

Vonkerosie van koolstofvezel versterkte kunststof

Joris Claes

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
werktuigkunde

Promotoren:

Prof. dr. ir. B. Lauwers
Prof. dr. ir. D. Reynaerts

Academiejaar 2015 – 2016

Vonkerosie van koolstofvezel versterkte kunststof

Joris Claes

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
werktuigkunde

Promotoren:

Prof. dr. ir. B. Lauwers
Prof. dr. ir. D. Reynaerts

Assessoren:

Dr. ir. J. Qian
Ir. J. Bouquet

Begeleider:

Ing. F. Vogeler

Academiejaar 2015 – 2016

© Copyright by K.U.Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wendt u tot de K.U.Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (België). Telefoon +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in dit afstudeerwerk beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

© Copyright by K.U.Leuven

Without written permission of the promoters and the authors it is forbidden to reproduce or adapt in any form or by any means any part of this publication. Requests for obtaining the right to reproduce or utilize parts of this publication should be addressed to K.U.Leuven, Faculty of Engineering - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (België). Telefoon +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

A written permission of the promotor is also required to use the methods, products, schematics and programs described in this work for industrial or commercial use, and for submitting this publication in scientific contests.

Voorwoord

Het doel van deze thesis is tweezijdig: Enerzijds als finale beproeving om het diploma burgerlijk ingenieur werktuigkunde te behalen, anderzijds wordt getracht een meerwaarde en aanvulling te leveren aan huidig onderzoek i.v.m. EDM van nieuwe materialen. Voorgaande jaren zorgden voor het aanleren van methodes en technische inzichten die bijdragen aan een onderzoekgerichte aanpak. Zo worden met kritische houding opbouwende experimenten verricht.

Doorheen het academiejaar werd een grote inspanning geleverd om deze masterproef tot het resultaat te brengen wat het nu is. Dit was niet mogelijk geweest zonder de hulp van anderen. Daarvoor wil ik enkele personen bedanken voor hun hulp en advies.

In de eerste plaats zijn dit mijn promotoren voor het vertrouwen dat zij mij gaven bij het toekennen van de masterproef. Met name Bert Lauwers en Dominiek Raynaerts die zorgden voor een thesisonderwerp dat aansluit bij mijn interesses en technische wensen. Ook wil ik hen bedanken voor het ter beschikking stellen van middelen en een vrije omgeving die de uitvoering van een gepast onderzoek mogelijk maakt. Hun professioneel tussentijds advies gaf mij de kans om de thesis verder te optimaliseren. Vervolgens wil ik Frederik Vogeler en Jan Bouquet bedanken voor de vele tips en raadgevingen die zorgden voor een goede afloop. Ook bedank ik Dries Van Camp voor zijn hulp bij het uitvoeren van SEM en EDX analyses. De mensen van de werkplaats wil ik bedanken voor hun praktische steun en ook alle niet vernoemde personen binnen KU Leuven voor het bieden van vakkundige bijstand.

Het bedrijf SABCA NV die industrieel toepasbaar composiet hebben ter beschikking gesteld voor het uitvoeren van onderzoek. Hiervoor dank, alsook hun snelle communicatie en actie waardoor een eerste testfase al gauw van start kon gaan.

Als laatste wens ik mijn familie en vrienden te bedanken voor het bieden van steun en begrip alsook de personen die niet expliciet vermeld worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	v
Inhoudsopgave.....	vi
Samenvatting.....	ix
Abstract	x
Lijst van figuren en tabellen.....	xi
Lijst van figuren	xi
Lijst van tabellen.....	xiii
Lijst van afkortingen en symbolen	xiv
Hoofdstuk 1 : Inleiding.....	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 Onderzoeksmethode en aanpak	2
Hoofdstuk 2 : Literatuurstudie	3
2.1 Basisbegrippen van vonkerosie.....	3
2.1.1 Optredend erosie mechanisme.....	4
2.1.2 Voor - en nadelen.....	6
2.1.3 Vonktechnologie	7
2.2 Koolstofvezel versterkte kunststof	7
2.2.1 Koolstofvezels en bindmateriaal	8
2.2.2 Bewerken van CFRP	10
2.3 Vonkerosie van CFRP	10
2.3.1 Resultaten uit de literatuur.....	11
2.4 Besluit.....	24
Hoofdstuk 3 : Inleidende experimentele testen	25
3.1 De zinkvonkmachine	25
3.1.1 Machineparameters.....	26
3.1.2 Machine mogelijkheden	31

3.2 Testopstelling.....	33
3.2.1 Elektrische weerstand CFRP.....	33
3.2.2 Experimentele testopstelling.....	35
3.2.3 Inleidende testopstelling.....	36
3.3 Toepassingen	39
3.4 Besluit.....	42
Hoofdstuk 4 : Experimenteel onderzoek	43
4.1 Planning experimenteel onderzoek	43
4.1.1 Parameterbereik.....	43
4.1.2 Polarisation en spanning.....	45
4.1.3 Outputs	46
4.2 Onderzoeksfase.....	47
4.2.1 Hoofdexperimenten.....	47
Invloed van stroom en pulsduur op MRR	47
Invloed van stroom en pulsduur op oppervlakteruwheid	49
Invloed van stroom en pulsduur op randkwaliteit	50
4.2.2 Statistische analyse.....	52
4.2.3 Optimale vonktechnologie	53
4.2.4 Materiaalkundig onderzoek.....	55
Microscopische evaluatie van doorsneden.....	55
SEM evaluatie van de doorsneden	59
Onderzoek van het bewerkt oppervlak met macrolens en SEM	60
EDX analyse op doorsnede en bewerkt oppervlak	61
Spaananalyse.....	63
4.2.5 Invloed van polarisation.....	65
Invloed van polarisation op MRR.....	66
Invloed van polarisation op oppervlakteruwheid	66
Invloed van polarisation op randkwaliteit.....	67
4.2.6 Invloed van elektrode materiaal	68
4.3 Pulsmonitoring	68
4.3.1 Stroom en spanningspulsen.....	68
4.4 Besluit.....	69
Hoofdstuk 5 : Besluit	71
Bijlagen	73

Bibliografie	145
Fiche masterproef.....	149

Samenvatting

Deze masterproef gaat na of het mogelijk is om zinkvonken (EDM) toe te passen op koolstofcomposiet (CFRP). Er is over dit onderwerp weinig literatuur beschikbaar. Daarom wordt gestart met enkele experimenten. Deze tonen aan dat industrieel CFRP ($\rho = 0,01\Omega\text{cm}$) bewerkbaar is met vonkerosie. Een ruimer opgezet experimenteel onderzoek, bestudeert in tweede instantie de optredende materiaalafnamemechanismen en de invloed van het vonkproces op het materiaal. De volgende experimentele randvoorwaarden zijn daarbij van toepassing: een koperelektrode ($\emptyset = 10\text{mm}$) met negatieve polarisatie die 1mm diep vonkt. Een parameterbereik met stroom van 1 tot 65A en pulsduur van 0,8 tot 200 μs . Verder wordt een machinefunctionaliteit gebruikt waardoor overige parameters automatisch optimaal worden geregeld. Het resultaat wordt onderzocht via een spaananalyse en microscopie, en SEM en EDX analyses toegepast op bewerkte doorsneden en oppervlakken. Dit laat toe om vier mogelijke optredende materiaalafnamemechanismen te verklaren. De verschillende experimenten resulteren ook in twee optimale vonktechnologieën. Met een statistische analyse wordt de relatie tussen de procesparameters en een aantal uitgangsgrootheden (MRR, Ra en randkwaliteit) onderzocht. De studie wordt afgerond met het onderzoeken van het effect van polarisatie; de invloed van een grafietelektrode; en een analyse van stroom en spanningspulsen via pulsmonitoring.

Abstract

This thesis investigates the feasibility of electro discharge machining (EDM) applied to carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Because of the little investigation that has been carried out until now, this is why first experimental work is performed.

The experiments confirm that industrial CFRP ($\rho = 0,01 \text{ } \Omega\text{cm}$) is machinable by EDM. Thorough research into the phenomena that appear to the material during the EDM process is followed. A copper electrode ($\emptyset 10 \text{ mm}$) is applied to machine each sample to a depth of 1 mm. The Roboform 350 γ EDM machine of AgieCharmilles is used while implementing the widest possible machine range. The pulse current varies from 1 to 65 A while the pulse time varies from 0,8 to 200 μs . The electrode is negatively polarised with a voltage of -80 V. During the experiments a machining functionality automatically controls other parameters such as pulse-off time and duty factor.

The material based research contains several analyses. Microscopic and SEM figures are taken from machined cross sections and surfaces. An EDX analysis determines the chemical composition of the machined zones. Through this technique, the presence of dielectric fluid and copper particles is detected. The final method is a chip analysis, to investigate the shape of the removed material during machining.

The material based research concludes four material removal mechanisms appearing during EDM of CFRP. A statistical analysis explains the significance of factors in relation to an output. This analysis as well justifies the use of one replica per experiment. The experiments determine two optimal technologies: one for a maximal material removal rate ($\text{MRR} = 6,55 \text{ mm}^3/\text{min}$) and one for a minimal surface roughness ($\text{Ra} = 8 \text{ } \mu\text{m}$) with acceptable MRR.

Furthermore the influence of electrode polarity is examined. The use of a positive electrode results in a lower MRR, lower surface roughness and an equal edge quality. The electrode wear ratio (EWR) is also measured during this research. The use of higher currents lead to higher electrode wear. Moreover, the influence of a graphite electrode is investigated. Resulting in equal or inferior results when comparing to the use of a copper electrode. Finally, pulse monitoring is used to analyze pulse current and voltage, making it possible to compare the parameter settings to the actual values that appear during machining.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

Figuur 1: Werkstuk van een draadvonkmachine [27].....	4
Figuur 2: Werkstuk en elektrode van een zinkvonkmachine [27]	4
Figuur 3: Schematische voorstelling van een zinkvonker [4]	4
Figuur 4: Pulsvorm en fases in het vonkproces [4]	6
Figuur 5: Toepassingsgebieden van CFRP [7].....	7
Figuur 6: Productie van koolstofvezels [7].....	9
Figuur 7: Voorbeeld van Eurospark H425 EDM machine [30]	11
Figuur 8: Oppervlakteruwheid [13].....	13
Figuur 9: Optimale stroomsterkte [13].....	13
Figuur 10: SEM analyse van het bewerkt oppervlak met verschillende stroomsterkten [12]	14
Figuur 11: MRR, paper: [13].....	17
Figuur 12: EDX analyse (a) van het onbewerkte CFRP (b) van het bewerkte oppervlak 0,2 A; 25 μ s (c) van het bewerkte oppervlak 2,5 A 25 μ s [13]	18
Figuur 13: SEM foto van het bewerkte oppervlak (3 A; 20 μ s) [16]	20
Figuur 14: Dikte 'recast layer' in functie van stroom en pulsduur [16]	20
Figuur 15: MRR, paper [16]	21
Figuur 16: DOE tabel [17].....	22
Figuur 17: Hoofdeffecten van de parameters op EWR [17]	23
Figuur 18: Hoofdeffecten van de parameters op MRR [17]	23
Figuur 19: Roboform 350 γ	26
Figuur 20: Elektrode ondermaat	26

Figuur 21: Bewerkingsvoorkeur.....	28
Figuur 22: Machinebereik voor stroomsterkte aangeduid door P [A] en pulsduur aangeduid door A [μ s] [19].....	29
Figuur 23: Invloed van stroom en pulsduur [19]	31
Figuur 24: Extra-en micro pulsatie [19].....	32
Figuur 25: Bewerkingsstrategieën [19].....	32
Figuur 26: Gebruikt CFRP (a) bovenste geweven lagen (b) onderste geweven lagen (c) doorsnede.....	33
Figuur 27: Inleidende experimentele testopstelling	35
Figuur 28: Machine efficiëntie en snelheid	36
Figuur 29: Resultaat eerste zeven testen	37
Figuur 30: MRR in functie van de stroom	37
Figuur 31: Vervuilde elektrode (links) gereinigde elektrode (rechts)	38
Figuur 32: Schadefactor $S = d/D$	39
Figuur 33: Gevonkt gat (onderzijde).....	41
Figuur 34: Delaminatie van een geboord gat, bovenzijde boring (links), onderzijde boring (rechts).....	41
Figuur 35: Precisie onderdelen uit CFRP [32]	41
Figuur 36: Velg uit CFRP [31].....	41
Figuur 37: Machinebereik Roboform 350 γ , stroomsterkte aangeduid door P [A] en pulsduur aangeduid door A [μ s] [19]	44
Figuur 38: MRR vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V	48
Figuur 39: Oppervlakteruwheid vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V	49
Figuur 40: Macroscopische weergave van testsamples, sample oppervlak bij 65 A – 6,4 μ s (links) en bij 65 A – 6,4 μ s (rechts)	50
Figuur 41: Meting van de omschreven cirkeldiameter D aan het werkstukoppervlak	51
Figuur 42: Randkwaliteit vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V	51
Figuur 43: Doorgevonkt gat met optimale vonktechnologieën, bovenzijde (links), onderzijde (rechts).....	55
Figuur 44: Invloed van de stroom op de thermisch beïnvloede laagdikte	56
Figuur 45: Invloed van de pulsduur op de thermisch beïnvloede laagdikte.....	57

Figuur 46: Doorsnede van sample 65 A – 12,8 μ s	58
Figuur 47: SEM figuur van doorsnede aan 13 A 3,2 μ s.....	59
Figuur 48: Macroscopische samples spaananalyse	63
Figuur 49: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op MRR.....	66
Figuur 50: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op oppervlakteruwheid.....	67
Figuur 51: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op de randkwaliteit.....	67
Figuur 52: Randkwaliteit (links: 33 A, 100 μ s, -80 V; rechts: 33 A, 100 μ s, 80 V).....	68

Lijst van tabellen

Tabel 1: Fysische parameters, paper: [8].....	12
Tabel 2: Elektrische parameters, paper: [8]	12
Tabel 3: Fysische parameters, paper: [12]	16
Tabel 4: Elektrische parameters, paper: [12].....	16
Tabel 5: Fysische parameters, paper: [15]	19
Tabel 6: Elektrische parameters, paper: [15].....	19
Tabel 7: Fysische parameters, paper: [16]	22
Tabel 8: Elektrische parameters, paper: [17].....	22
Tabel 9: Vergelijking MRR tussen verschillende papers [11] [12] [15] [16]	24
Tabel 10: Mogelijke elektrode-werkstukcombinaties Roboform 350 γ	27
Tabel 11: Technologietabel voor koper-keramiek.....	30
Tabel 12: Pilot expert functionaliteit.....	31
Tabel 13: Geleidbaarheid CFRP	34
Tabel 14: Weerstandsmetingen en overeenkomstige soortelijke weerstanden	34
Tabel 15: Gewenste parameters	45
Tabel 16: Te gebruiken parameters	45
Tabel 17: Vergelijking tussen optimale uitgangsgrootheden aangegeven door stroom en pulsduur.....	52

Lijst van afkortingen en symbolen

EDM	Electro discharge machining
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
PREPREG	Pre-impregnated fibers
UD	Unidirectioneel
MRR	Material removal rate
EWR	Electrode wear rate
SEM	Scanning electron microscopy
EDX, EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
DOE	Design of experiments
MAS	Materiaalafnamesnelheid
RPM	Rotaties per minuut

Hoofdstuk 1: Inleiding

1.1 Probleemstelling

Vonkerosie (EDM) van metalen wordt al enkele decennia op industriële schaal toegepast. Het gaat dan over geharde metalen of speciale staal legeringen die moeilijk met conventionele technieken kunnen bewerkt worden. In theorie is elk materiaal 'vonkbaar' zolang het een bepaalde specifieke weerstand niet overschrijdt. Voor keramische composieten moet deze waarde lager zijn dan $300 \text{ à } 100 \text{ } \Omega\text{cm}$ [1] [2]. De laatste jaren is met succes heel wat onderzoek verricht naar het vonken van geleidende technische keramieken. Deze materialengroep bestaat uit artificiële keramiek waar een geleidende fase in wordt gepercipieerd. Het kunnen bewerken van dit soort materialen kent een breed gebied aan toepassingen in zowel de industriële als medische wereld. Over het vonken van andere niet-metalen is nog maar weinig bekend.

Koolstofcomposiet afgekort CFRP is een sterk lichtgewicht materiaal dat uitgebreid gebruikt wordt in luchtvaart, ruimtevaart, voertuig, en sport industrieën. Dit soort materialen nemen steeds toe in populariteit door hun interessante eigenschappen. Ze bezitten een hoge sterkte (hoge E-modulus), lage dichtheid en bieden goede weerstand tegen hoge temperaturen en corrosieve producten. Het conventioneel bewerken hiervan verloopt gelijkaardig als bij metalen, toch ontstaan hier enkele nadelen [3]. Zo zijn scheurvorming (delaminatie), vezelversplintering en braamvorming vaak voorkomende problemen. De levensduur van gereedschappen om CFRP te bewerken is aanzienlijk korter door de aanwezigheid van erg abrasieve koolstofvezels. Vonkerosie kan een oplossing bieden voor deze problemen.

In deze thesis wordt dieper ingegaan op het onderzoek van EDM toegepast op CFRP. De doelstellingen omvatten een studie naar de invloed van de verschillende procesparameters. Voornamelijk op materiaalkundig niveau en daarnaast de technische uitgangsgrootheden van het bewerkingsproces (bv. bewerkingsnelheid, oppervlakteruwheid ...). De generatie van deze data kan meer inzicht bieden in het materiaalverwijderingsmechanisme. De verschillende experimentele testen kunnen vervolgens resulteren in een geschikte vonktechnologie voor CFRP.

1.2 Onderzoeksmethode en aanpak

Tot op heden is gering onderzoek verricht naar de vonkbaarheid van CFRP, daarom is het slechts mogelijk om beperkte literatuur te raadplegen. Om een zo volledig mogelijke studie uit te voeren worden alle relevante bronnen grondig geanalyseerd.

