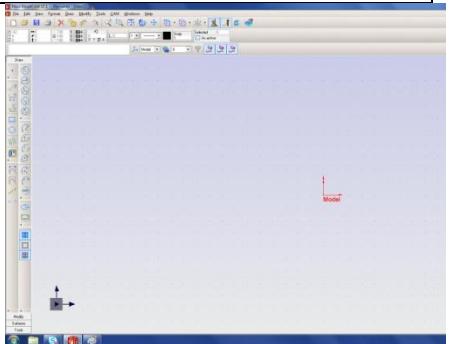
- [1] J. Wijers, P. Boers, N. Kooijmans, B. Lauwers, F. v. d. Pol, C. Ruyter, C. Rijneveld, F. v. Tuijl en P. Wolf, Vonkerosie theorie en praktijk, Zoetermeer: Vereniging FME-CWM.
- [2] M. Shabgard, M. Seyedzavar en S. Oliae, „Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2011, nr. 57, pp. 689-696.
- [3] T. Muthuramalingam en B. Mohan, „A review on influence of electrical proces parameters in EDM process,” *archives of civil and mechanical engineering*, vol. 2014, nr. 201.
- [4] P. W. Bach, „Mechanische aspecten bij het ontwerpen en construeren met keramieken,” *Mikroniek*, nr. 88, 1993.
- [5] P. Bach, „Mechanische aspecten bij het ontwerpen en construeren met keramieken,” *Mikroniek*, nr. 88, 1993.
- [6] D. R. Askeland, P. P. Fulay en W. J. Wright, „Mechanical Failure of Ceramics,” in *The Science & Engineering of Materials*, Stamford, USA, Cengage Learning, 2006, pp. 453-461.
- [7] W. Dax, K. Gundelfinger, W. Häffner, H. Itschner en G. Kotsch, *Tabellenboek voor metaaltechniek*, Hamburg: Plantyn, 2000.
- [8] C. Hu, Y. Zhou en Y. Bao, „Material Removal and surface damage in EDM of Ti₃SiC₂ ceramic,” *Ceramics international*, vol. 2008, nr. 34, pp. 537-541.
- [9] N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito en K. Furutani, „Assisting Electrode Method for Machining Insulating Ceramics,” *Annals of the CIRP*, vol. 1996, nr. 45.
- [10] K. Patel, P. M. Pandey en P. V. Rao, „Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of AL₂O₃ ceramic composite,” *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 2009, nr. 27, pp. 892-899.
- [11] M. Tokita, „Trends in advanced SPS spark plasma sintering systems and technology,” vol. 1993, nr. 30:11, pp. 790-804.
- [12] „<https://www.ceramtec.com/>,” [Online]. [Geopend 3 12 2015].
- [13] J. R. Groza en A. Zavaliangos, „Sintering activation by external electrical field,” *Material science and engineering*, vol. 2000, nr. A287, pp. 171-177.
- [14] K. Wegener, H.-W. Hoffmeister, B. Karpuschewski, F. Kuster, W.-C. Hahmann en M. Rabiey, „Conditioning and monitoring of grinding wheels,” *Manufacturing Technology*, vol. 2011, nr. 60, pp. 757-777.
- [15] C. Martin, B. Cales, P. Vivier en P. Mathieu, „Electrical Discharge Machinable Ceramic Composites,” *Materials Science and Engineering*, vol. 1989, nr. A109, pp. 351-356.
- [16] B. Lauwers, J. Kruth, W. Liu, W. Eeraerts, B. Schacht en P. Bleys, „Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 2004, nr. 149, pp. 347-352.
- [17] C. Trueman en J. Huddleston, „Material removal by spalling during EDM of ceramics,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 2000, nr. 20, pp. 1629-1635.
- [18] B. Lauwers, K. Brans, W. Liu, J. Vleugels, S. Salehi en K. Vanmeensel, „Influence of the type and grain size of the electro-conductive phase on the Wire-EDM performance of ZrO₂ ceramic composites,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 2008, nr. 57, pp. 191-194.
- [19] O. Malek, J. Vleugels, Y. Perez, P. De Baets, J. Liu, S. Van den Berghe en B. Lauwers, „Electrical discharge machining of ZrO₂ toughened WC composites,” *Materials*