In een volgende stap zal testmateriaal verzameld worden. Een vereiste hiervoor is dat het een industrieel toepasbaar composiet betreft. Deze composiet dient niet enkel als onderzoeksmateriaal, maar bezit al een toepassingsgebied in de industrie. Daarnaast dient het CFRP op een duidelijke manier gespecificeerd te worden d.m.v. een datasheet.

Vervolgens zullen aan de hand van inleidende testen de vonkbaarheid van het materiaal aangetoond worden. Het onderzoek zal worden uitgevoerd op een Roboform 350 γ zinkvonker van Agiecharmilles. Hierbij zal worden nagegaan of schademechanismen zoals delaminatie en vezelversplintering zullen optreden. Voorgaande testen en besluiten uit de literatuur worden, rekening houdend met de huidige machine en verschillende composieten, geverifieerd.

Het inleidende onderzoek dient om samples te genereren die meer duidelijkheid verschaffen over de keuze van relevante materiaalkundige analyses. Daarnaast wordt gekeken welke uitgangspareters nuttig zijn en hoe deze te kwantificeren. Dit zijn pareters zoals warmte beïnvloede zone en oppervlakteruwheid.

Als volgende stap kan een meer algemeen en stelselmatig onderzoek worden ontworpen. Weloverwogen testen worden uitgevoerd die het zwaartepunt van deze thesis vormen. Belangrijk zijn de verschillende ingangs-pareters die worden gebruikt en op welke manier de data met elkaar wordt vergeleken.

Bovenstaande aanpak om de doelstellingen zo volledig mogelijk na te streven. De nadruk ligt op het verwerven van meer inzicht in het vonkproces van CFRP.

Hoofdstuk 2: Literatuurstudie

Vonkerosie wordt voornamelijk voor harde en moeilijk te verspanen materialen gebruikt. Andere materialen worden meestal conventioneel bewerkt omdat het vonkproces langer duurt. Het vonkproces maakt geen gebruik van mechanische energie om materiaal af te nemen. Daarom wordt vonken een niet conventionele bewerkingsmethode genoemd, het is een elektro-thermisch proces. Materiaal wordt afgevoerd doordat elektrische energie omgezet wordt in thermische energie. Om een beter inzicht te verwerven in het zinkvonken van CFRP worden eerst enkele basisbegrippen van vonkerosie overlopen. Het erosiemechanisme dat optreedt, enkele voor- en nadelen en belangrijke parameters in vonktechnologie.

Metalen zijn homogeen en isotroop waardoor de materiaalsamenstelling zoals legeringselementen continu over de doorsnede zijn. Het soort metaal (bv. gietijzer of staal) kan visueel aan het materiaaloppervlak worden afgeleid. Met koolstof composieten is dit iets moeilijker. Tusseliggende lagen kunnen andere weefsels of andere diktevariëaties bevatten dan oppervlaktelagen. Een bijgeleverde datasheet van het fabricage proces kan daarom meer uitsluitsel geven over het soort composiet. De opbouw van CFRP zal kort besproken worden.

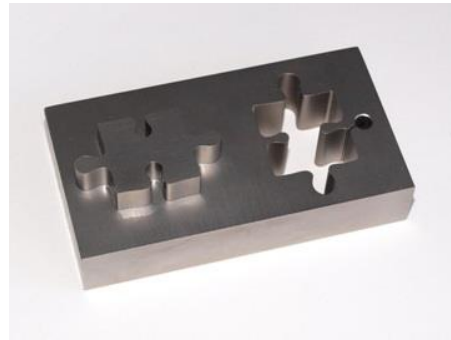
Met deze info over vonkerosie en koolstofcomposiet kan de bestaande literatuur op een goede manier worden geïnterpreteerd. De belangrijkste papers en relevant onderzoek zullen vermeld worden. Deze data kan verder gebruikt worden om het resultaat van experimentele testen beter te verantwoorden.

2.1 Basisbegrippen van vonkerosie

In 1944 leidde het onderzoek van B.R. Lasarenko tot de eerste zinkvonkmachine [4]. Hij ontdekte dat het mogelijk was om materiaal af te nemen door vonken te laten overslaan op een werkstuk. In de meeste installaties zorgen vonken voor negatieve effecten (bv. het inbranden van contactoren bij relais of schakelaars). Inbranding, warmteproductie of storingen kunnen hiervan het gevolg zijn. Bij vonkerosie wordt het ontstaan van vonken op een gunstige manier gebruikt. De eerste vonkmachines waren zinkvonkmachines uitgerust met een relaxatiegenerator. De vonken werden gegenereerd door een condensator te laten ontladen. In de jaren '60 deed de impulsgenerator de intrede waardoor stroompulsen beter geregeld worden. Vanaf



Figuur 2: Werkstuk en elektrode van een zinkvonkmachine [28]

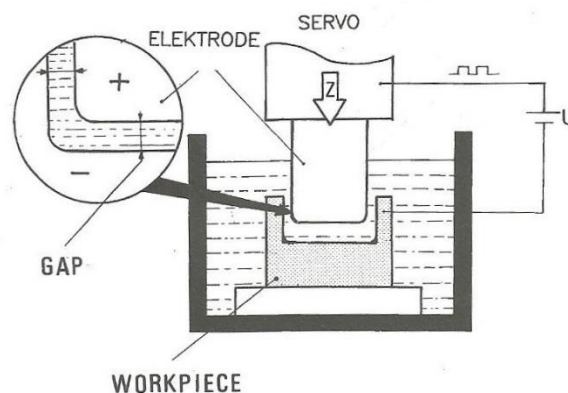


Figuur 1: Werkstuk van een draadvonkmachine [28]

1970 werd de draadvonker geïntroduceerd. Bij een zinkvonker wordt een elektrode 'gezonken' in het werkstuk. De elektrode wordt vervaardigd uit een gemakkelijk te bewerken materiaal zoals bv. koper (Figuur 2). Dit is eveneens een goede elektrische geleider wat nodig is voor een stabiel vonkproces. Een draadvonker gebruikt een geleidende draad als elektrode. Zo kunnen moeilijk bewerkbare metalen nauwkeurig worden uitgesneden (Figuur 1). Door de intrede van NC gestuurde machines ontstonden vanaf 1980 geautomatiseerde vonkerosiemachines. Sindsdien kennen deze machines een sterke evolutie waarbij ze als maar meer geautomatiseerd worden.

2.1.1 Optredend erosie mechanisme

Figuur 3 geeft het werkingsprincipe van de zinkvonker schematisch weer. Tussen elektrode en werkstuk ontstaat een vonkoverslag door het aangelegde potentiaalverschil. Om kortsluiting te vermijden mag er geen contact zijn tussen elektrode en werkstuk. Een ingebouwd servo-mechanisme zal daarom de z-as van de machine aansturen om een bepaalde vonkspleet (gap) te verzekeren. Dit is ook nodig om eenzelfde potentiaalverschil (brandspanning) steeds te garanderen. Tijdens het vonken kan er een extra op en neergaande beweging van de elektrode worden ingesteld. De spaandeeltjes tussen werkstuk en elektrode kunnen makkelijker verwijderd worden tussen opeenvolgende vonken, het zogenaamde spoelen.



Figuur 3: Schematische voorstelling van een zinkvonker [4]

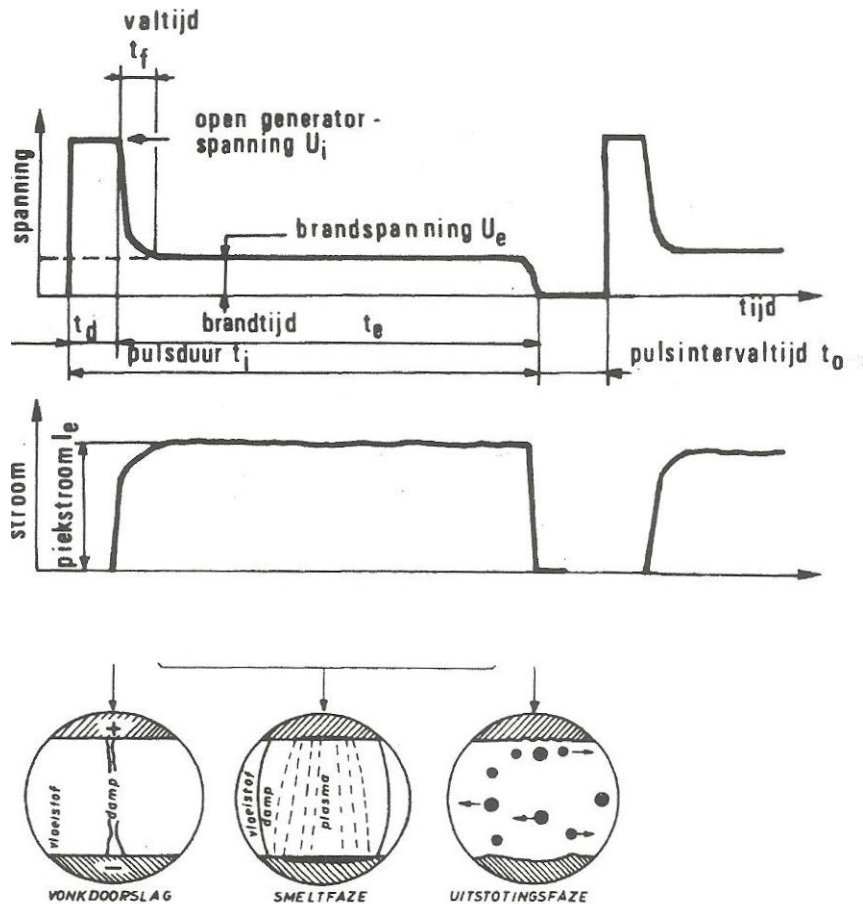
Figuur 4 geeft een typisch stroom-en spanningsverloop weer die op het werkstuk inwerkt. Op de figuur worden verschillende parameters aangeduid. Deze zijn van fundamenteel belang om een vonkproces efficiënt te laten verlopen. Voor elk vonkproces bestaat slechts één optimale set van parameters in functie van bewerkingsnelheid of oppervlaktekwaliteit. Er zijn twee soorten elektrische parameters. Een eerste soort zijn diegene die op de machine kunnen worden ingesteld en deel uitmaken van een vonktechnologie. De tweede soort zijn diegene als gevolg van de ingestelde parameters welke niet kunnen worden gewijzigd, zoals de ontladingsspanning U_e . De in te stellen hoofdparameters zijn de stroom I_e en de pulsduur t_i . Deze parameters hebben de grootste invloed op het vonkproces. Daarnaast is er ook de gapspanning U_i en de pulsintervaltijd t_0 . Deze tijd moet steeds voldoende groot zijn, zo mag een volgende vonk slechts plaats vinden als de vorige is uitgewerkt. De spanning U_i kan positief of negatief worden ingesteld. Dit bepaalt de polarisatie van de combinatie werkstuk-elektrode. Op Figuur 3 is zichtbaar dat deze spanning bij vonkoverslag drastisch daalt naar de brandspanning. Afhankelijk van de machine zijn er een groot aantal machine specifieke parameters. Deze zullen uitvoerig besproken worden in het vervolg van deze studie.

Het geheel is steeds ondergedompeld in een vloeistof, het diëlektricum genoemd. Dit om de vonken te focussen op het werkstuk. Het zorgt eveneens voor het afvoeren van materiaaldeeltjes en voor koeling van werkstuk en elektrode. Door de hoge energieconcentratie kunnen lokale temperaturen tot 10.000 °C ontstaan waardoor koeling noodzakelijk is.

Onderaan Figuur 4 wordt het vonkproces in drie opeenvolgende stappen weergegeven. Na de vonkdoorslag ontstaat een plasmakanaal waar het materiaal verdampt of smelt. Verwijderd materiaal zal na de uitstootfase door het omliggende diëlektricum terug stollen. In het diëlektricum dient voldoende stroming aanwezig te zijn om de materiaaldeeltjes zo snel mogelijk te kunnen afvoeren. Extra spoeling kan voorzien worden door spoelkanaaltjes in de elektrode aan te brengen. Een andere mogelijkheid is het aanbrengen van extra zijspoeiers. Afhankelijk van de toepassing dient erop gelet te worden dat de vonkboog hierbij niet wordt afgebogen door te hoge spoeldruk. Een eenzijdig krachtige spoeling is niet gunstig, het werkstuk wordt dan ongelijkmatig bewerkt.

De elektrode of gereedschap wordt vervaardigd uit een goed geleidend materiaal. De meest gebruikte hiervoor zijn koper, messing, grafiet of een koper-wolfrum legering voor zeer harde werkstukken zoals carbiden. Messing, een legering van koper (55-70%) en zink (45-30%) wordt vooral bij draadvonken gebruikt als elektrode [5]. Het aanwezige zink zal tijdens het vonken verdampen waardoor het warmte onttrekt en zorgt voor extra koeling. Bij het draadvonken is dit voordelig om draadbreek te vermijden. De gebruikte elektrodematerialen zijn steeds goed bewerkbare materialen waardoor complexe vormen eenvoudig kunnen worden vervaardigd. Wanneer een bepaald negatief van de elektrode gewenst is (het werkstuk), moet er steeds rekening gehouden worden met de vonkspleet. Deze zal verschillen afhankelijk van o.a. de gebruikte elektrode-werkstukcombinatie. Er zijn tabellen om

de vonkspleet te bepalen. De meeste zinkvonkers zijn uitgerust met een hulpprogramma die de vonkspleet berekend. Bij het vervaardigen van de elektrode moet deze waarde van de nominale gewenste maat van het werkstuk worden afgetrokken.



Figuur 4: Pulsvorm en fases in het vonkproces [4]

Vonkerosie wordt enkel voor materialen gebruikt die een bepaalde geleidbaarheid bezitten. Het is mogelijk om een zeer goede oppervlaktekwaliteit te behalen (R_a 0,4 [6]). Spiegeloppervlakten kunnen niet verkregen worden door de inwerking van vonken op het oppervlak. Het zorgt voor kleine kraters wat het typische dofte uitzicht geeft aan een gevonkt werkstuk.

2.1.2 Voor - en nadelen

Het gaat over een thermo-elektrisch proces waardoor zeer geringe mechanische krachten op het werkstuk inwerken. Mogelijke krachten zijn afkomstig van het inbranden van de vonken zelf, of impulsen veroorzaakt door het lokaal verdampen van het diëlektricum. Deze krachten blijven zeer beperkt, dit heeft als voordeel dat het stuk op een eenvoudige manier kan worden ingeklemd. De afwezigheid van mechanische krachten maakt het mogelijk materialen te bewerken van elke

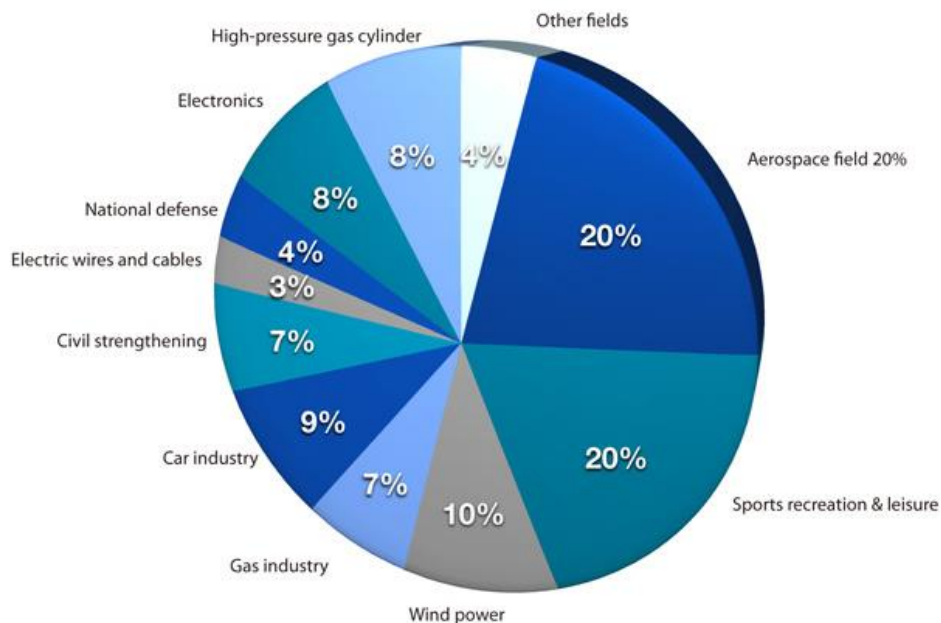
mogelijke hardheid. Mechanische eigenschappen van een werkstukmateriaal zijn daarom onbelangrijk.

2.1.3 Vonktechnologie

De combinatie van instellingen en parameters om een bepaald materiaal te bewerken wordt een vonktechnologie genoemd. Voor de meest courante materialen (bv.: staal, hardmetaal ...) worden vonktechnologieën beschikbaar gesteld door de machinefabrikant. Bij moderne zinkvonkmachines worden parameters automatisch ingesteld op basis van de gewenste afwerkingsgraad, gereedschapslijtage en bewerkingssnelheid. Dit zijn tabellen welke bekomen worden na een groot aantal praktische experimenten.

2.2 Koolstofvezel versterkte kunststof

Koolstofvezel versterkte kunststof is een materiaal dat steeds toeneemt in populariteit door de gunstige eigenschappen. Dit zijn de hoge sterkte t.o.v. een lagere dichtheid. Het bestaat uit twee componenten waarbij koolstofvezels worden ingebed in kunststof, het bindmateriaal of matrixmateriaal genoemd. De koolstofvezels zorgen voor hoge stijfheid, hoge sterkte en hoge weerstand tegen impact. Het kunststof zorgt voor een hoge demping en hoge weerstand tegen chemische stoffen. Het geheel van beide componenten wordt beschouwd als een lichtgewicht materiaal met grote vormvrijheid. Het materiaal wordt veelvuldig gebruikt in lucht - en ruimtevaart, en sportindustrie (Figuur 5). De toepassing is grotendeels beperkt tot deze gebruikers door de hoge kost. Daarom wordt het composiet enkel in hoog performante toepassingen gebruikt. Verwacht wordt dat de kost zal dalen in de toekomst door het vergroten van productie batches.