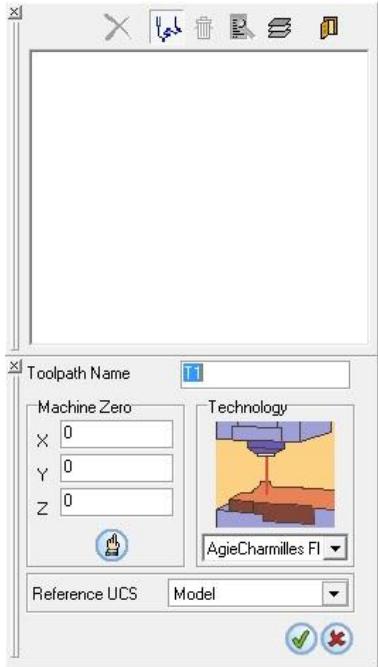
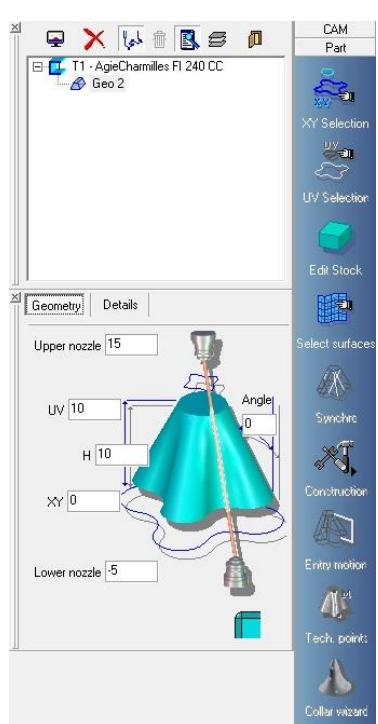
- Chemistry and Physics*, vol. 2010, nr. 123, pp. 114-120.
- [20] T. Matsuo en E. Oshima, „Investigation on the optimum Carbide content and Machining Condition for Wire EDM of Zirconia Ceramics,” *Annals of the Cirp*, nr. 414, 1992.
 - [21] K. Bonny, P. De Baets, J. Vleugels, A. Salehi, O. Van der Biest, B. Lauwers en W. Liu, „Influence of secondary electro-conductive phases on the electrical discharge machinability and frictional behavior of ZrO₂-based ceramic composites,” *Journal of materials processing technology*, nr. 208, pp. 423-430, 2008.
 - [22] Y. Perez Delgado, K. Bonny, P. De Baets, P. Neis, O. Malek, J. Vleugels en B. Lauwers, „Impact of wire-EDM on dry sliding friction and wear of WC-based and ZrO₂-based composites,” *Wear*, nr. 271, pp. 1951-1961, 2011.
 - [23] K. Bonny, P. De Baets, J. Vleugels, A. Salehi, O. Van der Biest, B. Lauwers en W. Liu, „Influence of electrical discharge machining on tribological behavior of ZrO₂-TiN composites,” *Wear*, nr. 265, pp. 1884-1892, 2008.
 - [24] K. Bonny, P. De Baets, J. Vleugels, A. Salehi, O. Van der Biest, B. Lauwers en W. Liu, „EDM machinability and frictional behavior of ZrO₂-WC composites,” *Int J Adv Manuf Technol*, nr. 41, pp. 1085-1093, 2009.
 - [25] R. E. Williams en K. P. Rajurkar, „Study of wireelectrical discharge machined surface characteristics,” *Journal of Materials Processing Technology*, nr. 28, pp. 127-138, 1991.
 - [26] D. R. Askeland, P. P. Fulay en W. J. Wright, „Microstructural Features of Fracture in ceramics, glasses and composites,” in *The Science and Engineering of Materials*, 6de editie red., Stamford, Cengage Learning, 2006, pp. 258-260.
 - [27] Taylor Hobson, Exploring Surface Texture, A fundamental guide to the measurement of surface finish, 7de editie red., Great Britain: Taylor Hobson, 2011.
 - [28] „Keramverband,” [Online]. Available: http://www.keramverband.de/brevier_engl105410_5_4.htm. [Geopend 01 12 2015].

Bijlagen

Bijlage A: Bestand voorbereiden met Fikus Visualcam

17.1

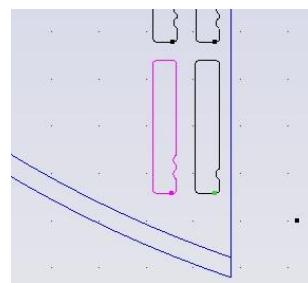
| | |
|---|---|
| Programma openen |  |
| Tekening inladen <ul style="list-style-type: none">❖ Dxf/Dwg 2D inladen, (3D kan ook maar wegens een te lichte grafische kaart is dit niet aan te raden) → opslaan als Dxf ASCII 2002 In het programma kan ook getekend worden maar is ook niet aan te raden.<ul style="list-style-type: none">• Insert : map zoeken |  |
| OPM: bij een gat de offset naar binnen zetten, bij de omtrek de offset naar buiten. | |
| <ul style="list-style-type: none">❖ Vertrekpunten instellen<ul style="list-style-type: none">• Punten uitzetten → positie kan nog aangepast worden, kan ook al in het dxf-bestand op voorhand uitgezet worden.• In dien nodig kan dit nog getekend en aangepast worden in het tekengedeelte. |  |
| Van drawing naar CAM | |
| <ul style="list-style-type: none">❖ Tabblad CAM |  |

| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Nieuw toolpath |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ➔ Nulpunt instellen van je stuk ➔ Machine selecteren ➔ Bevestigen |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • Hoogte instellen <ul style="list-style-type: none"> ➔ Xy = gelijk met de bovenkant van de tafel, indien er zich niets tussen de tafel en het stuk bevindt = onderkant stuk ➔ De hoek van de draad kan ook ingesteld worden |  |

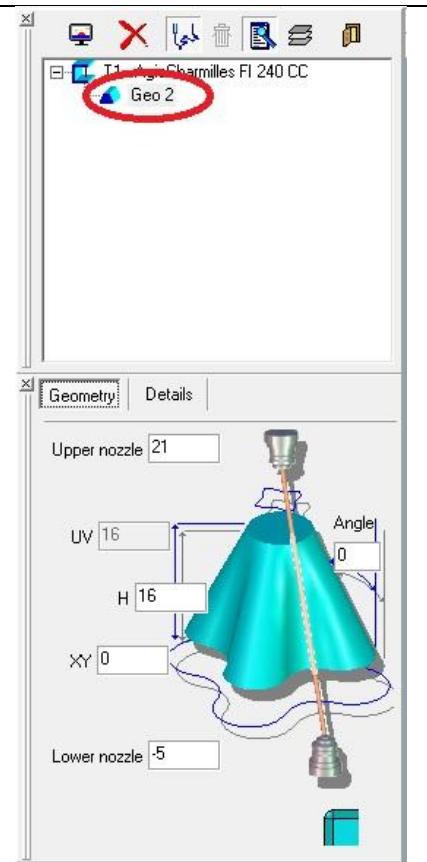
- ❖ Tabblad PART
• XY-selectie



➔ Path selecteren + ENTER



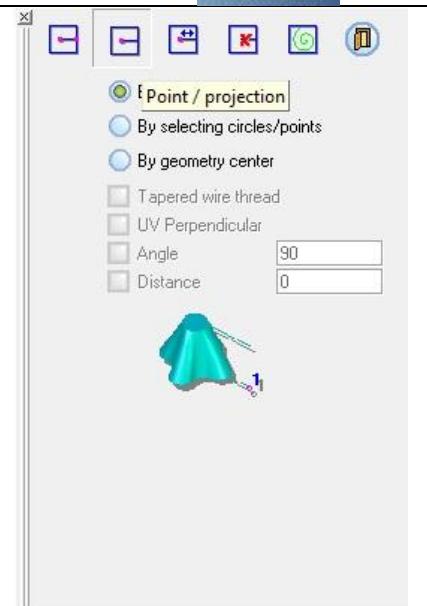
Als het icoontje bij GEO vol staat heeft hij de geometrie gevonden.



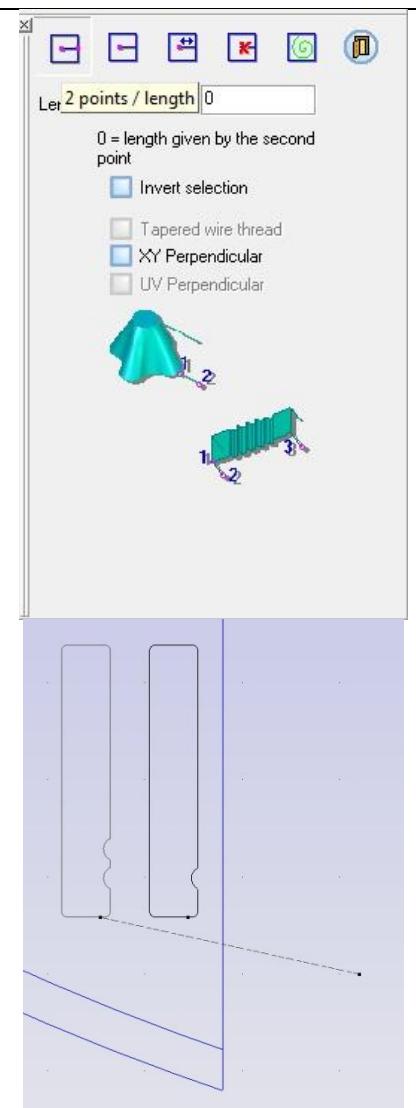
- Entry motion: hoe je naar je stuk wil gaan, verschillende mogelijkheden



→ 1 punt selecteren op je stuk + enter
-> vertrek van nulpunt



→ 2 punten selecteren: eerst een punt op je stuk en dan het punt van waaruit je wilt vertrekken + enter of op de deur klikken

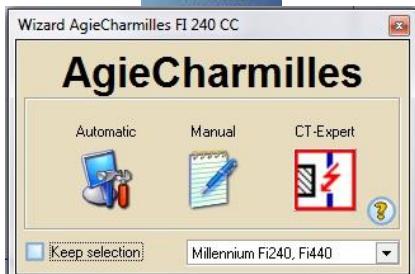


❖ Tabblad PROCESS

- Hoe je het stuk wil uitsnijden, met welk proces



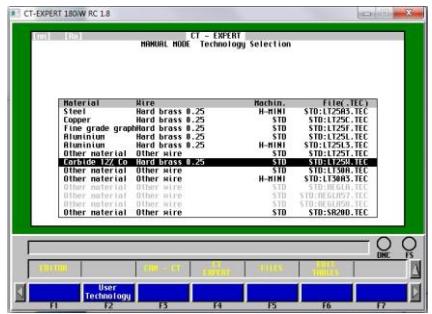
- Wizard -> CT-Expert (DOS)



- Manual creation selecteren met pijltjestoets + enter



- Keuze op basis van het materiaal en de draad
 → AC messing selecteer:
 Carbide 12% Co wire hard brass
 0,25
 + enter

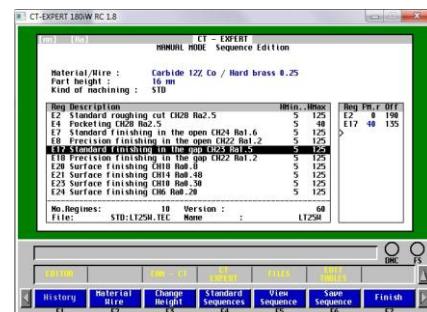


- Hoogte ingeven

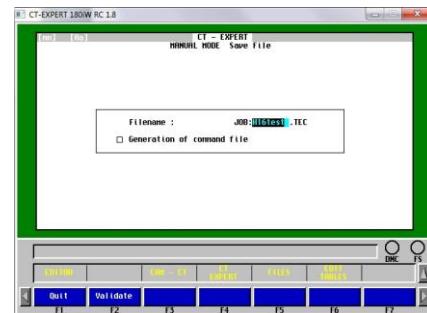


→ Sequenties selecteren die je wil uitvoeren + F6 (save sequence)

- Altijd eerst roughing selecteren
- Standard finishing Open -> om het middelste stuk uit je gat te kunnen nemen.