Figuur 5: Toepassingsgebieden van CFRP [29]

Bij het zoeken naar materiaal voor deze thesis worden twee randvoorwaarden vooropgesteld. Het te vonken koolstofcomposiet dient geen plaatmateriaal te zijn (dikte > 1 mm). Zinkvonken is niet van toepassing op plaatmateriaal. Dit omdat CFRP plaatmateriaal al op zeer efficiënte manier wordt uitgesneden met waterstraalsnijden. Draadvonken zou dergelijke snelheden niet kunnen evenaren. Een tweede randvoorwaarde is dat het over een industrieel toepasbare composiet gaat. Er wordt gebruik gemaakt van CFRP dat toegepast wordt in de luchtvaart. Met steun van SABCA-Limburg N.V. wordt het materiaal dat er tot laminaat gevormd wordt, gebruikt in de experimentele testopstellingen.

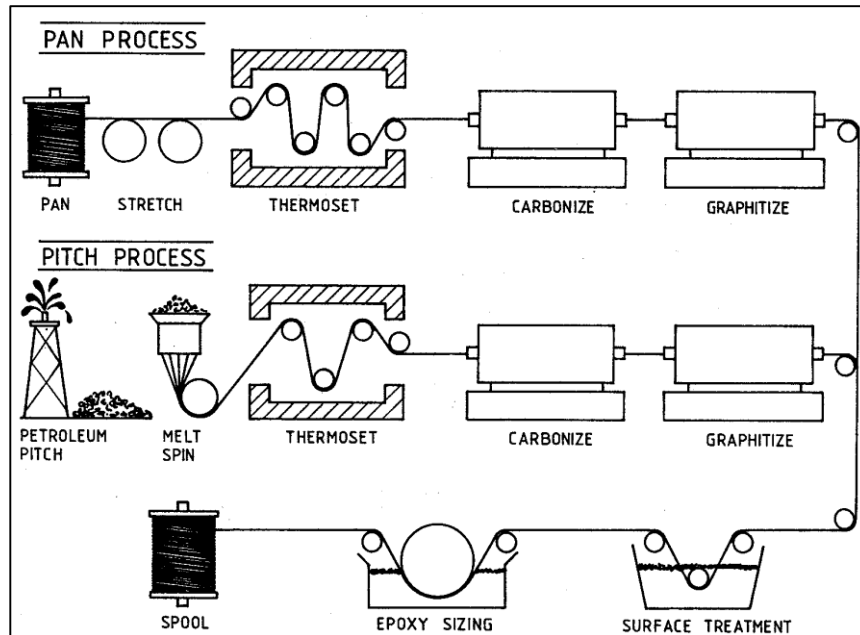
2.2.1 Koolstofvezels en bindmateriaal

Er zijn twee oorzaken die zorgen voor de hoge prijs van CFRP. Een eerste zijn de productiekosten voor de vervaardiging van het composiet en een tweede de materiaalkost van de koolstofvezels. De prijs varieert van 25 tot 200 euro/kg en stijgt met afnemende vezeldikte [7]. In vergelijking met de prijs voor staal welke kleiner is dan 1 euro/kg [8]. De vezels worden meestal ingebed volgens een bepaalde oriëntatie. Zo kunnen optimale eigenschappen in één richting worden verkregen. Hierdoor zijn de materiaaleigenschappen anisotroop. Vezels kunnen op verschillende manieren voorkomen in een composiet. Korte vezels indien homogene materiaaleigenschappen gewenst zijn, daarnaast zijn er lange en continue vezels. Deze laatste worden bepaald door de afmetingen van het eindproduct. Het materiaal voor deze thesis bevat continue vezels. Zo worden optimale sterkte eisen (E-modulus, maximale trekspanning ...) verkregen in één vlak.

De vezels worden gemaakt door pyrolyse van een koolstofrijke grondstof zoals bv. polyacrylonitrile (PAN). Er wordt vertrokken vanaf een spoel met basismateriaal. Naast dit synthetische materiaal kunnen de vezels eveneens gemaakt worden vanuit een petroleum afgeleid product, pitch. Figuur 6 geeft schematisch de productie van beide vezelsoorten weer. In de eerste 'thermoset' fase worden de vezels getrokken en opgewarmd tot 400°C. Zo worden koolstofketens onderling beter met elkaar verbonden en zullen ze niet smelten in een volgende productiefase. In de 'carbonize' stap, worden de vezels opgewarmd tot 800°C in een zuurstofvrije omgeving, nodig om onzuiverheden te verwijderen. In de derde stap 'graphitize' worden de vezels uitgetrokken tot het dubbel van hun eigen lengte en verwarmd tot 3000°C. Een gewenste kristallijne structuur wordt bekomen in een bepaalde richting, het zorgt voor de hoge E-modulus van maximum 600 MPa. De eigenschappen van de vezels zijn te vergelijken met deze van grafiet. Zelfsmerend en goede elektrische geleidbaarheid waardoor het composiet in aanmerking komt voor het vonkproces. De twee laatste stappen zijn slechts ter illustratie omdat deze sterk verschillen van composiet tot composiet.

Het bindmiddel of matrix materiaal wordt gebruikt als aanhechting tussen de verschillende vezels. Het moet zo gekozen worden om een sterke cohesie tussen de componenten te verzekeren. Er bestaan twee soorten bindmiddel, thermoharders en thermoplasten. Thermoharders zijn het meest populair. Ze starten als vloeistof (monomeren) waardoor ze gemakkelijk kunnen gemengd of geïmpregneerd worden

met de vezels, waarna ze uitharden (cross-linken) tot polymeren. Thermoharders zijn echter moeilijk te recyclen waardoor er de laatste jaren meer interesse is in het gebruik van thermoplasten. In deze thesis wordt CFRP gebonden met een thermoharder.



Figuur 6: Productie van koolstofvezels [7]

De koolstofvezels worden samen met het matrixmateriaal door de fabrikant vervaardigd tot een halffabricaat. Dit halffabricaat ook wel prepreg (pre-impregnated fibers) genoemd, bestaat uit de twee componenten van het composiet. Een dun laagje vezels wordt geïmpregneerd met een thermohardende hars. Dit laagje vezels kan in een bepaald patroon geweven worden zoals textiel. De keuze hiervoor is naargelang de technische eisen waaraan het composiet moet voldoen (bv. hoge sterkte eisen in een bepaalde richting of maximale weerstand tegen impact). Vervolgens wordt het geïmpregneerd geheel tussen walsrollen geplaatst om overtollige lucht te verwijderen. Het halffabricaat wordt dan afgedekt met een teflon - of papierlaag om vroegtijdige uitharding te voorkomen. Prepregs worden gebruikt om gelaagde composieten te vormen, een laminaat. De prepregs worden laag per laag in een mal gelegd en afgesneden volgens de juiste vorm. De uitharding en aandrukking van deze lagen kan op verschillende manieren gebeuren. Met een vacuümzak, autoclaaf of hogedrukmatris al dan niet in combinatie met een uithardingsoven.

De prepregs gebruikt voor het CFRP in deze thesis zijn afkomstig van Cytec, een internationale marktleider in dergelijke systemen (Bijlage A). Dit materiaal wordt door SABCA opgebouwd tot een laminaat. Vervolgens wordt het geheel uitgehard onder vacuüm en druk in een autoclaaf. De uitharding gebeurt op 180°C met ± 7 bar overdruk, 6 bar in autoclaaf en -0.7 bar vacuüm. Het midden van het laminaat bestaat uit unidirectionele lagen (UD lagen), zo kunnen optimale sterkte eisen in één richting bekomen worden. De buitenkant bestaat uit geweven lagen, om een sterker geheel te

vormen waardoor het materiaal aan hogere sterkte eisen voldoet in het vlak. Daarnaast verhoogt eveneens de weerstand tegen impact. Deze thesis handelt over de vonkbaarheid van de buitenste geweven lagen.

2.2.2 Bewerken van CFRP

Het composiet kan bewerkt worden met conventionele verspanende bewerkingen zoals boren, frezen, draaien, zagen ... Het verspanend bewerken verloopt zonder al teveel moeilijkheden. Het is niet nodig om een extra trage voeding in te stellen. Toch zijn er enkele nadelen die niet optreden bij het verspanen van metalen. De spaandeeltjes van CFRP bestaan deels uit fijne stofdeeltjes. Deze zijn schadelijk voor de gezondheid. Goede bevochtiging tijdens het verspaningsproces is aan te raden. De aanwezigheid van koolstofvezels zorgen voor een harde fase in het composiet. Dit zorgt voor een aanzienlijke gereedschapsslijtage. Ook indien gebruik gemaakt wordt van harde keramische snijkanten. Gereedschappen dienen regelmatig gereinigd worden omdat het hars uit de composiet de neiging heeft tot stollen aan de snijkanten. Bij het conventioneel bewerken wordt CFRP gemakkelijk beschadigd. Onder invloed van mechanische krachten zoals boren kunnen vezels worden losgerukt van het matrixmateriaal, met versplintering, scheurvorming of delaminatie van het werkstuk als gevolg. Dit verschijnsel maakt het werkstuk onbruikbaar voor nauwkeurige toepassingen. Het kan vermeden worden door gebruik te maken van voldoende scherp gereedschap. EDM kan een oplossing bieden voor deze problemen aangezien er geen mechanische krachten op het werkstuk inwerken. Ook braamvorming welke snel optreden door de kunststoffase kunnen vermeden worden. Naast EDM worden reeds andere onconventionele bewerkingsmethoden voor CFRP gebruikt. Dit zijn laser bewerken (CO₂ laser), abrasief waterstraalsnijden en ultrasoon bewerken. [9]

2.3 Vonkerosie van CFRP

In deze paragraaf zullen de hoofdzaken van eerder uitgevoerd onderzoek overlopen worden. In de literatuur is heel wat recent onderzoek verricht i.v.m. EDM van technische keramieken. EDM van CFRP is slechts sporadisch getest. Een reden hiervoor is dat technische keramieken een groter toepassingsgebied bestrijken in de huidige industrie, vooral in precisiewerktuigkunde, gereedschapsproductie en in de medische wereld. Het vergelijken met literaire bronnen is niet zo vanzelfsprekend. CFRP is moeilijk te typeren met één wetenschappelijke naam. Vaak wordt een naamgeving gebruikt die eigen is aan de fabrikant. Daarom kunnen ze best vergeleken worden aan de hand van hun bijhorende datasheet, op voorwaarde dat deze voldoende uitgebreid is. Hieruit kunnen fysische materiaalgegevens worden teruggevonden zoals sterkte eigenschappen, dichtheid en smeltpunt. Toch is er heel wat nuttige informatie die hierin niet vermeld wordt, zoals de chemische samenstelling van het materiaal. Vervolgens kunnen vonktesten met elkaar vergeleken worden. Er wordt nagegaan welke ingestelde elektrische parameters er gebruikt zijn en wat daar het resultaat van is. Naast de gebruikte elektrische

parameters dient een naslagwerk eveneens voldoende informatie te bevatten over fysische parameters van het zink-vonkproces. Zoals de spoeling, rotatie van de elektrode, soort elektrode, ... Ook de gebruikte machine dient voldoende gespecificeerd te zijn. Meer geavanceerde machines bevatten extra parameters waardoor het proces fijner kan worden afgeregeld (bv. extra micropulsatie van de z-as). Ook intelligente sturingen zijn mogelijk, hierbij stuurt de machine (zonder tussenkomst van een operator) bepaalde parameters bij om een optimaal proces te garanderen. De parameters worden dan continu aangepast.

2.3.1 Resultaten uit de literatuur

In deze thesis is het de bedoeling om het effect van EDM op CFRP op macroscopische schaal na te gaan. In de literatuur zijn er enkele papers voorhanden waarbij elektrodes kleiner dan 1 mm worden gebruikt [10]. Hierbij kan gesproken worden over microbewerken. De vonktechnologie van dergelijke papers is echter niet relevant omwille van de te kleine schaal. Parameters kunnen dan niet met voldoende betrouwbaarheid vergeleken worden.

Desondanks uitgebreid zoekwerk in patentendatabanken en andere literaire bronnen zijn er slechts vier relevante papers gevonden met duidelijke testresultaten. Deze worden in volgende paragrafen besproken. Ze worden gerangschikt via relevantie. Zo is de eerste paper iets uitgebreider naar resultaten toe dan de tweede.

In een eerste paper: 'Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials' [11] worden testen uitgevoerd op de Eurospark H425 EDM machine (Figuur 7). Een eerder eenvoudige machine met enkel een servo sturing op de z-as. De kwaliteit van het vonkproces wordt visueel weergegeven met een rood of groen lichtsignaal. Bij een rood signaal dienen de parameters zoals pulstijd en stroomsterkte manueel worden aangepast tot het groene signaal bereikt wordt. Dit is om voor een extra fijnregeling te zorgen. Welke parameters er ingesteld dienen te worden kunnen uit vonktabellen worden afgeleid.



Figuur 7: Voorbeeld van Eurospark H425 EDM machine [32]

In Tabel 1 worden de fysische parameters weergegeven. Er worden twee elektrodes getest, koper en grafiet, met telkens een diameter van 10 mm. Het is onduidelijk hoe diep de elektrode het werkstuk bewerkt. Dit zou een interessant gegeven zijn om de betrouwbaarheid van de materiaalafnameratio (MRR) te kunnen inschatten. De MRR wordt uitgedrukt in aantal mm^3/min en is het volume verwijderd werkstukmateriaal gedeeld door de tijd dat de machine hiervoor nodig heeft. Het CFRP bestaat uit verschillende lagen (prepregs) die tot een laminaat worden opgebouwd. De top laag bestaat uit een dunne gewezen vezelmat, dan volgen er twee vezellagen die een hoek van 90° met elkaar maken. In het midden van het CFRP bevinden zich zeven lagen waarvan de afzonderlijke lagen eveneens een hoek van 90° met elkaar maken, maar 45° gedraaid liggen t.o.v. de eerste twee lagen. Verdere details uit het productieproces zijn onbekend. Over extra spoeling, pulsatie of rotatie van de z-as wordt niets vermeld. Er kan vanuit worden gegaan dat deze niet worden toegepast.

Machine	Eurospark H425
Elektrode	Materiaal: Koper (99,9 %) of grafiet Diameter $\varnothing = 10$ mm Bewerkte diepte: Onbekend
CFRP	Geleidbaarheid $\rho = 0,005 - 0,001 \Omega\text{cm}$ Afmetingen: $2,5 \times 25 \times 25$ mm Vezels: PAN vezels, 65% (volume procent) Matrixmateriaal: Epoxy hars (Fothergill and Harvey code 69) Gebruikt productieproces: Onbekend
Diëlektricum	Esso mentor 28
Extra spoeling	Onbekend
Pulsatie z-as	Onbekend

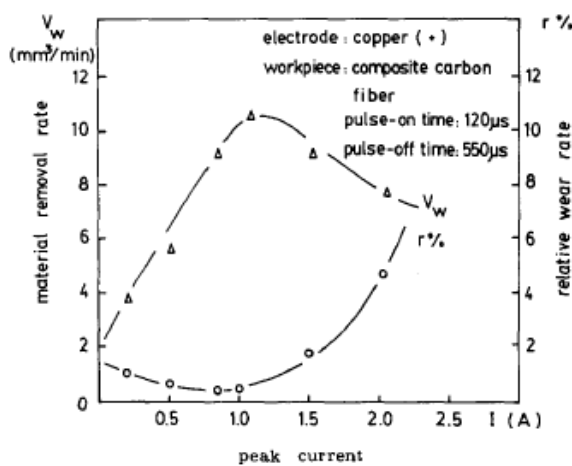
Tabel 1: Fysische parameters, paper: [8]

In Tabel 2 worden de gebruikte elektrische parameters weergegeven. De stroom, pulsduur en pulsintervaltijd worden gevarieerd. De keuze van het bereik wordt niet verantwoord, mogelijks geven waarden buiten dit bereik irrelevante resultaten. De spanning wordt op 100 V vastgelegd terwijl het effect van de polariteit wordt nagegaan.

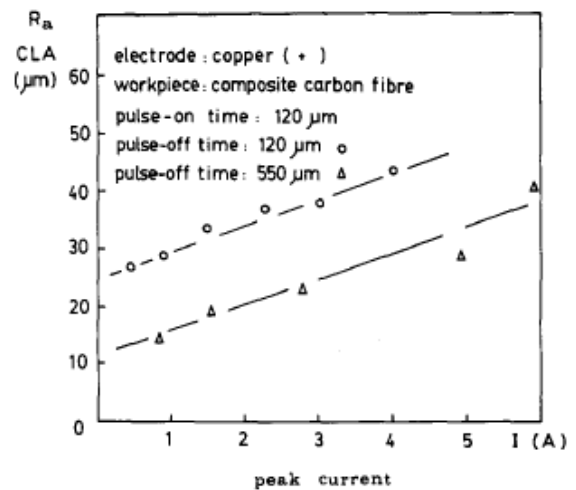
I [A]	0,5 - 5
t_{on} [μs]	25 - 160
t_{off} [μs]	100 - 600
U [V]	+100 (elektrode positief) -100 (elektrode negatief)

Tabel 2: Elektrische parameters, paper: [8]

Als uitgang van de verschillende testen worden vier verschillende grootheden opgemeten. De materiaalafnameratio (MRR), relatieve elektrodeslijtage (EWR), dimensionele nauwkeurigheid en de kwaliteit van het bewerkte oppervlak (R_a). Verschillende testen worden uitgevoerd waarbij telkens een grafiek wordt gemaakt in functie van een uitgangsgrootheid. Een duidelijk testplan ontbreekt, de verschillende testen worden eerder sporadisch uitgevoerd. Figuur 9 geeft het resultaat weer bij het variëren van de stroom waarbij de pulsduur en pulsintervaltijd constant blijven. Er wordt een optimale stroomsterkte van 1 A gevonden in functie van maximale MRR en minimale EWR. Dit met een pulsduur van $120 \mu\text{s}$ en een pulsintervaltijd van $550 \mu\text{s}$. Na het bereiken van dit optimum daalt de materiaalafnameratio opnieuw. In Figuur 8 wordt het effect op de oppervlakte ruwheid weergegeven, hierbij stijgt de ruwheid lineair met toenemende stroomsterkte, van 15 tot $45 \mu\text{m}$. Een langere pulsintervaltijd zorgt voor een kleinere oppervlakteruwheid. Deze waarnemingen worden in [11] vermeld, hiervoor wordt geen verklaring of onderbouwing gegeven.



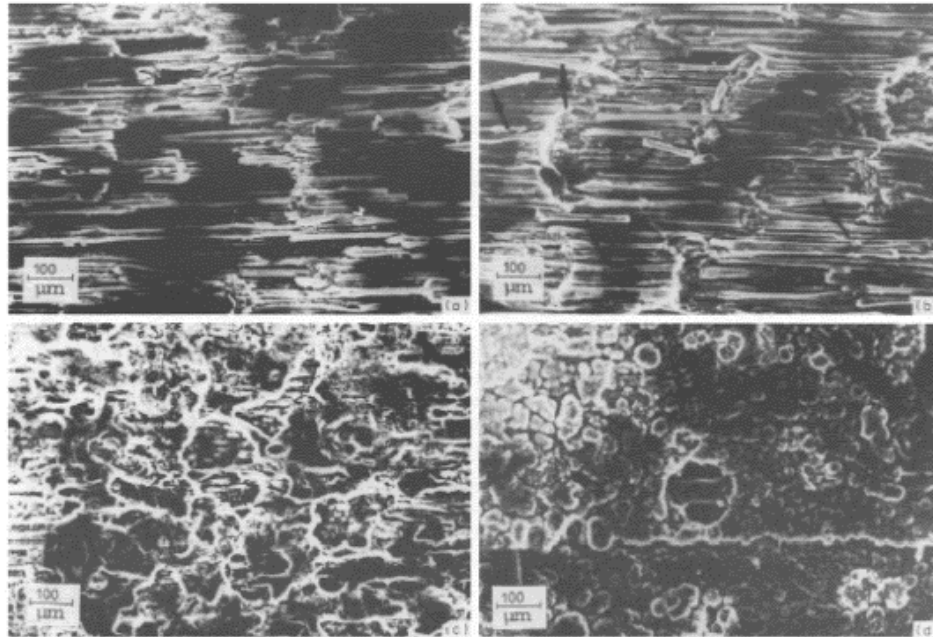
Figuur 9: Optimale stroomsterkte [13]



Figuur 8: Oppervlakteruwheid [13]

Het bewerkte oppervlak wordt met een elektronenmicroscop (SEM) bekeken. Er wordt een elektronenstraal van 20 kV gebruikt. Hierbij wordt geen coating gesputterd op het sample voor analyse met de SEM microscoop. Op Figuur 10 (a) en (b) wordt een stroom van respectievelijk 0,5 en 1 A gebruikt. De vezels zijn duidelijk te onderscheiden van het matrixmateriaal. De materiaalafnameratio is laag ($\sim 6 \text{ mm}^3/\text{min}$) In figuur 10 (c) en (d) worden stromen van respectievelijk 1,5 en 2 A gebruikt. Het is duidelijk dat vanaf een bepaalde stroom de vezels in elkaar versmelten, de vezels zijn niet meer te onderscheiden van het kunststof. In deze versmolten massa kan het kunststof als een tweede fase voorkomen. Een andere mogelijkheid is dat het volledig verdampt uit het werkstuk door de lokale hoge temperatuur. Het is niet duidelijk of het polymeer hier mee in versmolten zit, een bijkomend EDX analyse die de samenstellingen van het materiaal op een bepaalde plaats kan weergeven zou verrijkend zijn. De geïnteresseerde lezer kan in Bijlage B

t.e.m. Bijlage J verdere resultaten vinden uit bovenstaande paper. In volgende alinea's zullen besluiten en conclusies uit [11] besproken worden.



Figuur 10: SEM analyse van het bewerkt oppervlak met verschillende stroomsterkten [11]

De stroomsterkte en pulsduur zijn de dominante parameters voor het instellen van het proces. Een goede keuze van de pulsintervaltijd kan het resultaat verder optimaliseren. Vanaf een bepaalde stroomsterkte zullen onderliggende vezels worden aangetast waardoor smeltzones in het werkstukoppervlak worden waargenomen. De materiaalsamenstelling van deze zones is niet duidelijk, er wordt verondersteld dat bij lage stroomsterkte het composiet verdampt. Bij grotere stroomsterkte gaat een deel van de kunststof smelten waardoor deze over het werkstukoppervlak uitsmeert. Hierdoor ontstaat een niet geleidend obstakel tussen werkstuk en elektrode waardoor de materiaalafnameratio daalt. Vezelbundels gaan vanaf hogere stroomsterkten ($> 1,5 \text{ A}$) ontbinden met het matrixmateriaal, waardoor kleine scheurtjes in het materiaal ontstaan, de oppervlaktekwaliteit is hierbij van slechtere kwaliteit. Bij hogere stroomsterkten zullen de vonken agressiever inwerken waardoor er kraters in het werkstukoppervlak ontstaan. Een andere vorm van werkstukschade zijn vezeluitzetting van de vezelstructuur. Deze schade treedt eveneens op bij te hoge stroomsterkten. Er wordt dan meer thermische energie aan het werkstuk toegevoegd. Daarom wordt 1 A/cm^2 als maximale stroomdichtheid vooropgesteld, in vergelijking met zacht staal, hierbij is dit 9 A/cm^2 [11].

Er kan een maximale MRR van $10 \text{ mm}^3/\text{min}$ worden waargenomen. De relatieve elektrodeslijtage blijft hierbij beperkt tot minder dan 1%. Deze resultaten worden verkregen met een positief gepolariseerde elektrode. Terwijl bij een negatieve elektrode de maximaal materiaalafname ongeveer de helft is t.o.v. bij een positieve elektrode. De kraters afkomstig van het vonkproces met hoge stroomsterkte, in het bewerkt oppervlak zijn verschillend naargelang de polarisatie. Positieve elektroden

geven kraters met kleinere diameter maar met grotere diepte. Deze polarisatie is tevens gevoeliger voor opbouw materiaal. Dit is materiaal dat wegsmelt van het werkstuk en vervolgens terug stolt op het werkstukoppervlak. De affiniteit van dit materiaal aan het werkstuk is gering waardoor deze gemakkelijk handmatig kan worden losgemaakt.

Het vonken van CFRP met een grafietelektrode zorgt voor eenzelfde MRR als deze bij gebruik van een koperelektrode. Een nadeel is dat de elektrodeslijtage bij grafiet steeds groter is. Ook zal de dimensionele nauwkeurigheid vanaf 1 A lichtjes dalen.

De betrouwbaarheid van de paper kan in vraag worden gesteld. Dit omdat deze dateert uit 1989. De fundamentele van het EDM proces zijn hetzelfde gebleven, waardoor de karakteristieke parameters nog steeds het proces bepalen. Toch zijn EDM machines over een tijdspanne van 27 jaar een stuk geëvolueerd. Er zijn meer parameters, meer automatisering en generators met een groter bereik. Hierdoor kunnen processen beter worden geoptimaliseerd en kan een parameterbereik worden gebruikt dat voorheen nog niet getest werd. Het meest gewijzigde element, is de evolutie van CFRP. Het laatste decennia is veel onderzoek verricht om CFRP steeds te verbeteren. Denk o.a. aan vezels met een nog grotere E-modulus en lager gewicht. Dit in combinatie met harsen die de opbouw tot een laminaat steeds vereenvoudigen. Hierdoor kunnen de bestanddelen van het composiet door de jaren heen een stuk gewijzigd zijn waardoor afwijkende resultaten kunnen verwacht worden.

Een tweede paper: ‘The Feasibility Analysis of Electrical-Discharge Machinig of Carbon-Carbon Composites’ [12]. Hierbij wordt de mogelijkheid van het vonken van CFRP nagegaan. De machine die wordt gebruikt wordt weergegeven in Bijlage K. Er wordt steeds een koperelektrode met diameter 1 mm gebruikt. Tabel 3 geeft een overzicht van de gebruikte fysische parameters weer.

Machine	Charme CD-50M
Elektrode	Materiaal: koper Diameter $\varnothing = 1$ mm Bewerkte diepte = onbekend
CFRP	Geleidbaarheid: onbekend Afmetingen: 1 x 10 x 50 mm Vezels: $\varnothing = 7$ μ m (code = TR-30K, Mitsubishi Rayon Co. Ltd.) Matrixmateriaal: fenolische hars (code = PF-650, Chung-Chun Plastics Co.) Laminaat: 8 lagen, 90° afwisselend gestapeld Productie: Compressie matrijs (13,5 MPa, 150°C)
Diëlektricum	Soort kerosine, verder geen specificaties

Extra spoeling	Onbekend
Pulsatie z-as	Onbekend

Tabel 3: Fysische parameters, paper: [12]

De elektrode wordt positief ingesteld met een constante generatorspanning van 35 V. Er worden twee parameters gevarieerd, dit is de stroomsterkte en de pulsduur (Tabel 4).

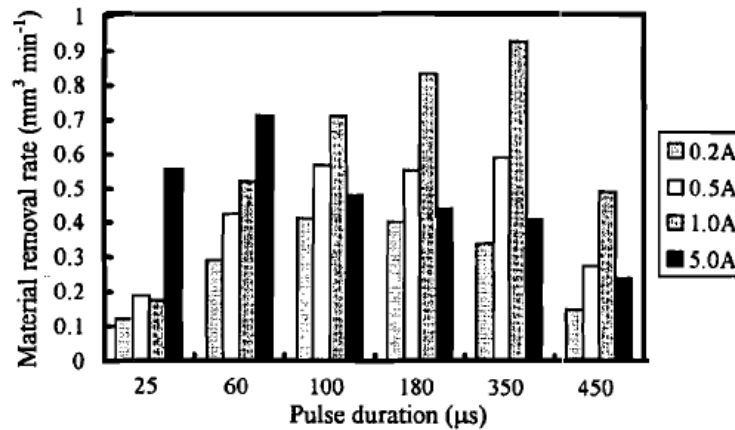
I [A]	0,2 - 10,0
t_{on} [μ S]	25 - 450
t_{off} [μ S]	onbekend
U [V]	+35 (elektrode positief)
SV	90 %

Tabel 4: Elektrische parameters, paper: [12]

Er worden drie uitgangsgrootheden nagegaan, de materiaalfnameratio (MRR), oppervlaktetopografie en de 'herschikkingslaag' (recast layer) op het werkstuk. Met oppervlaktetopografie wordt de samenstelling van het materiaal in het bewerkte werkstuk bedoeld.

Er worden verschillende vaststellingen gedaan, zo worden de spaandeeltjes onder een SEM microscoop bekeken. De instellingen voor stroomsterkte zijn 2 A en 25 μ s voor pulsduur. Er wordt opgemerkt dat deze spaandeeltjes bolvormig zijn met een diametervariatie van 3 tot 30 μ m. Dit wil zeggen dat de spaandeeltjes smelten door de toegevoegde thermisch energie welke als een puntbron kan bekeken worden. Vervolgens stollen de deeltjes op zeer korte tijd in het diëlektricum wat duidt op de sfeervorm. Ook wordt het bewerkte oppervlak bij 0,2 en 5 A met de SEM microscoop bekeken ($T_{on} = 25 \mu$ s), de foto's in Bijlage L geven het resultaat hiervan weer. Bij hogere stroomsterkte worden de kraters groter en eerder langwerpiger, omdat er zich meer gesmolten materiaal tussen de vonkspleet bevindt. Hierdoor kunnen zeer intense ontladingen ontstaan waardoor grotere kraters worden gevormd. De thermische energie breidt zich uit volgens de vezelrichting. Een andere vaststelling is de vorming van een 'recast layer'. De lokaal hoge temperatuur van 8000 - 12000 °C [13] zorgt voor twee effecten: Het bovenste materiaal verdampt en wordt meegenomen met het diëlektricum. Terwijl de onderste laag smelt waardoor sommige delen van deze smeltlaag te zwaar zijn om afgevoerd te worden. Dit materiaal komt terug neer op het werkstuk en stolt aan het oppervlak. De waargenomen kleur van deze laag is wit waardoor deze ook de 'witte laag' genoemd wordt, zoals bij metalen. Afhankelijk van de stroomsterkte worden er dieptes van deze laag, van 5 tot 15 μ m waargenomen (Bijlage M). Bij hogere stroomsterkte worden zoals te verwachten ruwere oppervlakken en meer kraters in het oppervlak waargenomen, dus ook hoe dikker de 'recast layer', hoe ruwer het oppervlak. Een hogere stroomsterkte zorgt tevens voor meer schade aan de rand van het bewerkte oppervlak, Bijlage N geeft deze randaantasting visueel weer. De aantasting varieert van 0 μ m diep bij 0,2 A tot 200 μ m bij 10 A, deze aantastingen zijn niet duidelijk

zichtbaar op de figuren. Omdat CFRP een anistroop materiaal is en omdat er geen gebruik wordt gemaakt van geweven prepregs zullen er twee soorten vezelrichtingen aan de rand voorkomen. De meeste vezels zullen normaal op de bewerkte rand staan terwijl andere vezels hier tangentieel aan aansluiten. Onafhankelijk welke stroom er gebruikt wordt, de tangentielle vezels worden niet aangetast (Bijlage O). Dit omdat microscheuren of andere aantastingen zich volgens de vezelrichting voortplanten. Het omgekeerde is ook mogelijk, bij hogere stromen kan de 'recast layer' de fibers normaal op de rand afdekken tegen scheurpropagatie. Dit kan gezien worden als een soort van micro-las tussen de fibers (Bijlage P).

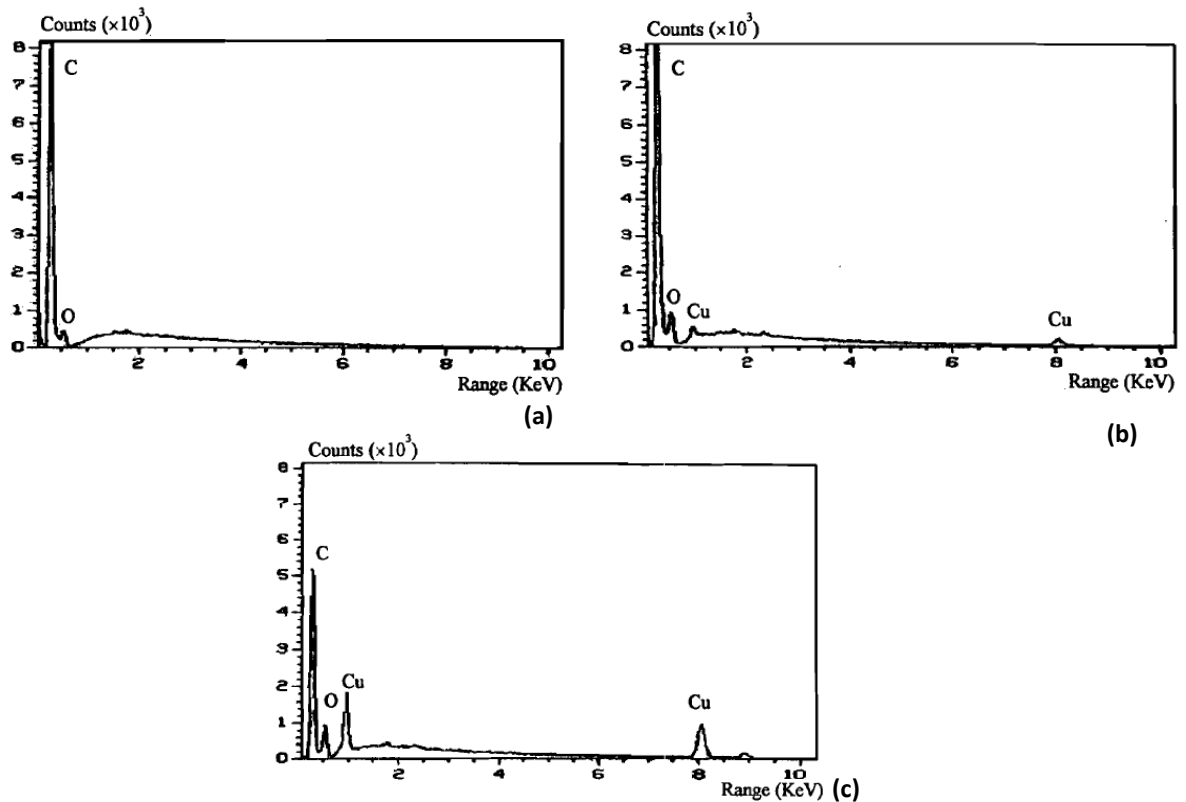


Figuur 11: MRR, paper: [12]

De materiaalafnameratio wordt opgemeten voor een variërende stroomsterkte en pulsduur. Figuur 11 geeft weer dat een maximale MRR van $0,93 \text{ mm}^3/\text{min}$ kan gehaald worden met $I = 2 \text{ A}$ en $T_{\text{on}} = 350 \text{ } \mu\text{s}$ en $U = 35 \text{ V}$. Er wordt opgemerkt dat voor elke stroomsterkte steeds een pulsduur overeenkomt die een optimale MRR bepaald. Door een stijgende stroomsterkte wordt de recast layer dikker waardoor de MRR daalt.