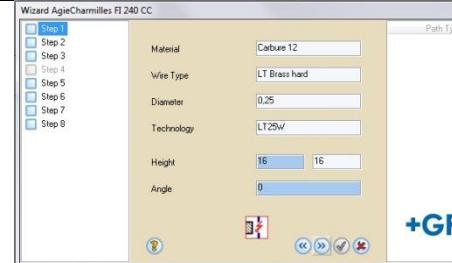


→ Naam geven + F2 (Validatie)



- Verder gaan in een nieuw venster van de wizard

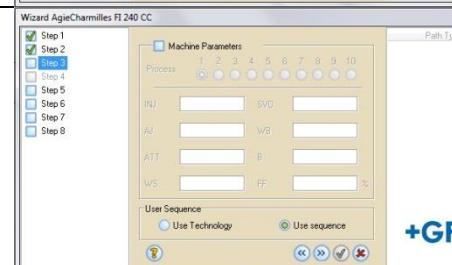
→ Met de dubbele pijlen verder gaan in het menu

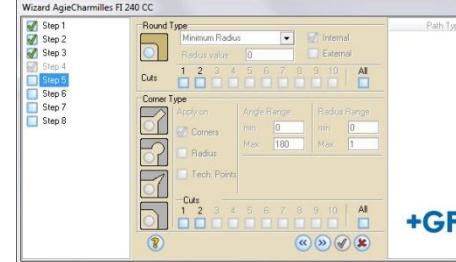
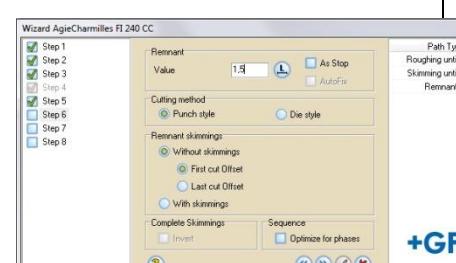
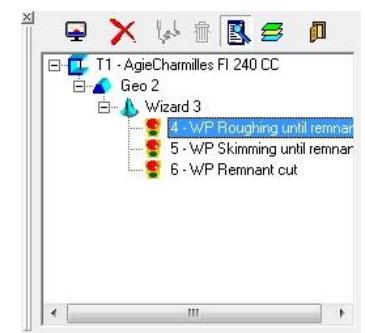


- M27= geen beveiliging -> best niet selecteren
- M28= beveiliging ook tegen kortsluiting -> selecteren
- M24= veiligheid -> selecteren



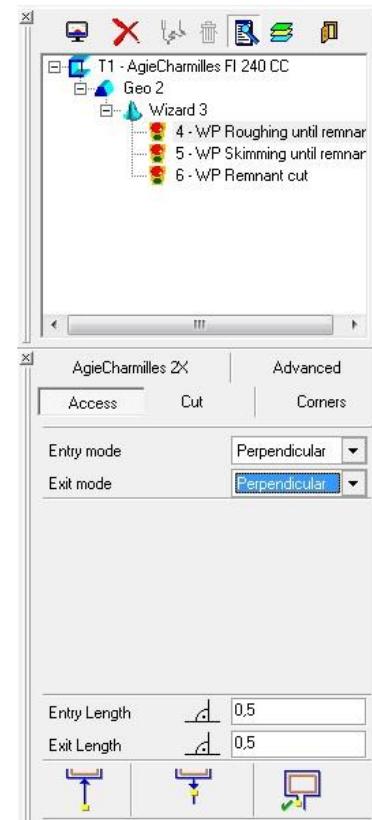
- De machineparameters zitten in de technology tables dus hoeven we niet in te vullen
Use sequence aanvinken



| | |
|---|---|
| <p>→ Minimum radius = om de hoeken op af te ronden, dit kan in ieder geval niet scherper dan de draad + sparkling gab Sharp corners -> enkel toegepast op scherpe hoeken</p> |  <p>+GF</p> |
| <p>→ Remnant = de hoeveelheid materiaal dat hij op je stuk laat staan van de omtrek opdat dit niet in het bad zou vallen. Kan in mm of %. % is makkelijker indien er een cirkel bewerkt wordt.</p> |  <p>+GF</p> |
| <p>→ Compensatie: links of rechts afwerken, het icoontje erna is zodat de machinebanen niet in elkaar lopen bv. Bij heel kleine gaten. → Overlap = over de contour gaan → Return to thread point: na elke contour gaat de machine terug naar zijn startpunt</p> |  <p>+GF</p> |
| <p>→ Stops: before remnant = voordat het laatste stukje wordt weggevонkt. → De wizard afsluiten door op de V te klikken. Hierna worden de sequency's samen gesteld.</p> |  <p>+GF</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> Voor de verdere aanpassingen klikken we op de sequency bovenaan |  |

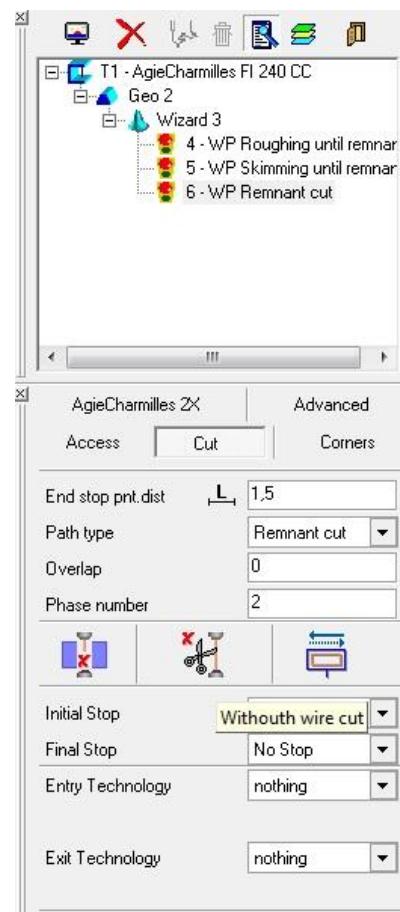
→ Onder Access : Entry = hoe je naar je stuk gaat