Tot slot wordt er naar de chemische samenstelling van het bewerkte oppervlak gekeken. Zo kan er materiaal van de koperelektrode via diffusie in het werkstuk dringen, ook het omgekeerde is mogelijk. Volgens [14] zal dit gebeuren in gasvormige, gesmolten en vaste fase. Er wordt een EDX analyse van het bewerkte oppervlak gemaakt, Figuur 12 geeft de resultaten hiervan weer. Het onbewerkte CFRP in de eerste figuur vertoont een piek bij koolstof en daarnaast een kleine oxide piek. De koolstofpiek is te verwachten, niet enkel door de koolstofvezels, maar ook omdat de moleculen uit het matrixmateriaal vooral uit koolstof bestaan. Bij een kleine stroomsterkte van $0,2 \text{ A}$ in de tweede figuur is er een aanwezigheid van koper zichtbaar, dit bevestigt het diffusieproces van koper deeltjes naar het werkstuk. Een verklaring hiervoor is de hoge temperatuurstijging van de elektrode gevolgd door een ogenblikkelijke ionisatie van het materiaal. Waardoor koperionen worden aangetrokken tot het werkstukoppervlak en hier dan verder indringen door het bewerkingsproces. Dit fenomeen is te vergelijken met het poedercoatproces van laklagen. De laatste figuur geeft weer dat bij het verhogen van de stroomsterkte ($2,5$

A) er zich meer koperdeeltjes in het werkstuk bevinden. Bijlage Q geeft de toename van gewichtspercentage koper in het werkstukoppervlak grafisch weer bij een stijgende stroomsterkte. Terwijl Bijlage R de ruimtelijk distributie van koperdeeltjes op het werkstukoppervlak weergeeft. Merk op dat ook het gebruikte diëlektricum een invloed heeft op de chemische samenstelling van het bewerkte materiaal, dit is niet zichtbaar in de EDX analyse. Waarschijnlijk omdat de invloed er te klein is waardoor deze golflengten niet worden waargenomen. Het bewerkte CFRP kan dus als gelegeerd worden beschouwd met elektrodemateriaal en het diëlektricum. Door het ionisatieproces is er een sterke verbinding van het koper met het werkstuk waardoor dit enkele voordelen kan bieden, zo kan de oppervlakteweerstand tegen slijtage vergroten.



Figuur 12: EDX analyse (a) van het onbewerkte CFRP (b) van het bewerkte oppervlak 0,2 A; 25 μ s (c) van het bewerkte oppervlak 2,5 A 25 μ s [12]

Een derde paper: ‘Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites’ [15]. Deze paper is van dezelfde auteurs als de vorige paper [12], doch drie jaar recenter. Het gaat om een gelijkaardig CFRP, i.p.v. een koperelektrode wordt nu een grafietelektrode gebruikt, eveneens met een diameter van 1 mm (Tabel 5). Het interval waarover de elektrische parameters worden gevarieerd is gehalveerd t.o.v. [12], zie Tabel 6.

Machine	Onbekend
Elektrode	Materiaal: grafiet Diameter $\varnothing = 1$ mm Bewerkte diepte = onbekend
CFRP	Geleidbaarheid: onbekend Afmetingen: 1 x 10 x 50 mm Vezels: $\varnothing = 7$ μm (code = TR-30K, Mitsubishi Rayon Co. Ltd.) Matrixmateriaal: fenolische hars (code = PF-650, Chung-Chun Plastics Co.) Laminaat: 8 lagen, met 90° afwisselend gestapeld Productie: Met compressie matrijs (13,5 MPa, 150°C)
Diëlektricum	Soort kerosine, verder geen specificaties
Extra spoeling	Onbekend
Pulsatie z-as	Onbekend

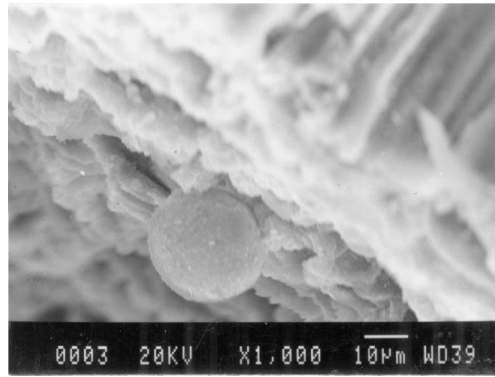
Tabel 5: Fysische parameters, paper: [15]

I [A]	1 – 5
t_{on} [μs]	20 – 220
t_{off} [μs]	onbekend
U [V]	+35 (elektrode positief)
SV	90 %

Tabel 6: Elektrische parameters, paper: [15]

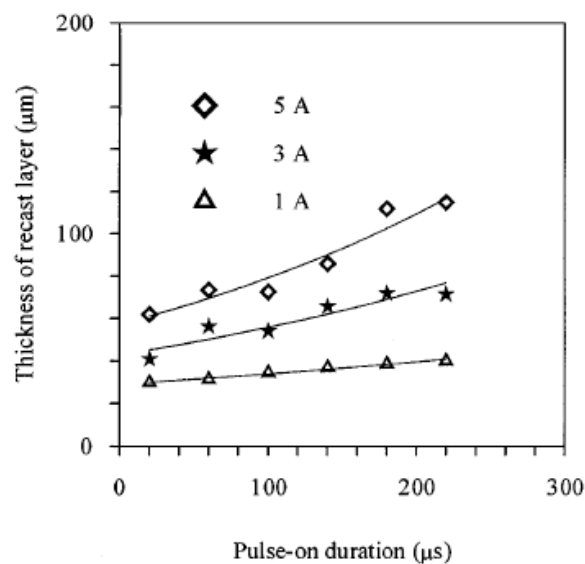
Opnieuw worden enkele uitgangsgrootheden nagegaan, de materiaalafnameratio (MRR), recast layer, oppervlakteruwheid (Ra) en de kwaliteit van de bewerkte werkstukrand.

Figuur 13 geeft een duidelijk microscopische figuur van het bewerkte oppervlak. Vorige veronderstellingen worden bevestigd, de spaandeeltjes zijn sfeervormig en er zijn random verspreide witte lagen op het bewerkte oppervlak. De sfeervormige deeltjes zijn vermoedelijk gestold vanuit de gasfase. Terwijl de witte laag ontstaat uit het stollen van de vloeistoffase.



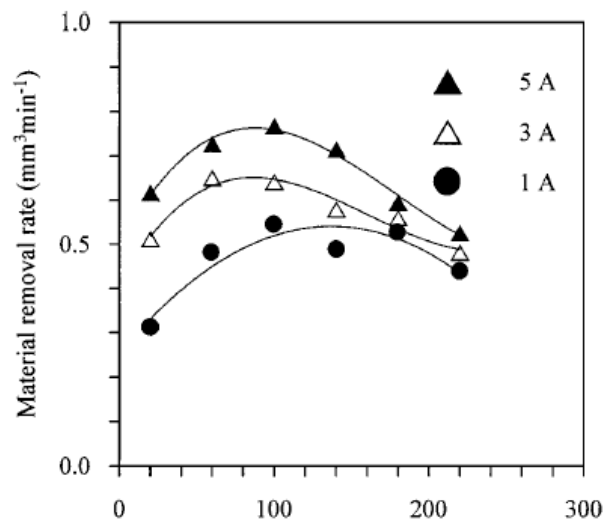
Figuur 13: SEM figuur van het bewerkte oppervlak (3 A; 20 μ s) [15]

Opnieuw worden dezelfde vaststellingen gedaan i.v.m. met de aantasting van de bewerkte werkstukrand. Bij lage stroomsterkte (1 A) en lage pulsduur (20 μ s) is geen scheurvorming (delaminatie) waar te nemen. Vanaf een bepaalde energiehoeveelheid ontstaat scheurvorming, deze wordt groter evenredig met de stroomsterkte en pulsduur. Dit op de vezels normaal aan de rand. Deze scheurvorming breidt zich verder uit dan de warmte beïnvloede zone indien er hoge stroom en pulsduur gebruikt worden. In vergelijking met conventioneel bewerken is de rand braamvrij, dit kan in sommige toepassingen een groot voordeel zijn. Ter uitbreiding wordt het verschil vergeleken tussen de rand van het boven- en beneden werkstukoppervlak (Bijlage S). Hierbij wordt duidelijk dat de onderste rand steeds van betere kwaliteit is dan de bovenste. Opnieuw wordt de 'recast layer' geanalyseerd. Figuur 14 geeft weer dat de pulsduur een grotere invloed heeft op de dikte van deze laag dus ook op de oppervlakteruwheid (Bijlage T).



Figuur 14: Dikte 'recast layer' in functie van stroom en pulsduur [15]

Op Figuur 15 is de MRR weergegeven. Een te lage pulsduur zorgt voor een te lage energie input waardoor maar moeilijk materiaal kan verwijderd worden. Er wordt een maximum MRR van $0,77 \text{ mm}^3/\text{min}$ gevonden Deze is iets lager dan $0,93 \text{ mm}^3/\text{min}$, bij het gebruik van een koperelektrode in [12]. Voor de verschillende stromen wordt steeds een optimale pulsduur gevonden in de buurt van $100 \mu\text{s}$. Bij het verhogen van de pulsduur stijgt de temperatuur. Hierdoor zal de smeltlaag dieper en zwaarder worden waardoor deze moeilijker kan worden weggespoeld. Deze verhindert de materiaalafname waardoor de MRR vanaf een bepaalde pulsduur daalt. In deze paper worden wel verklaringen gegeven voor sommige optredende fenomenen, toch zijn deze niet altijd goed onderbouwd d.m.v. materiaalkundig onderzoek.



Figuur 15: MRR, paper [15]

Een vierde paper: 'EDM machining of carbon - carbon composite - a Taguchi approach' [16]. Het doel van dit naslagwerk is om optimale procesparameters te bepalen a.d.h.v. een design of experiments (DOE). De machine hiervoor gebruikt, een 'Electronica EZMC' heeft een NC sturing op de z-as voor zover bekend. Er wordt steeds een koperelektrode gebruikt met een diameter van $1,6 \text{ mm}$, waarbij tot $0,2 \text{ mm}$ diep wordt bewerkt. Dit is aan de lage kant omdat een anistroop en heterogeen materiaal getest wordt. Verder is de geleidbaarheid van het gebruikte composiet ongeveer tien keer lager dan in [11]. Informatie over het soort prepreg of aanvullende datasheets van het CFRP ontbreken. Een overzicht wordt gegeven in Tabel 7.

Machine	Electronica EZMC
Elektrode	Materiaal: Koper (99,97 %) Diameter $\varnothing = 1,6 \text{ mm}$ Bewerkte diepte = $0,2 \text{ mm}$

CFRP	Geleidbaarheid $\rho = 0,096 \Omega\text{cm}$ Afmetingen: 2 x 50 x 20 mm Vezels: Onbekend Matrixmateriaal: Thermohardende hars Productieproces: Onbekend
Diëlektricum	IPOL Spark Erosion 450
Extra spoeling	Onbekend
Pulsatie z-as	Onbekend

Tabel 7: Fysische parameters, paper: [16]

Wat betreft de elektrische parameters worden er drie gevarieerd, steeds op twee levels (Tabel 8). Dit bereik wordt zo gekozen overeenkomstig de capaciteit van de EDM machine en uit andere ervaringen met EDM van CFRP [12]. Om alle mogelijke combinaties van de drie parameters en hun bijhorende levels te kunnen testen zijn acht experimenten nodig. Figuur 16 geeft de experimentele layout weer met de bijhorende level-waarden.

	Level 1	Level 2
I [A]	1	9
t_{on} [μs]	150	750
U [V]	-20 (elektrode negatief)	-100 (elektrode negatief)
t_{off} [μs]	onbekend	

Tabel 8: Elektrische parameters, paper: [16]

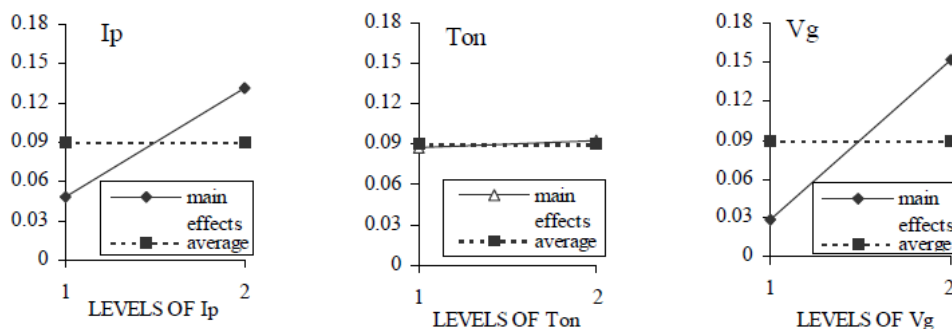
Experimental layout using L8 orthogonal array

Experiment number	Machining parameter level		
	Gap voltage, V_g	Ton	Pulse current, I_p
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

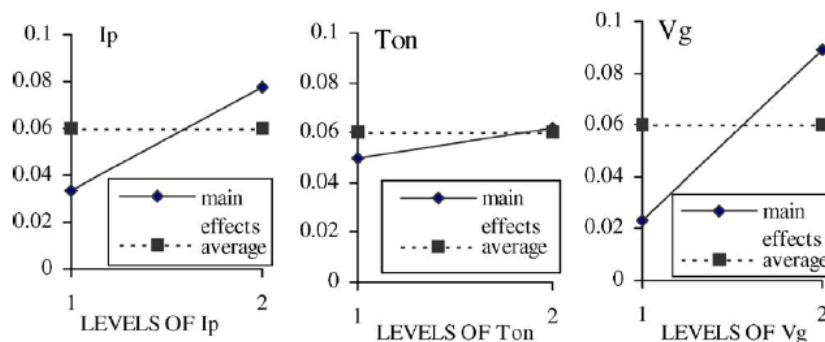
Figuur 16: DOE tabel [16]

Als uitgang van de verschillende testen worden de materiaalafnameratio (MRR) en elektrodeslijtage opgemeten (EWR). Voor EWR wordt na elke test de massa van de elektrode opgemeten. Uit de massaverschillen kan vervolgens EWR berekend worden, de hoogste MRR die waargenomen wordt bedraagt $0,227 \text{ mm}^3/\text{min}$. De effecten van level 1 en 2 van de parameters op de uitgangen worden berekend. De effecten op MRR en EWR worden weergegeven in Figuur 18 en Figuur 17. De helling van de curves bepalen de significantie van de parameters. Bij het effect op MRR heeft de generatorspanning gevolgd door de stroomsterkte het grootste effect, terwijl de pulsduur zeer weinig invloed uitoefent. Bij het effect op EWR kunnen dezelfde besluiten getrokken worden, enkel heeft de pulsduur hier aanzienlijk meer invloed.

Er wordt gebruik gemaakt van een DOE om het aantal testen drastisch te verminderen. De significantie van drie parameters kan met slechts acht testen worden bepaald. Op deze manier wordt er vanuit gegaan dat het effect van parameters steeds voor een lineair resultaat zorgt. Zinkvonken is een zeer complex proces o.a. doordat het wijzigen van een bepaalde parameter niet zorgt voor een lineaire respons. Daarom dient de juistheid van een DOE met twee levels worden nagegaan. Hierbij is het belangrijk dat enkele testen met intermediaire parameterwaarden worden uitgevoerd, bij te grote afwijkingen zijn de resultaten van DOE onbetrouwbaar. Daarnaast kan de interactie tussen de parameters worden nagegaan. Dit wordt niet onderzocht in de paper. Een interactie treedt op wanneer een parameter zorgt voor een ander effect op de uitgang bij andere levels van andere parameters.



Figuur 18: Hoofdeffecten van de parameters op MRR [16]



Figuur 17: Hoofdeffecten van de parameters op EWR [16]

2.4 Besluit

De geringe literatuur die voorhanden is geeft een goede verduidelijking over de vonkbaarheid van CFRP. Het composiet is vonkbaar, dit heeft als voordeel dat er met EDM zeer complexe vormen kunnen worden vervaardigd met hoge nauwkeurigheid. Een ondergrens voor geleidbaarheid is niet vermeldt. Dit omdat in tegenstelling tot technische keramieken, de geleidende fase niet eenvoudig kan worden verminderd in het composiet. Door de continue vezels en het gebruik van prepregs is dit moeilijk te realiseren. Op materiaalkundig niveau wordt waargenomen dat de stroomsterkte en pulsduur de grootste invloed op het proces uitoefenen. Een DOE weerlegt deze vaststellingen, hierbij wordt weergegeven dat de generatorspanning het grootste effect veroorzaakt. Vonkparameters zorgen niet voor een lineair verloop van uitgangsgrootheden (MRR, oppervlakteruwheid...). Daarom is het verder aangeraden om gebruik te maken van een DOE met meer dan twee levels.

De verschillende behaalde uitgangsgrootheden kunnen sterk verschillen afhankelijk van het gebruikte CFRP, een andere vezelstructuur geeft al snel een andere geleidbaarheid. De vezels kunnen zo een verschillende distributie over het werkstukoppervlak vertonen waardoor dit andere vonkeigenschappen geeft. Er worden maximale materiaalafnameratio's gevonden die sterk uit elkaar liggen, Tabel 9 geeft hier een overzicht van weer. De elektrodes hebben een verschillende diameter. Om hiermee rekening te houden wordt de MRR door de frontale elektrode oppervlakte gedeeld. Zo wordt het quotiënt, de materiaalafnamesnelheid (MAS) verkregen, deze waarde zorgt voor een realistischere vergelijking. Opnieuw kan er vastgesteld worden dat de materiaalafnamesnelheid sterk varieert.

Paper nr.	Maximale MRR [mm ³ /min]	Elektrode diameter [mm]	Maximale MAS [mm/min]	I [A]	t _{on} [μs]	t _{off} [μs]	U [V]
1	10,00	10	0,13	1	120	550	+ 100
2	0,93	1	1,18	1	350	?	+ 35
3	0,77	1	0,98	5	100	?	+ 35
4	0,23	1,6	0,11	9	150	?	- 100

Tabel 9: Vergelijking MRR tussen verschillende papers [11] [12] [15] [16]

Verder zijn enkele vonktechnische inzichten verworven, zo wordt beter een koperelektrode gebruikt i.p.v. een grafietelektrode. Hierbij is er minder elektrodeslijtage en het zorgt voor een betere oppervlaktekwaliteit. Daarnaast is de EWR minimaal bij een positieve elektrode, terwijl kraters in het werkstuk dieper zijn. Om een aanvaardbare oppervlaktekwaliteit te garanderen dienen te hoge stroom en pulsduur vermeden te worden. Te hoge energiewaarden kunnen zorgen voor schademechanismen zoals: Vezeluitzetting, delaminatie, herschikkingslagen en het ontstaan van kraters aan het oppervlak. Het bewerkte oppervlak kan beschouwd worden als een legering van elektrodemateriaal en het composiet. De spaandeeltjes zijn sfeervormig en afkomstig van de gasvormige fase. Terwijl herschikkingslagen afkomstig zijn vanuit de vloeistoffase van het afgevoerde materiaal.

Hoofdstuk 3: Inleidende experimentele testen

Alvorens initiële experimenten uit te voeren worden de mogelijkheden van de machine nagegaan. Een goed begrip van de te gebruiken zinkvonker wordt vermeld. De mogelijkheid om aanpassingen te doen in bestaande vonktechnologieën of het opnieuw aanmaken van dergelijke tabellen verschilt sterk per machine. Naast het vonktechnologisch aspect beschikt de machine over additionele functionaliteiten. Deze kunnen al dan niet worden ingeschakeld om de ontwikkeling van een nieuwe set parameters efficiënter te laten verlopen.

Eénmaal de machine doorgelicht, kan gestart worden met het testen van het materiaal. In een eerste onderzoek wordt een weerstandsmeting van het CFRP uitgevoerd om dit met de literatuur te kunnen vergelijken. Volgens literatuuronderzoek kan CFRP door vonkerosie worden bewerkt. Het te gebruiken CFRP verschilt van deze uit Hoofdstuk 2, daarom dient de vonkbaarheid hiervan in een eerste fase proefondervindelijk worden aangetoond.

Het ontwikkelen van een nieuwe vonktechnologie is vooral nuttig wanneer deze kan worden toegepast in de industrie. Zo is een vonktechnologie die resulteert in bv. een extreem lage MRR onbruikbaar in een commerciële omgeving. Verder wordt onderzocht hoe zinkvonken van CFRP voordeliger kan zijn t.o.v. conventionele technieken, zo vergroot de ontwerprijheid voor componenten uit CFRP. Het zinkvonken kan vormen vervaardigen welke met andere technieken niet kunnen verkregen worden.

3.1 De zinkvonkmachine

Sinds jaren 50 produceren zowel Agie als Charmilles de eerste EDM machines. In 1996 bundelen deze machinebouwers hun krachten waarbij ze fuseren tot één bedrijf, AgieCharmilles onderdeel van de Georg Fischer groep [17]. Dit bedrijf is marktleider wat betreft de bouw en technologieontwikkeling van zinkvonkmachines. Om de testen uit te voeren wordt een Roboform 350γ van AgieCharmilles gebruikt, zie Figuur 19. Het is niet de bedoeling om de gehele werking van de machine in detail

te bespreken. Enkel de machine-elementen die specifiek invloed hebben op het vonken van CFRP.



Figuur 19: Roboform 350y



Figuur 20: Elektrode ondermaat

3.1.1 Machineparameters

Om de machine een opdracht te laten uitvoeren dienen enkele menu's te worden overlopen alvorens een ISO code kan worden gegenereerd. Eerst worden het soort caviteit, aantal elektrodes, aantal werkstukken, aantal caviteiten en aantal bewerkingsstappen (ruwen, finisseren...) ingegeven. In een volgend menu is de mogelijkheid om de afmetingen van de elektrode door de machine te laten opmeten. Daarnaast dient de ondermaat van de elektrode worden ingegeven, Figuur 20. Door de vonkbewerking is er steeds een vonkspleet tussen werkstuk en elektrode, deze zal groter zijn naarmate ruw wordt bewerkt en kleiner voor het finisseren. Daarom wordt de elektrode steeds kleiner uitgevoerd dan de gewenste nominale maat van het werkstuk. Om een goede dimensionele nauwkeurigheid te verkrijgen wordt deze ondermaat of diepte van inbranding berekend. De machine voorziet hiervoor een berekeningsmodule (Bijlage U). In deze berekeningsmodule wordt o.a. geselecteerd welke elektrode-werkstukcombinatie gebruikt wordt. CFRP staat niet in deze lijst waardoor hiervoor geen ondermaat kan berekend worden. De diepte van inbranding kan proefondervindelijk worden opgemeten.

Vervolgens wordt het werkstuk opgemeten. Dit kan op verschillende manieren. Voor de testopstelling is het enkel nodig om de elektrode neerwaarts te laten bewegen. De

elektrode wordt op de gewenste plaats gepositioneerd. Het werkstuk wordt enkel in z-richting opgemeten. De ordinaat van het machinecoördinatenstelsel wordt hier, aan het werkstukoppervlak, aan nul gelijkgesteld ($x=0$, $y=0$, $z=0$). Nu heeft de machine voldoende informatie over de positie waar er bewerkt moet worden. De hoogte van het diëlektricum wordt ingesteld. Deze hoogte wordt ingesteld zodat het vonkproces zich steeds meer dan 40 mm [18] onder het vloeistofoppervlak bevindt. Deze veiligheidsregel wordt gehanteerd om te voorkomen dat zuurstof uit de omgeving wordt toegevoegd aan optredende vonken. Het diëlektricum bevat brandvertragers waardoor een vlammpunt van 102°C bereikt wordt. Toch kan bij een onvoldoende hoog diëlektricumniveau, deze temperatuur lokaal overschreden worden waardoor de vloeistof gaat ontbranden. Het diëlektricum dat gebruikt wordt, is weergegeven in Bijlage W (Total DIEL MS7000).

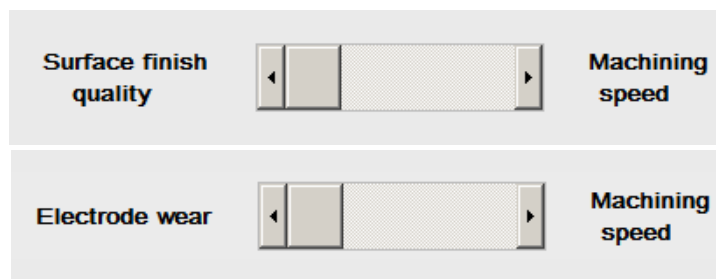
In een volgende stap worden alle waarden en eisen ingegeven zodat de machine een gepaste vonktechnologie kan berekenen. De fabrikant laat niet toe om zelf een nieuwe technologie te ontwikkelen. Dit omdat de twee hoofdparameters stroom en pulsduur slechts volgens bepaalde combinaties voorkomen. De reden hiervoor is dat sommige combinaties fataal kunnen zijn, de generator wordt hierbij opgeblazen door overvloedige hitteproductie. Daarom zal een bestaande technologie, aanwezig op de machine, worden aangepast om een vonktechnologie voor CFRP te ontwikkelen. Alle parameterwaarden in een technologie zijn aanpasbaar behalve de stroom-pulsduur combinatie. De verschillende eisen en waarden worden ingevuld. Eerst wordt gekozen welke elektrode-werkstukcombinatie er gebruikt wordt. Hoofdstuk 2 geeft weer dat een koperelektrode de beste resultaten levert op gebied van materiaalafnameratio en elektrodeslijtage. Dit is de reden waarom de testen zullen gestart worden met een koperelektrode. Tabel 10 geeft de mogelijke elektrode-werkstuk combinaties waarvoor de machine een vonktechnologie kan berekenen.

Elektrode	Werkstuk	Elektrode	Werkstuk	Elektrode	Werkstuk
koper	staal	grafiet	messing	grafiet	titanium
fijn grafiet	staal	grafiet	aluminium	koper	koper
medium grafiet	staal	koper wolfraam	carbide	koper	keramiek
grof grafiet	staal	koper wolfraam	staal	grafiet	keramiek
koper	aluminium	staal	staal		

Tabel 10: Mogelijke elektrode-werkstukcombinaties Roboform 350γ

Elke combinatie bevat een lange lijst parameters waaruit de machine een bepaalde set kan selecteren. Deze selectie gebeurt op basis van wat vervolgens wordt ingesteld, te beginnen bij de gewenste oppervlaktekwaliteit. Dit is een CH waarde (eigen aan de fabrikant) die overeenstemt met een Ra waarde (Bijlage V). Dan wordt de gewenste bewerkingsdiepte ingegeven. Voor de experimentele testen bedraagt deze steeds 1 mm omdat er dan meerdere prepreg lagen zullen doorgevonkt worden. Hierdoor heeft lokale variatie van één laag weinig invloed. Hoe dieper de bewerkingsdiepte hoe kleiner de variatie tussen onderling dezelfde testen. Toch

wordt de diepte steeds op 1 mm gehouden om langdurige testen te vermijden. In een volgende stap wordt de frontale elektrodeoppervlakte ingegeven. Bij een cilindrische elektrode wordt de diameter ingevuld waaruit automatisch de frontale oppervlakte wordt berekend. Voor de testen wordt een koperelektrode met diameter 10 mm gebruikt, om een voldoende groot bewerkt oppervlak te verkrijgen waarop materiaalkundig onderzoek kan verricht worden. Deze diameter heeft eveneens meer industriële toepasbaarheid dan bv. \emptyset 1 mm. CFRP wordt vooral in de transportsector gebruikt. Veelvoorkomende bouten en pennen in deze sector bevinden zich in de buurt van M10. Hierdoor kan de elektrode gebruikt worden voor gaten in het CFRP te maken. Vervolgens wordt de uitkraaglenkte van de elektrode ingegeven. Hierbij wordt er nagegaan of deze lengte steeds groter is dan de bewerkingsdiepte. Spoeling via de z-as of afkomstig van andere kanalen kan worden ingeschakeld. De te gebruiken elektrode wordt niet voorzien van een spoelkanaal en ook zijspoeling wordt niet gebruikt. Dit laatste om te vermijden dat de vonkboog naar één richting afbuigt. Extra spoeling wordt niet gebruikt omdat er vanuit wordt gegaan dat er drie factoren zijn die op voldoende wijze zullen zorgen voor het wegspoelen van materiaal: Dit is de werveling in de vloeistofbak van het diëlektricum die door middel van een pomp constant wordt aan-en afgevoerd. Deze circulatie is nodig voor het wegfilteren van materiaaldeeltjes. Daarnaast wordt een toerental van 10 rpm voor de elektrode ingesteld, deze rotatie zal zorgen voor een betere spoeling. Het toerental wordt relatief traag gekozen om de vonkboog van maximum 200 μ s niet te beïnvloeden. Een derde factor is de pulsatie van de z-as, deze kan worden ingesteld waardoor tussen elektrode en werkstuk een betere spoeling ontstaat. Uiteindelijk, alvorens een vonktechnologie berekend wordt, moet beslist worden waarop de machine de nadruk legt. Dit is steeds een afweging tussen machinesnelheid, elektrodeslijtage en oppervlaktekwaliteit, zie Figuur 21.



Figuur 21: Bewerkingsvoorkeur

Als alle vereisten zijn ingevuld wordt een vonktechnologie berekend. Ook het aantal bewerkingspassen wordt berekend om de gewenste oppervlaktekwaliteit te verkrijgen. De technologie kan worden geraadpleegd in tabelvorm waarbij elke rij overeenkomt met de reeks parameters geldig voor een bepaalde bewerkingspas. Stel alle bovenvermelde waarden worden ingegeven. Koper-staal als werkstuk combinatie, een ruwheid van CH 24 (\approx Ra 1,62), en steeds de nadruk op maximale bewerkingsnelheid. Dan wordt de technologie berekend uit Bijlage X. Hierbij wordt opgemerkt dat zes bewerkingspassen nodig zijn om de gewenste nauwkeurigheid te verkrijgen.

	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
[P]	4.5	5	5.5	6	7	8	9	10
	11	13	15	17	25	33	49	65
	97	129						

Parameter	Min [μ s]	Max [μ s]	Step value
A	0.2	3200	0.2

Figuur 22: Machinebereik voor stroomsterkte aangeduid door P [A] en pulsduur aangeduid door A [μ s] [18]

Om zelf een technologie voor CFRP te genereren met specifieke stroomsterkte en pulsduur wordt als volgt tewerk gegaan: Eerst wordt gekeken of de waarden van deze twee parameters voldoen aan het bereik van de machine, zie Figuur 22. De maximale stroomsterkte die de machine kan leveren bedraagt 65 A. Om 129 A te kunnen instellen dient een extra generatorunit te worden voorzien. Dan wordt gezocht naar een stroom-pulsduurcombinatie die bestaat en in de buurt van de gewenste waarden ligt. Deze combinatie kan worden gevonden in de technologietabellen bijhorende bij elke elektrode-werkstuk combinatie. Na het vinden van deze elektrode-werkstuk combinatie wordt deze ingesteld zodanig dat de stroom-pulsduurcombinatie hieruit geselecteerd kan worden. De elektrode-werkstuk combinatie wordt ingegeven samen met de bewerkingsdiepte voor het CFRP. De andere waarden zoals ruwheid en spoeling zijn van weinig belang omdat heel de berekende technologie voor het CFRP kan worden aangepast (behalve de stroom-pulsduurcombinatie). Zo wordt voor de experimenten slechts één bewerkingspas gebruikt, om het effect van elke set parameters duidelijk te kunnen onderzoeken.

Bovenstaande alinea wordt verduidelijkt met een voorbeeld: Men wil CFRP bewerken met een zelf opgestelde vonktechnologie, dan moet eerst bepaald worden welke stroom-pulsduur combinatie gebruikt kan worden. Als waarden hiervoor gaat de voorkeur uit naar 60 A en 5 μ s. Dan wordt in de tabel voor de combinatie koper-keramiek 65 A en 6,4 μ s als meest benaderende waarden gevonden. Vervolgens worden alle waarden en eisen ingesteld waarna de vonktechnologie berekend wordt. Deze technologie en additionele bewerkingspassen worden verwijderd. In de technologietabel voor koper-keramiek wordt de combinatie 65 A – 6,4 μ s geselecteerd.

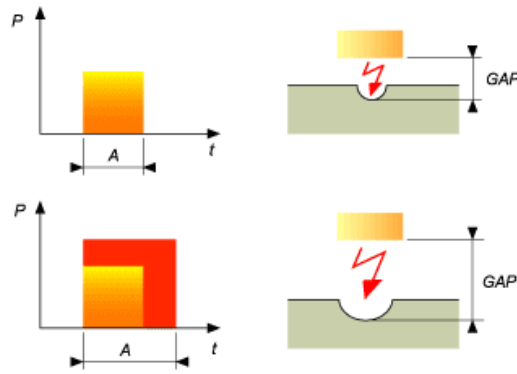
Tabel 11 geeft hiervoor alle parameters en parameterwaarden weer. Alle waarden behalve deze in het grijs (stroom en pulsduur) kunnen manueel worden aangepast. De parameters in het groen hebben te maken met het pulseren van de z-as. De betekenis van de belangrijkste parameters wordt kort toegelicht in volgorde van relevantie. Zoals eerder vermeldt zijn de stroom en pulsduur de hoofdparameters, hoe groter deze waarden, hoe groter de inbranding en hoe groter de vonkspleet (Figuur 23). 'M' bepaald de generatormode die de machine gebruikt, elke mode heeft

een andere pulsform en servo-controle procedure voor het behouden van de vonkspleet. Voor het vonken van CFRP wordt mode 1 gebruikt, deze bepaalt een klassieke vierkante pulsform en wordt eerder gebruikt voor ruwoperaties (Bijlage Y). Enkel met deze mode kan een maximale MRR voor een materiaal bepaald worden.

#	E	Engage Mode	Lchg [mm]	[mn]	Flush
1	325	1	0 B	0	OFF
Flush (M70)	[rpm]	P[A]	A [µs]	B [µs]	SV [%]
0	10	65	6,4	100	60
R [s]	U [s]	VPULS [mm/mn]	M	C	V [V]
0,1	1	3600	10	26	-80
RF [V]	Pilot Expert	EXTRA NPULSN	EXTRA NPULSE	EXTRA R [s]	EXTRA VPULS [mm/mn]
0	OFF	10	1	0,2	3600
MICRO U [s]	MICRO R [mm]	MICRO VPULS [mm/mn]	Techno		
0	0,1	1800	SCUECC_BC 33		

Tabel 11: Technologietabel voor koper-keramiek

Dan is er de generatorspanning V, deze kan vier discrete waarden aannemen: 80, 120, 160 en 200 V. Indien een minteken wordt toegevoegd wordt de elektrode negatief gepolariseerd. Vervolgens zijn er de secundaire parameters. De pulsintervaltijd B welke een bereik van 0,4 tot 3200 µs heeft. R, U en Vpuls bepalen de pulsatietijd dat de elektrode van het werkstuk weg wordt bewogen (in z-richting) en met welke snelheid. RF stelt de referentiespanning voor, te vergelijken met de brandspanning in Figuur 4. Het zorgt ervoor dat de ontladingspanning zo goed mogelijk benaderd wordt om een stabiel proces te garanderen. Als laatste secundaire parameter is er SV, deze wordt de servo parameter genoemd. Dit is de druk dat de elektrode op het werkstuk uitoefent, de afstand tussen beiden. In Bijlage Z is er een overzichtelijke beschrijving van alle parameters. Wanneer de parameters gewijzigd zijn naar de gewenste waarden kan worden overgegaan tot de uitvoering van het proces. De machine compileert een ISO-code op basis van de ingegeven gegevens. Deze code zal de verschillende drives aansturen waardoor de bewerking wordt uitgevoerd.