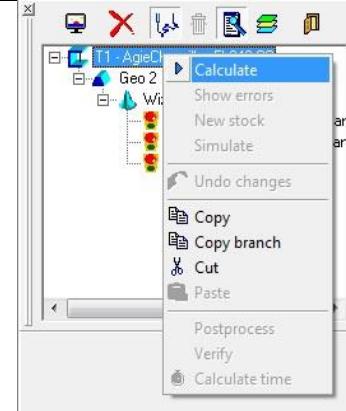
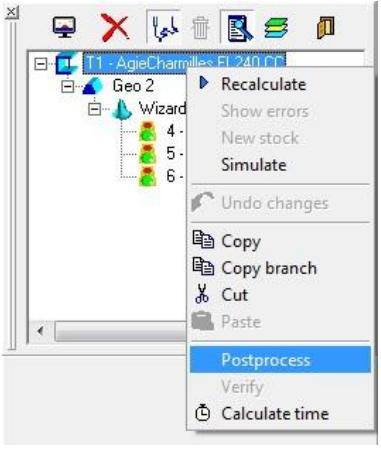
- Free = recht op recht
- Perpendicular = hij gaat loodrecht in zijn stuk
- Tear arc = hij gaat in een boog in zijn stuk -> beter voor keramiek.



→ Onder Cut

- Bij de laatste cut staat de draad knippen automatisch aan . bij contour mag dit afstaan.



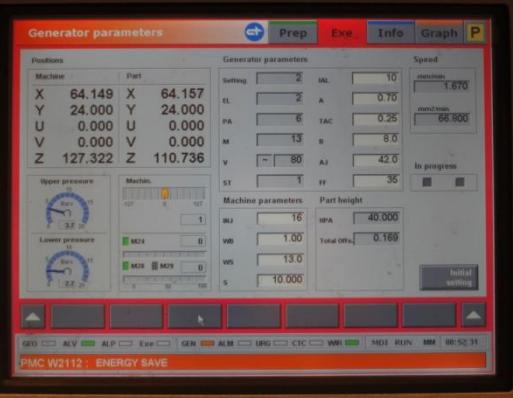
| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ❖ Om de sequency's te berekenen, op de bovenste lijn met de rechtermuisknop klikken en calculate selecteren. → hierbij wordt de bewerkingstijd en de banen berekend. Na de berekening best opslaan. |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ❖ Om het programma te schrijven, op de bovenste lijn met de rechtermuisknop klikken en postprocessing selecteren. |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ❖ Nu heeft het programma een mapje aangemaakt. In dit mapje zit het programma met de bewerkingsbanen en een technologietabel met de gebruikte parameters. Dit mapje dient volledig gekopieerd te worden om op de machine te werken. | |

Bijlage B : Werking Charmilles Robofil 240CC

| | |
|---|--|
| ❖ Stuk opspannen | |
| <ul style="list-style-type: none"> Opletten dat het stuk niet schuin staat → botsing met de kop | |
| <ul style="list-style-type: none"> Stuk uitlijnen met de meetklok zodat het loodrecht op de x- of y-as staat of op beiden in het geval van rechte stukken. | |
| ❖ Tabbladen | |
| <ul style="list-style-type: none"> Exe = uitvoeren | |
| <ul style="list-style-type: none"> Prep = voorbereiding <ul style="list-style-type: none"> bestand kopiëren Naam wijzigen Technology tables (parameters) | |
| <ul style="list-style-type: none"> Info <ul style="list-style-type: none"> Doc online, om foutcodes op te zoeken Messages, om de laatste foutmeldingen te kunnen bekijken | |
| <ul style="list-style-type: none"> Graph = grafische voorstelling van de snijbanen | |
| ❖ Knoppen | |
| <ul style="list-style-type: none"> Groene knop links: commando uitvoeren | |
| <ul style="list-style-type: none"> Rode knop links: machine stoppen | |
| <ul style="list-style-type: none"> Blauwe knop links: reset, machine stoppen + alles resetten, oppassen bij een programma dat bezig is, dit wordt helemaal opnieuw begonnen | |
| ❖ Aftasten voor nulpunt | |

| | | | |
|---|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Manueel bewegen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Op de blauwe knop met het handje drukken om te activeren ○ Verschillende snelheden, onderaan in te stellen->eerste step is per duizendste van een seconde bewegen. ○ Bij snelste branden alle 3 de lampjes, dit wordt geactiveerd door 2-maal op de rechtse knop te drukken. |  | <ul style="list-style-type: none"> • Om x in te stellen: <ul style="list-style-type: none"> ➔ bij Exe :MDI: ➔ EDG,-x,xo.125 + ENTER ➔ om uit te voeren op de groene knop links drukken. →-x geeft de richting weer waarin getast wordt. ➔ xo.125 geeft de diameter van de draad weer. Dit is nodig omdat D t.o.v. de rand gemeten wordt en niet t.o.v. het center van de draad zoals bij het coördinatensysteem het geval is. ➔ D = finale distance = de afstand tussen de rand van de draad en het stuk na het aftasten. Dit is meestal 0,875 samen met de straal van de draad $r = 0,125$ geeft dit $x = 1$ ➔ Het stuk staat wel op $x=0$, maar de draad komt op $x=1$ te staan. . |  |
|---|--|---|--|

| <ul style="list-style-type: none"> • Om y in te stellen: idem als x maar x vervangen door y • Y instellen bij een rond stuk <ul style="list-style-type: none"> ➔ Langs beide zijden tasten op dezelfde hoogte en dan delen door 2 om manueel een nulpunt te kunnen instellen. Wel rekening houden met je final distance ➔ 1) G74 Xo. -> x op nul zetten 2) EDG,Y,Yo. -> y op nul zetten 3) 2^{de} y-punt maken : MOV,Xo. EDG,-Y OPM: o. -> het punt dient om duidelijk te maken dat je een geheel getal invoert, dus voor de komma. ➔ De bekomen waarde delen door 2, rekening houdend met de final distance ➔ Ingeven voor y met MOV,Y... ➔ X terug aftasten • Na het aftasten moet de draad nog op het juiste startpunt gebracht worden. | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----------|--|---------|------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| <p>❖ Activate tables</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Uitgang .TEC, worden automatisch ingeladen met het CNC-promgramma | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>❖ Technologieën aanmaken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prep: CT Expert -> nog eens CT Expert <ul style="list-style-type: none"> ➔ manual creation: hiermee kan je de waarden nog aanpassen. ➔ Selecteren met STD |  <table border="1" data-bbox="770 1538 976 1684"> <thead> <tr> <th colspan="2">Positions</th> </tr> <tr> <th>Machine</th> <th>Part</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X 68.038</td> <td>X 68.041</td> </tr> <tr> <td>Y 24.000</td> <td>Y 24.000</td> </tr> <tr> <td>U 0.000</td> <td>U 0.000</td> </tr> <tr> <td>V 0.000</td> <td>V 0.000</td> </tr> <tr> <td>Z 127.322</td> <td>Z 110.736</td> </tr> </tbody> </table> | Positions | | Machine | Part | X 68.038 | X 68.041 | Y 24.000 | Y 24.000 | U 0.000 | U 0.000 | V 0.000 | V 0.000 | Z 127.322 | Z 110.736 |
| Positions | | | | | | | | | | | | | | | |
| Machine | Part | | | | | | | | | | | | | | |
| X 68.038 | X 68.041 | | | | | | | | | | | | | | |
| Y 24.000 | Y 24.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| U 0.000 | U 0.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| V 0.000 | V 0.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Z 127.322 | Z 110.736 | | | | | | | | | | | | | | |

| | |
|---|--|
| <p>❖ Programma uitvoeren</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Programma inladen onder tabblad Exe <ul style="list-style-type: none"> ➔ Program execution ➔ Het gewenste programma selecteren en nog eens op Program execution drukken ○ Programma beginnen door op de groene knop links van het scherm te drukken. |  |
| Tijdens het vonken zijn in het tabblad Exe onder generator parameters de machine en generator parameters te vinden die gedurende het proces gebruikt worden. | |
| <p>❖ Machine parameters</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inj = spoeling mag 10 l/min zijn -> dit kan je enkel bij de 1^{ste} cut instellen, • bij de volgende cuts dien je dit zelf in te stellen op de machine. Minimum 2 l/min tot 5 l/min voor hogere stukken. • WB = spanning op de draad (mechanisch) in decaN (komt overeen met kg) • WS = wire speed • S = speed → limitatie voor rondgangsnelheid (x7,3= meter/min) |  |
| <p>Opm: Hier: Servo-control op basis van de spanning, probeert de spanning gelijk te houden bij de vonk via PI-regeling. Kan ook met een andere modus.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Bij oV heb je kortsluiting ➔ De eerste 3 cuts ga je zo controlleren, de volgende gebeuren met een cste snelheid. | |
| <p>❖ Generator parameters</p> <ul style="list-style-type: none"> • A = duurtijd van de puls • B = tijd tussen de pulsen • FF = de frequentie → deze laat je best op 100 staan, is in %. <ul style="list-style-type: none"> ➔ Om draadbreuk te voorkomen kan je best je tijden aanpassen. ❖ Met de nummers E50. Word de cut aangegeven. E501 = 1^{ste} cut, E502=2^{de} cut, ... | |