Figuur 23: Invloed van stroom en pulsduur [18]

3.1.2 Machine mogelijkheden

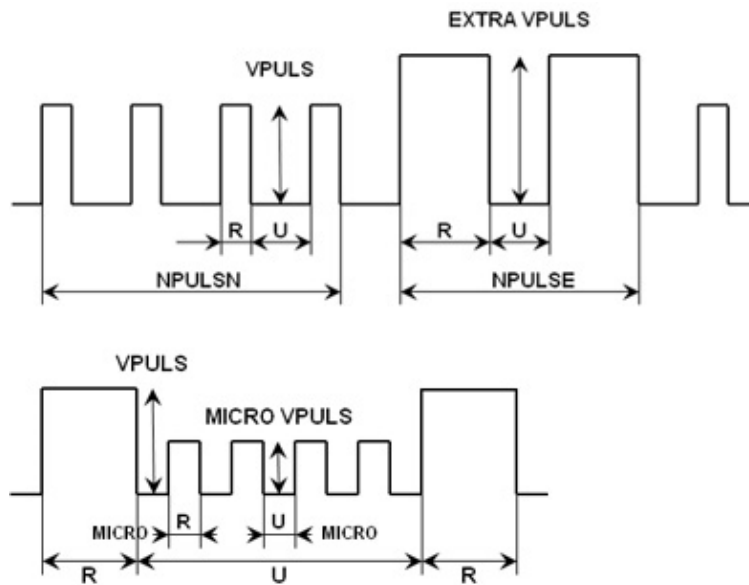
De machine beschikt over enkele functionaliteiten die het vonken van CFRP efficiënter kunnen laten verlopen. Zo is er de mogelijkheid om 'pilot expert' in te schakelen, deze optie laat toe om parameters continu te regelen. Hierbij zullen de machineparameterwaarden automatisch aanpassen om steeds een optimaal proces te verkrijgen (Tabel 12). In de testfase van een nieuw materiaal kan deze functie gebruikt worden. Dan kan de invloed van parameters worden nagegaan waarbij geen rekening moet gehouden worden met diegene uit pilot expert.

Pilot Expert	Beschrijving
OFF	B, R, U, RF en SV nemen de waarden uit de technologietabel aan
II	B, R, U, RF en SV worden geoptimaliseerd in functie van machine efficiëntie
III	B, R en U worden geoptimaliseerd in functie van machine efficiëntie
IV	B, R en U worden automatisch aangepast in functie van de bewerkingsdiepte

Tabel 12: Pilot expert functionaliteit

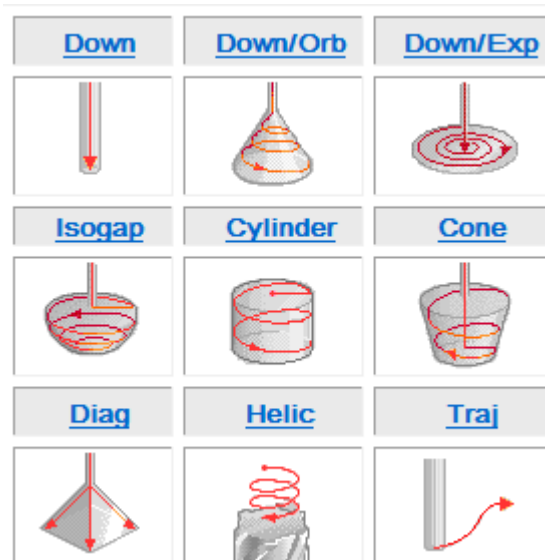
Het is eveneens mogelijk om tijdens het vonkproces de parameters manueel aan te passen, dit is voor elke waarde mogelijk behalve voor stroom en pulsduur. Deze kunnen tijdens het proces gewijzigd worden door een andere E-waarde in te geven. Hierbij zal de combinatie stroom-pulsduur wijzigen naar onbekende waarden. Afhankelijk van de gekozen E-waarde wordt deze combinatie hoger of lager energetisch.

Om spaandeeltjes efficiënter af te voeren kan de elektrode volgens de z-as worden gepulseerd. Dit zorgt voor een betere spoeling. Er kan optioneel extra en micro pulsatie worden gebruikt (Figuur 24) wat zorgt voor een meer geavanceerd pulspatroon waarbij de elektrodeslijtage verminderd kan worden.



Figuur 24: Extra-en micro pulsatie [18]

De machine beschikt over negen verschillende strategieën om een volume te bewerken. Om uitgangsgrootheden zoals MRR te verhogen kunnen verschillende bewerkingsstrategieën gebruikt worden (Figuur 25). Zo kan in een eerste stap de elektrode recht naar beneden bewegen met hoog energetische parameters. Hierbij wordt een groot volume afgenomen in een korte tijdspanne wat zorgt voor een ruw oppervlak. Om vervolgens het oppervlak te verfijnen kan de elektrode spiraalvormig naar beneden bewegen met laag energetische parameters. Het resterende materiaal wordt traag afgenomen met een fijne afwerkingsgraad. Uiteindelijk kan deze laatste operatie sneller verlopen dan de eerste omdat slechts weinig resterend materiaal dient worden afgenomen.

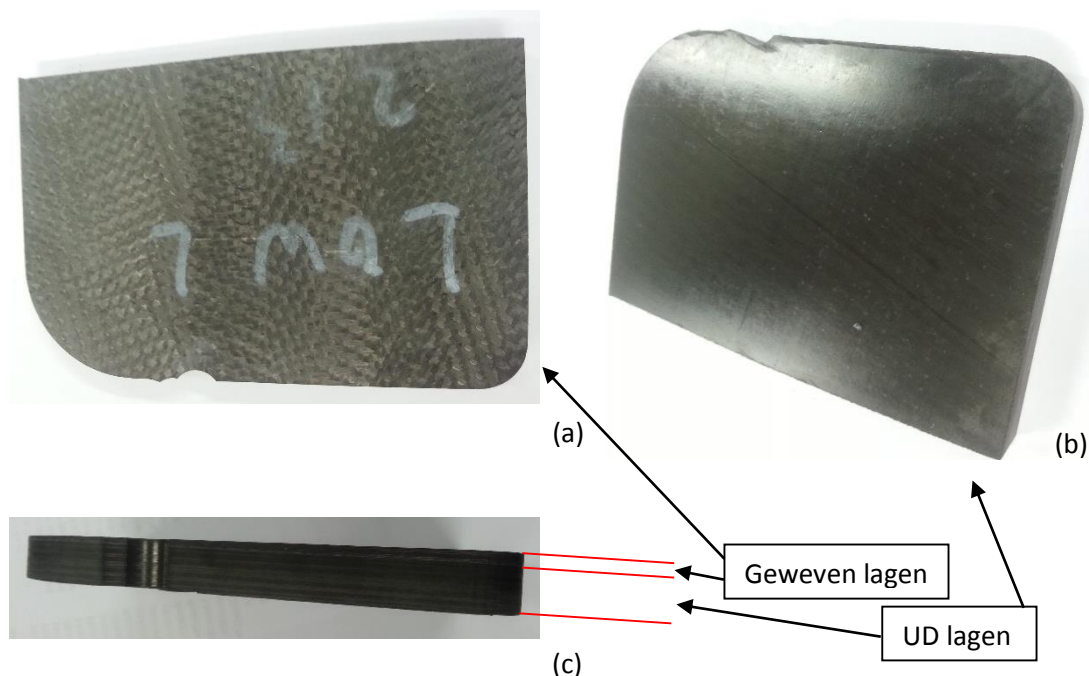


Figuur 25: Bewerkingsstrategieën [18]

3.2 Testopstelling

3.2.1 Elektrische weerstand CFRP

In 2.2 Koolstofvezel versterkte kunststof, wordt het gebruikte CFRP aangehaald. Dit wordt visueel weergegeven in Figuur 26. Op Figuur 26 (a) worden de geweven lagen weergegeven, deze structuur varieert in dikte vanaf ± 4 mm voor verschillende onderdelen. In het oorspronkelijk geleverde materiaal wordt deze structuur bedekt met een niet geleidende harslaag (niet zichtbaar op figuur). Deze wordt weggeschuurd waardoor de geweven structuur aan het oppervlak komt. Hierdoor wordt een geleidend oppervlak verkregen dat bewerkbaar is d.m.v. EDM. Figuur 26 (b) geeft de onderkant van het materiaal weer waar de UD lagen zichtbaar zijn. Op de doorsnede, Figuur 26 (c) is een subtiel verschil waar te nemen tussen beide lagen. Alvorens te beginnen met een testopstelling wordt de weerstand van het materiaal nagegaan. Dit omdat het composiet uit twee verschillende structuren bestaat. Indien een bepaalde structuur slecht geleidt dan dient de testopstelling



Figuur 26: Gebruikt CFRP (a) bovenste geweven lagen (b) onderste geweven lagen (c) doorsnede

hiermee rekening te houden. Zo moet het elektrisch contact tussen machinetafel en het te bewerken oppervlak steeds optimaal zijn. Voor een goede reproduceerbaarheid van de weerstandsmetingen worden telkens vijf metingen uitgevoerd. Hierbij worden twee meettoestellen gebruikt om de invloed van ijking hiervan te verkleinen. In Bijlage AA worden de metingen weergegeven, Tabel 13 geeft de gemiddelde waarde van de resultaten weer. Hierbij wordt opgemerkt dat het composiet in doorsnederichting beter geleidt dan in het vlak wat verklaard kan worden vanuit het productieproces. Na het stapelen van de prepregs werkt in de autoclaaf een vacuüm op de verschillende lagen. Dit zorgt voor een compacte stapeling waardoor een nauw contact tussen de lagen in doorsnederichting ontstaat. Volgens de vezelrichting is het

vacuüm eveneens aanwezig, hierbij is het materiaaloppervlak kleiner. Dit zorgt voor een kleinere stapelingskracht in deze richting met als gevolg een minder dichte stapeling. De geweven structuur heeft in elke richting een betere geleiding dan de UD structuur.

	Oppervlakmetingen [Ω]	Doorsnedemetingen [Ω]
Geweven structuur	27,57	11,81
UD structuur	37,75	24,25

Tabel 13: Weerstand CFRP

De gemeten weerstandswaarden zijn enkel bruikbaar om de weerstand van de geweven en UD structuur met elkaar te vergelijken. Bovenstaande meetinstrumenten maken gebruik van de wet van Ohm ($R = U/I$). Tussen de meetprobes wordt een bekende spanning U aangelegd waarna de stroom gemeten wordt. Deze meetmethode zorgt ervoor dat de gemeten waarden eerder afkomstig zijn van de overgangsweerstand op de meetprobes dan van het materiaal zelf.

Daarom wordt in een volgende meetfase de Van der Pauwmethode toegepast [19]. Hierbij wordt gebruik gemaakt van vier contacten. Door twee van deze contacten wordt een bekende stroom gestuurd, op de twee andere contacten wordt de overeenkomstige spanning gemeten. Door gebruik te maken van extra contacten voor de spanningsmeting zal bijna geen stroom door deze contacten vloeien, hierdoor zal de contactweerstand klein zijn. Er wordt een sample van $50,06 \times 10,76 \times 4,71$ mm ($l = 50,06$ mm; $A = 50,78$ mm²) vervaardigd. Dit sample wordt verkregen via draadvonken. Het proces verloopt moeizaam omdat de gebruikte draadvonkmachine eveneens niet beschikt over een technologie voor CFRP. Via de wet van Pouillet ($R = \rho l/A$) kan de soortelijke weerstand ρ bepaald worden. Deze waarde drukt de weerstand uit in Ohm.cm, zo kan het CFRP vergeleken worden met soortgelijke composieten uit de literatuur. Er worden drie metingen uitgevoerd. Hieronder de gemeten resultaten en de overeenkomstige soortelijke weerstanden (Tabel 14).

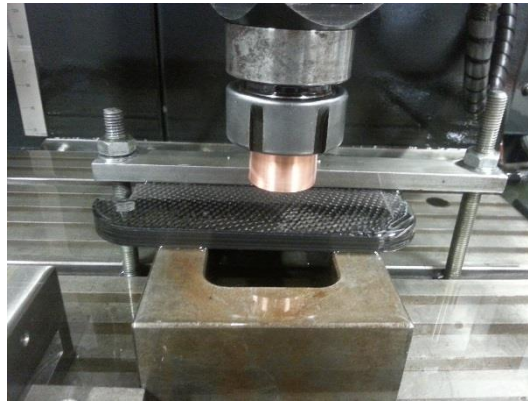
Meting nr.	Stroom [A]	R [Ω]	ρ [Ω cm]
1	10 A	0,14980	0,015
2	10 A	0,07336	0,007
3	20 A	0,08619	0,009

Tabel 14: Weerstandsmetingen en overeenkomstige soortelijke weerstanden

Grote verschillen worden opgemerkt afhankelijk waar de meetprobes op het CFRP worden geplaatst. Dit probleem ontstaat mogelijk indien een probe lokaal contact maakt met het matrixmateriaal. Er kan worden opgemerkt dat de resultaten orde 10^{-4} onder de nodige 100Ω cm liggen. Deze bovengrens wordt voor geleidende technische keramieken in [1], [2] bepaald. Materialen met hogere weerstand zijn niet vonkbaar.

3.2.2 Experimentele testopstelling

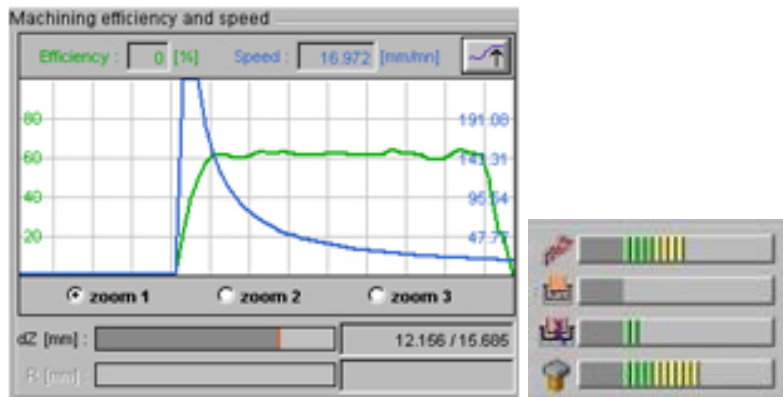
In vorige paragraaf wordt waargenomen dat de geweven lagen een minder hoge weerstand dan de UD lagen bezitten. Daarom wordt er in de testopstelling een bovenbeugel voorzien (Figuur 27), om te vermijden dat het elektrisch contact met machinetafel enkel via de UD structuur gebeurt. Deze beugel zorgt eveneens voor de opspanning van het werkstuk.



Figuur 27: Inleidende experimentele testopstelling

Om de vonkbaarheid na te gaan wordt gestart met een grote elektrode, deze heeft een diameter van 30 mm en een centraal spoelkanaal met diameter 3 mm. Het zorgt voor een robuust proces waardoor een groter parameterbereik een gunstig resultaat kan bereiken. De foutieve keuze van één parameter zal minder invloed hebben dan die bij een kleinere elektrode. De technologie voor koper-staal wordt berekend te beginnen met 4 A – 100 μ s als hoofdparameters. Andere parameters worden tijdens het proces manueel gewijzigd. Vonkbogen worden doorheen het diëlektricum waargenomen, deze worden intenser bij het verhogen van de E-waarde (hoeveelheid toegevoerde energie). De stabiliteit van het proces kan worden geoptimaliseerd door overige parameters zoals de pulsintervaltijd en SV te verfijnen.

De stabiliteit en efficiëntie van het proces wordt door de machine op enkele manieren uitgedrukt. Zo wordt continu een curve geplotted die de snelheid en efficiëntie weergeeft, zie Figuur 28. De blauwe kromme geeft de bewerkingssnelheid in z-richting in mm/min weer, terwijl de groene een maat is voor de stabiliteit van het proces, uitgedrukt in procent. Deze stabiliteit wordt eveneens weergegeven rechtsonder op Figuur 28. Deze weergave wordt uitgedrukt in groene, gele en rode blokvormen waarbij de rode dienen vermeden te worden. De overige drie pictogrammen gebruiken dezelfde weergave. De eerste geeft het aantal abnormale of slechte vonken tot het totaal aantal vonken weer. De tweede is een maat voor het aantal gecontamineerde vonken. De derde pictogram is een maat voor het aantal kortsluitingen. Op basis van deze gegevens samen met de observatie van het vonkproces kunnen de parameters worden geregeld. Er worden sporadisch testen uitgevoerd, telkens met andere technologie en andere parameterwaarden om een beter inzicht in het proces te verkrijgen.



Figuur 28: Machine efficiëntie en snelheid

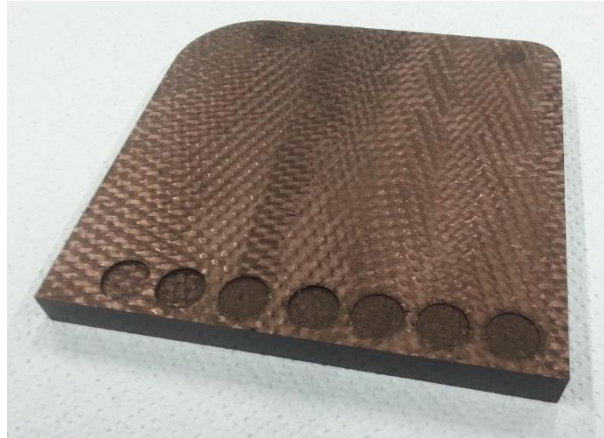
3.2.3 Inleidende testopstelling

Uit de experimentele testopstelling is het duidelijk dat het CFRP vonkbaar is. Hierdoor wordt overgegaan op een inleidende testopstelling. Zoals eerder aangehaald wordt hiervoor een koperelektrode diameter 10 mm gebruikt (p28 bovenaan). De bedoeling van deze opstelling is om na te gaan welk materiaalonderzoek en welke uitgangresponsen kunnen bepaald worden en of deze nuttig zijn. Deze gegevens worden later gebruikt voor het plannen van een gestructureerd testplan.