Bijlage C : Programmatie in Matlab

Ra-grafiek

```
%%%%%  
% Rouhgness plots  
%%%%%  
close all;  
% clc;  
clear all;  
%% Load the data (meetresultaten inladen)  
folder = 'C:\Users\Jean\liesje\School\Masterproef\ruwheidsmetingen';  
file = 'ruwheidsmetingen ZrO2-TiN H16';  
fid = fopen([folder '\' file '.csv']);  
header = textscan(fid, '%s %s %s %s', 1, 'delimiter', ',' );  
data = textscan(fid, '%u %f %f %f', 'delimiter', ',' );  
fclose(fid);  
%% Arrange data for analysis (meetresultaten sorteren volgens snede)  
cut = data{1,1};  
Ra = data{1,2};  
Rz = data{1,3};  
Rt = data{1,4};  
Ra_ar = zeros(5,6);  
Rz_ar = zeros(5,6);  
Rt_ar = zeros(5,6);  
c = zeros(1,6);  
% Arrangement of the data  
for i = 1:1:length(cut)  
c(cut(i)) = c(cut(i))+1;  
Ra_ar(c(cut(i)),cut(i)) = Ra(i);  
Rz_ar(c(cut(i)),cut(i)) = Rz(i);  
Rt_ar(c(cut(i)),cut(i)) = Rt(i);  
end  
% Calculate means and std for each cut  
Ra_m = mean(Ra_ar);  
Ra_std = std(Ra_ar);  
Rz_m = mean(Rz_ar);  
Rz_std = std(Rz_ar);  
Rt_m = mean(Rt_ar);  
Rt_std = std(Rt_ar);  
% Save the data  
save([folder '\' file], 'cut', ...  
'Ra', 'Rz', 'Rt', ...  
'Ra_ar', 'Rz_ar', 'Rt_ar', ...  
'Ra_m', 'Rz_m', 'Rt_m', ...  
'Ra_std', 'Rz_std', 'Rt_std');  
%% Plot of Ra data (staafdiagram maken)  
Bar_size = 0.75;% Width of the bars  
Bar_col = [0.60 0.60 0.60]; % Color of the bars  
ax_set = [0.5 6.5 0.1 2.25];  
T_size = 18; % Font size title  
A_size = 20; % Font size labels, legend, etc.  
%  
figure(1)  
% Plot the Ra values in bars  
h1 = bar((1:1:6), Ra_m(1:6), 'BarWidth', Bar_size);  
hold on;  
% Plot the error whiskers (standaard afwijking maken op de grafiek)
```

```

h5 = errorbar((1:1:6), Ra_m(1:6), Ra_std(1:6), ...
'o', 'LineWidth',2, ...
'Color',[0,0,0],...
'MarkerSize',8, ...
'MarkerEdgeColor','none', ...
'MarkerFaceColor',[0,0,0]);
axis(ax_set);
xlabel('Aantal bewerkingssneden', 'FontSize', A_size);
ylabel('R_a [\mu m]', 'FontSize', A_size);
set(gca,'YTick', (ax_set(3):0.2:ax_set(4)));
grid on;
set(h1, ...
'EdgeColor', 'none', ...
'FaceColor', Bar_col, ...
'BarWidth', Bar_size);
set(gca, ...
'FontSize', 20, ...
'XTick', (1:1:6), ...
'XTickLabel', {'1','2','3','4','5','6'});
% Increase the width of the error bars
hb = get(h5,'children');
Xdata = get(hb(2),'Xdata');
temp = 4:3:length(Xdata);
temp(3:3:end) = [];
xleft = temp; xright = temp+1;
% Increase line length by 0.2 units
Xdata(xleft) = Xdata(xleft) - 0.04;
Xdata(xright) = Xdata(xright) + 0.04;
set(hb(2),'Xdata',Xdata)
saveas(gcf,[folder '\' file '_Ra.png'],'png');

```

Weibull-verdeling

```
%%%%%%%%%%%%%
% Weibull distribution
%%%%%%%%%%%%%
close all;
clear all;
% clc;
%% Load the data (openen van de folder met de buigsterkten)
folder = 'C:\Users\Jean\liesje\School\Masterproef\buigtesten';
file1 = 'strength_ZrO2_WeiB';
x = [559; 1211; 600; 870; 1250; 866; 1050; 1480; 976; 839; 1393;
1037; 1126; 2417;
887];
file2 = 'buigtesten3';
x_EDM = xlsread([folder '\\' file2 '.xlsx'],'G2:G59');
cut_EDM = xlsread([folder '\\' file2 '.xlsx'],'B2:B59');
%% Arrange the data (data sorteren per snede)
% EDM surface
str1 = zeros(1,1);
str2 = zeros(1,1);
str3 = zeros(1,1);
str4 = zeros(1,1);
str5 = zeros(1,1);
str6 = zeros(1,1);
count = zeros(1,6);
for i = 1:1:length(cut_EDM)
if cut_EDM(i) == 1
count(1) = count(1)+1;
str1(count(1))=x_EDM(i);
elseif cut_EDM(i) == 2
count(2) = count(2)+1;
str2(count(2))=x_EDM(i);
elseif cut_EDM(i) == 3
count(3) = count(3)+1;
str3(count(3))=x_EDM(i);
elseif cut_EDM(i) == 4
count(4) = count(4)+1;
str4(count(4))=x_EDM(i);
elseif cut_EDM(i) == 5
count(5) = count(5)+1;
str5(count(5))=x_EDM(i);
else
count(6) = count(6)+1;
str6(count(6))=x_EDM(i);
end
end
%% Weibull calc (weibull berekenen voor elke snede)
[ st_g, probg, slopeg, offsetg ] = Weibl( x );
lineg = (([-2 , 0]-offsetg)./slopeg;
[ st_EDM1, prob1, slope1, offset1 ] = Weibl( str1' );
line1 = (([-2 , 0]-offset1)./slope1;
[ st_EDM2, prob2, slope2, offset2 ] = Weibl( str2' );
line2 = (([-2 , 0]-offset2)./slope2;
[ st_EDM3, prob3, slope3, offset3 ] = Weibl( str3' );
line3 = (([-2 , 0]-offset3)./slope3;
[ st_EDM4, prob4, slope4, offset4 ] = Weibl( str4' );
line4 = (([-2 , 0]-offset4)./slope4;
[ st_EDM5, prob5, slope5, offset5 ] = Weibl( str5' );
line5 = (([-2 , 0]-offset5)./slope5;
```

```

[ st_EDM6, prob6, slope6, offset6 ] = Weibl( str6' );
line6 = ([-2 , 0]-offset6)./slope6;
% Plot the data ( grafieken opstellen)
T_size = 18;
A_size = 20;
figure(1)
% h1 = loglog(st_g, 100.*probg, 'o', ...
% 'Color',[0,0,0],...
% 'MarkerSize',8,...
% 'MarkerEdgeColor','none',...
% 'MarkerFaceColor',[0,0,0]);
% hold on;
h2 = loglog(st_EDM1, 100.*prob1, 's', ...
'Color',[1,1,0],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[1,1,0]);
hold on;
h5 = loglog(st_EDM2, 100.*prob2, 'd', ...
'Color',[0,0,1],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[0,0,1]);
h6 = loglog(st_EDM3, 100.*prob3, 's', ...
'Color',[1,0,0],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[1,0,0]);
h7 = loglog(st_EDM4, 100.*prob4, 'o', ...
'Color',[0,1,0],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[0,1,0]);
h8 = loglog(st_EDM5, 100.*prob5, 's', ...
'Color',[1,0,1],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[1,0,1]);
h9 = loglog(st_EDM6, 100.*prob6, 'd', ...
'Color',[0,1,1],...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','none',...
'MarkerFaceColor',[0,1,1]);
% lijnen zetten op de grafiek
% h3 = loglog(10.^lineg, 100.*[0.01 1], '- ', ...
% 'LineWidth',2,...
% 'Color',[0,0,0]);
h4 = loglog(10.^line1, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2,...
'Color',[1,1,0]);
h10 = loglog(10.^line2, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2,...
'Color',[0,0,1]);
h11 = loglog(10.^line3, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2,...
'Color',[1,0,0]);
h12 = loglog(10.^line4, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2,...
'Color',[0,1,0]);
h13 = loglog(10.^line5, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2,...
```

```

'Color',[1,0,1]);
h14 = loglog(10.^line6, 100.*[0.01 1], '- ', ...
'LineWidth',2, ...
'Color',[0,1,1]);
% assen opmaken
axis([200 1500 1 100]);
xlabel('4-punts buigsterkte [MPa]', 'FontSize', A_size);
ylabel('Faalkans [%]', 'FontSize', A_size);
grid on;
set(gca, ...
'FontSize', A_size, ...
'XTick', [200 500 1000 1500], ... %'XTickLabel',
{'1','2','3','4','5','6'},...
'YTick',[1 2 5 10 20 50 90]);
legend([h4, h10, h11, h12, h13, h14],['Cut1 (slope = '
num2str(slope1) ')'], ['Cut2
(slope = ' num2str(slope2) ')'], ['Cut3 (slope = ' num2str(slope3)
')'], ['Cut4 (slope =
' num2str(slope4) ')'], ['Cut5 (slope = ' num2str(slope5) ')'], ['Cut6
(slope = '
num2str(slope6) ')'], 'Linear fit grinded surface', 'Linear fit EDM
surface', ...;
'FontSize', A_size, ...
'Location', 'SouthEast', 'Orientation', 'Vertical');
% saveas(gcf,[folder '\weibull_ZrO2-TiN_v2.png'],'png');

```

Vlakheid

```
%%%%%%%%%%%%%
% Flatness plots
%%%%%%%%%%%%%
close all;
% clc;
clear all;
%% Load the data (meetresultaten inladen en vlakheid berekenen)
folder = 'C:\Users\Jean\liesje\School\Masterproef\CMM
buigmonsters\CMM';
cuts = 6;
planes = 8;
flatness_b = zeros(planes/2,cuts);
flatness_f = zeros(planes/2,cuts);
for i = 1:1:cuts
for j = 1:1:planes/2
file = ['C' num2str(i) 'B' num2str(j)];
fid = fopen([folder '\file '.txt']);
header = textscan(fid,'%s',1, 'delimiter',';');
data = textscan(fid,'%s %f %f %f', 'delimiter',';');
fclose(fid);
% Arrange data
x = data{1,2};
y = data{1,3};
z = data{1,4};
x_b = x(1:56);
x_f = x(57:112);
y_b = y(1:56);
y_f = y(57:112);
z_b = z(1:56);
z_f = z(57:112);
flatness_b(j,i) = flatn(x_b, y_b, z_b);
flatness_f(j,i) = flatn(x_f, y_f, z_f);
end
end
flatness = [flatness_b;flatness_f];
save([folder '\flatness'], 'flatness');
%%standard deviation flatness
%%(gemiddelde en standaard afwijking berekenen)
flatness_std = std(flatness)
flatness_m = mean(flatness)
save([folder '\flatness_std'], 'flatness_std');
save([folder '\flatness_m'], 'flatness_m');
%% Plot of flatness_std data (grafiek maken)
T_size = 18; % Font size title
A_size = 16; % Font size labels, legend, etc.
y = rot90 (flatness_m,3)
%
figure
% Plot the flatness_std values in a line
plot(y, '-',...
'LineWidth',2);
hold on;
% Plot the error whiskers
h5 = errorbar((1:1:6), flatness_m(1:6), flatness_std(1:6), ...
'o', 'LineWidth',1, ...
'Color',[0,0,0],...
'MarkerSize',2, ...
'MarkerEdgeColor','none',...
```

```
'MarkerFaceColor',[0,0,0]);
axis([0.5 6.5 -0.01 0.021]);
xlabel('Aantal bewerkingssneden', 'FontSize', A_size);
ylabel('Vlakheid [mm]', 'FontSize', A_size);
set(gca, ...
'FontSize', 20, ...
'XTick', (1:1:6), ...
'XTickLabel', {'1','2','3','4','5','6'});
grid on;
saveas(gcf,[folder '\\' file '_flatness.png'],'png');
```