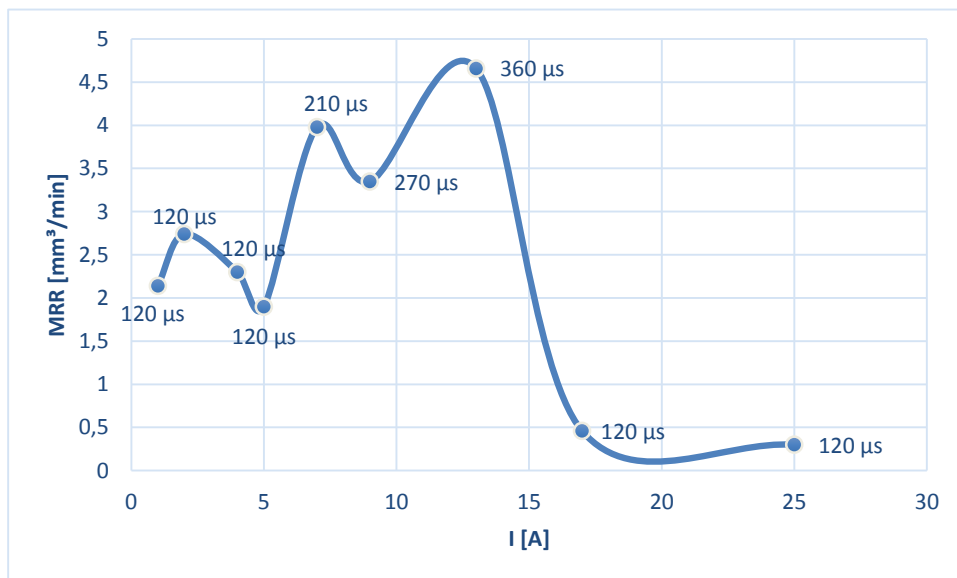
Er wordt een reeks testen uitgevoerd met parameters afkomstig uit de technologie voor koper-staal. Hierbij wordt de pulsduur steeds op 100 μ s ingesteld, deze waarde wordt gebruikt omdat deze voor goede resultaten zorgt in Hoofdstuk 2. De spanning wordt steeds op +200 V ingesteld (elektrode positief). Andere parameters worden gelijk gehouden zoals in de oorspronkelijke technologie. Om voor een goede spoeling te zorgen roteert de elektrode aan 10 rpm. De pulsintervaltijd wordt steeds ingesteld op 120 μ s. Bij sommige testen zal de machine een waarschuwing geven 'Buildup protection W1868'. Deze waarschuwing wordt gegenereerd omdat een volgende vonk reeds plaatsvindt alvorens de vorige vonkboog is uitgewerkt. Hierdoor wordt nauwelijks een plasmakanaal tussen elektrode en werkstuk gevormd, omdat een vonkboog niet te tijd heeft om volledig te ontladen op het werkstuk. Dit zorgt voor een instabiel proces waarbij slechts kleine hoeveelheden materiaal worden afgenomen. Als geen actie ondernomen wordt dan zal dit fenomeen toenemen. Uiteindelijk geeft de machine een error weer: 'Buildup E1937' waardoor de bewerking stopt. In de testen zal, wanneer de machine een waarschuwing geeft, de pulsintervaltijd met 10 μ s verhoogt worden. Dit wordt verdergezet tot de waarschuwing wegvalt, wat een goede manier is om een hoge bewerkingssnelheid te verkrijgen. De vonken komen achteréenvolgens na elkaar zonder al te grote tussenpauzes. Een nadeel van deze methode is dat de machine nauwlettend moet worden opgevolgd om onmiddellijk in te kunnen grijpen na een waarschuwing.

De stroom wordt gevarieerd over verschillende waarden, wat voor negen verschillende testen zorgt (1, 2, 4, 5, 7, 9, 13, 17, 25 [A]). De eerste zeven testen verlopen succesvol, de laatste twee testen zorgen voor een instabiel verloop. Er

wordt nagenoeg geen materiaal afgenomen waardoor de test wordt afgebroken. Figuur 29 geeft de eerste zeven testen weer. Op te merken valt dat de rand en oppervlaktekwaliteit geen buitensporige resultaten opleveren. Figuur 30 geeft de MRR in functie van de stroom weer, de pulsintervaltijd staat naast de meetpunten weergegeven. De punten zijn verbonden door een vloeiende lijn ook al is de waarde tussen twee meetpunten niet gekend. De daling in MRR voor 4, 5 en 9 A zijn te verklaren door het niet tijdig aanpassen van de pulsintervaltijd. Hierdoor is het aangewezen om een andere methode te implementeren voor het optimaliseren van de pulsintervaltijd, om meer consistente resultaten te verkrijgen.



Figuur 29: Resultaat eerste zeven testen



Figuur 30: MRR in functie van de stroom

Na elke test is de elektrode vervuild met weggesmolten materiaal. Om hiervan geen invloed te ondervinden in een volgende test wordt deze elke keer gereinigd, zie Figuur 31. Naast MRR kan EWR eveneens worden bepaald, wat niet gedaan wordt omdat deze slijtage visueel niet zichtbaar is. Voor een goede bepaling van EWR dienen de bewerkingen dieper dan 1 mm worden uitgevoerd. Een ander fysische uitgangsgrootheid is het opmeten van de oppervlakteruwheid. Dit zal in de experimentele testfase worden toegepast.



Figuur 31: Vervuilde elektrode (links) gereinigde elektrode (rechts)

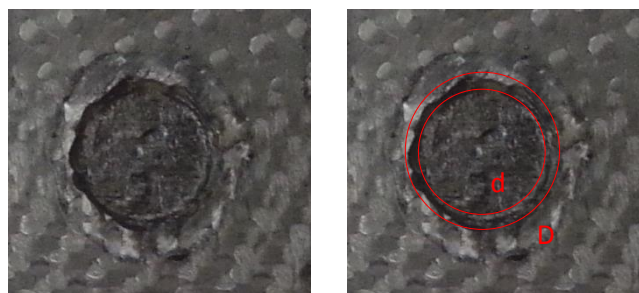
Naast de fysische uitgangsgrootheden wordt een materiaalonderzoek gestart. De doorsnedes worden microscopisch geëvalueerd, Bijlage BB geeft deze analyse weer. De zwarte pijlen geven de bewerkingsrichting van de elektrode weer. Linksonder elke figuur kan de schaal worden teruggevonden. De verschillende vezellagen kunnen zichtbaar onderscheiden worden. Wanneer deze parallel met het vlak verlopen zijn continue witte vezelbundels zichtbaar. De vezellagen die loodrecht op het afbeeldingsvlak georiënteerd zijn worden weergegeven als opeengestapelde bollen. Deze bollen stellen de verschillende doorsnedes van een vezelbundel voor. Wanneer tussen bundels geen vezels zichtbaar zijn dan is dit het matrixmateriaal. Ook de invloed van het weven van vezels is zichtbaar, dit heeft als gevolg dat de vezelbundels eerder vloeiend dan kaarsrecht georiënteerd zijn. De UD lagen zijn niet zichtbaar op de figuren.

Er worden drie verschillende fenomenen aangeduid. Een eerste fenomeen is de warmte beïnvloede zone, deze wordt weergegeven door de rode pijlen. De zone varieert benaderend tussen 82 en 307 μm voor stroomsterkten van 1 tot 9 A. Hoe hoger de stroomsterkte hoe dieper de beïnvloede zone. Dan wordt een soort 'recast layer' opgemerkt, aangeduid met gele ovalen. Bij 1 A lijkt deze laag enkel voor te komen in de hoeken, aan de rand van het bewerkte oppervlak. Vanaf 2 A wordt deze zichtbaar langs het hele bewerkte oppervlak. Bij hogere stroomsterkten komt deze laag slechts sporadisch of helemaal niet voor. Een recast layer vormt een laag aan het werkstukoppervlak welke bestaat uit gesmolten vezelbundels en een goede verbinding vormt met onderliggend materiaal. De veel voorkomende laag aangeduid met gele ovalen bevat geen vezels, wat zichtbaar is aan de lichte kleur van de laag. Verdere testen geven aan dat deze laag niet voorkomt indien de samples goed ontvet worden. Dit alvorens deze samples te omgeven met inbedmateriaal om een microscopische analyse te kunnen uitvoeren. Hieruit kan besloten worden dat de laag aangeduid in het geel afkomstig is van achtergebleven diëlektricum op het werkstuk dat zich vermengt met inbedmateriaal. Hierdoor is het nodig om samples steeds grondig te ontvetten alvorens deze te gebruiken in een microscopische analyse. Als derde fenomeen wordt een vermoedelijke smeltlaag opgemerkt,

aangegeven met blauwe ovaal. In deze laag zijn korrelgrenzen zichtbaar, mogelijk ontstaan deze bij het stollen van het sample. Een EDX analyse kan meer uitsluitel geven over de samenstelling van de desbetreffende laag. Bij hogere stroomsterkte wordt opgemerkt dat niet gesmolten vezelbundels aanwezig zijn welke omgeven worden door de smeltlaag. Verder onderzoek dient dit fenomeen te verklaren.

Bijlage CC geeft meer verduidelijking. Hierbij zijn afbeeldingen van de doorsneden gemaakt met een SEM microscoop voor 2 en 5 A. De zwarte pijlen geven opnieuw de bewerkingsrichting van de elektrode aan. Bij de doorsnede van 2 A is de warmte beïnvloede zone duidelijk zichtbaar. De dichte stapeling tussen de vezels wordt verbroken, doordat smeltlagen zich losmaken van elkaar door de hevige wervelingen van het diëlektricum. Op de rechtse figuur in bijlage ontstaat hierdoor een lokale breuklijn. Bij het toevoegen van meer energie zal deze breuklijn zich voortplanten, vervolgens wordt het materiaal verwijderd door de spoeling. Bij de doorsnede van 5 A is de energie hoeveelheid een stuk hoger waardoor de temperatuur stijgt. De warmte beïnvloede zone neemt een andere gedaante aan, deze bestaat uit gestold materiaal waarin de vezels worden opgelost. De rechtse figuur in bijlage geeft een vergrootte weergave weer, deze laat zien dat er korrelgrenzen ontstaan in de gestolde laag. Bovenstaande vermoedens van optredende fenomenen en verschijnselen zijn slechts gebaseerd op visuele veronderstellingen en dienen worden aangetoond met een uitgebreider onderzoek.

Het sample van 5 A geeft een slechtere oppervlaktekwaliteit. Ook de kwaliteit van de werkstukrand wordt slechter bij het verhogen van de vonkenergie. Om verschillende testen met elkaar te kunnen vergelijken is het nodig om de randkwaliteit te kwantificeren. Hiervoor wordt de schadefactor S ingevoerd. Deze drukt de kwaliteit van de rand van het gat uit. Het is de verhouding van diameter d aan het bewerkte oppervlak tot de diameter D aan het werkstukoppervlak. Hierbij is D de diameter van de omgeschreven cirkel terwijl d de diameter van de ingeschreven cirkel voorstelt (Figuur 32).



Figuur 32: Schadefactor $S = d/D$

3.3 Toepassingen

Het vonken van CFRP zou op industriële schaal kunnen toegepast worden wanneer twee voorwaarden voldaan zijn: De bewerkingsnelheid moet voldoende vlot

verlopen voor een rendabel resultaat, en de oppervlaktekwaliteit en andere schademechanismen dienen beperkt te blijven. In een volgende test wordt de MRR bepaald om deze te kunnen vergelijken met Tabel 10: Vergelijking MRR tussen verschillende papers. Dit door de parameters zoveel mogelijk te laten overeenstemmen met [10]. Als resultaat van deze test zijn er 116 minuten nodig om 1 mm diep te bewerken met een elektrode diameter 10 mm, wat overeen komt met een MRR van $0,68 \text{ mm}^3/\text{min}$ of een MAS van $0,009 \text{ mm}^3/\text{min}$. Deze waarde is lager dan alle papers uit Hoofdstuk 2. Hiervoor zijn er enkele verklaringen, de meest belangrijke oorzaak is het verschil in geleidbaarheid, deze van [10] is bijna 10 keer hoger dan het testmateriaal. Ook de verschillende opbouw en structuur van het composiet uit de papers hebben een sterke invloed. Daarnaast kunnen de parameters niet exact worden overgenomen door de machine. De combinatie 1 A – 120 μs en een spanning van 100 V bestaat niet, in plaatst daarvan worden 1 A – 100 μs en 80 V gebruikt. Dan zijn er enkele parameters zoals SV, R, U ... die in [10] niet vermeldt worden.

De gevonden MRR is aan de lage kant en niet echt bruikbaar in een industriële toepassing. Dit in vergelijking met staal waarbij de MRR gemiddeld $8 \text{ mm}^3/\text{min}$ bedraagt voor $R_a \approx 1,6 \mu\text{m}$ (elektrode $\varnothing = 10 \text{ mm}$). Door creatief te zijn met de verschillende technologieën waarover de machine bezit worden toch hogere MRR's waargenomen. Zo beschikt de machine over technologie voor het bewerken van slecht geleidende keramieken met een koperelektrode (Bijlage DD). Hierbij wordt een negatieve spanning van -80 V gebruikt (elektrode negatief). Dit in tegenstelling tot metalen waarbij het gebruik van een negatieve elektrode eerder uitzondering is. De hoogst mogelijke stroom van 65 A wordt ingesteld in combinatie met een zeer korte pulsduur, 6,4 μs . Andere parameters worden ingesteld zoals in de technologie voor keramieken. Extra bewerkingspassen voor finisseren worden verwijderd, zie grijze cellen in Bijlage AA. De test heeft een tijdsduur van 6 min 46 s om 1 mm diep te bewerken waardoor een MRR van $11,2 \text{ mm}^3/\text{min}$ verkregen wordt. Hieruit kan besloten worden dat er potentiële mogelijkheden zitten in het vonken van CFRP, dit voorafgegaan aan een grondige testfase. De oppervlaktekwaliteit van de test is onbruikbaar in een nauwkeurige toepassing. Testen moeten uitwijzen of er een technologie bestaat die een aannemelijke oppervlakte en randkwaliteit garandeert, waarbij de MRR voldoende hoog is.

Een onderdeel uit CFRP dient meestal maar gering worden nabewerkt omdat de mal waarin het CFRP gelamineerd wordt de vorm benaderd van het eindproduct. De nabewerkingen bestaan vaak uit het maken van gaten of caviteiten. Deze worden niet in de mal opgenomen omdat deze het lamineren bemoeilijken. Zo kunnen de boutgaten in de autovelg op Figuur 36 met EDM worden uitgevonkt. Een voordeel hiervan is dat dat de schademechanismen bij conventioneel boren of frezen niet optreden. Figuur 34 geeft een voorbeeld van delaminatie aan de boven en onderkant van het gat bij boren. De figuur ernaast geeft een gevonkt gat weer. Dit gat werd uitgevonkt met de parameters zoals de test bij 1 A in vorige paragraaf. Optimalisatie met betrekking tot een betere MRR is nodig. Toch kan opgemerkt worden dat geen delaminatie of bramen zichtbaar zijn. Voor een technische toepassing biedt dit heel

wat voordelen. De nauwkeurigheid van het onderdeel komt niet in gedrang, alsook de kans op scheurvorming door delaminatie verkleint. Daarnaast maakt EDM het mogelijk om vormen te bewerken die niet verkregen kunnen worden met conventionele technieken. Een voorbeeld hiervan is het bewerken van een caviteit met scherpe hoeken. Voor kleine en/of precisie onderdelen (Figuur 35) wordt vaak een contouroperatie gebruikt om de gewenste dimensionele nauwkeurigheid te verkrijgen. Al deze bewerkingen zouden uitgevoerd kunnen worden met EDM.



Figuur 34: Delaminatie van een geboord gat, bovenzijde boring (links), onderzijde boring (rechts)



Figuur 33: Gevonkt gat (onderzijde)



Figuur 35: Precisie onderdelen uit CFRP [34]



Figuur 36: Velg uit CFRP [33]

3.4 Besluit

De doorgronding van de machine maakt duidelijk welke additionele functionaliteiten het onderzoek kunnen helpen. Om consistente resultaten te verkrijgen is het wenselijk om enkele parameters uit te sluiten. Daarom zullen in verdere testen parameters zoals pulsintervaltijd, pulsatie, RF en SV automatisch worden geregeld door gebruik te maken van 'pilot expert II'.

De weerstandsmetingen bepalen dat UD lagen een hogere weerstand bezitten dan de geweven lagen. Om geen invloed van hogere weerstand van de UD lagen te ondervinden tijdens het vonken, wordt het werkstuk steeds met een bovenbeugel ingespannen. Hierdoor omvat het elektrisch gesloten circuit enkel het te onderzoeken geweven materiaal. De weerstandsmetingen volgens de Van der Pauwmethode [19] bepalen een gemiddelde weerstand van $0,01 \Omega\text{cm}$. Dit resultaat is orde 10^{-4} onder de nodige $100 \Omega\text{cm}$. Deze bovengrens wordt voor geleidende technische keramieken in [1], [2] bepaald. Materialen met hogere weerstand zijn niet vonkbaar.

Inleidende experimentele testen bepalen dat het industriële CFRP vonkbaar is. Een eerste materiaalonderzoek geeft weer dat de diepte van de warmte beïnvloede zone stijgt met toenemende stroom. Zo zorgen hogere stromen eveneens voor een hogere MRR. Dit verschijnsel wordt waargenomen t.e.m. 13 A, na deze waarde ondergaat de MRR een drastische daling. Verder onderzoek dient eveneens rekening te houden met de pulsduur, door het inleidend karakter van dit hoofdstuk wordt de invloed hiervan nog niet nagegaan. Microscopische figuren geven een betere indruk over het verschil tussen verschillende parameterinstellingen. Toch is meer info nodig om optredende materiaalkundige verschijnselen te kunnen verklaren. Een uitgebreider onderzoek waarbij SEM figuren van het werkstukoppervlak worden gemaakt kunnen hierbij helpen. Dit aangevuld met een spaananalyse om veronderstellingen te staven. De verschillende materiaalzones op de microscopische figuren zijn niet altijd duidelijk, in verder onderzoek dienen EDX analyses worden uitgevoerd. De toestand en soort materiaal kan dan bepaald worden a.d.h.v. de vorm van de materiaalzone en bijkomende samenstellingsinformatie.

Verschiedende parameterinstellingen worden onderzocht met als doel een combinatie stroom-pulsduur te vinden die resulteert in een hoge MRR ($> 1 \text{ mm}^3/\text{min}$) of hoge MAS ($> 0,1 \text{ mm}/\text{min}$). Pulsduren hoger dan $200 \mu\text{s}$ zorgen voor een instabiel proces waarbij bijna geen materiaal wordt afgenomen. Dit wordt proefondervindelijk waargenomen (geen resultaten vermeld). Vervolgens wordt een technologie gevonden die een MRR van $11,2 \text{ mm}^3/\text{min}$ oplevert (MAS = $0,14 \text{ mm}^3/\text{min}$). Dit door het instellen van een hoge stroom (65 A) en lage pulsduur ($6,4 \mu\text{s}$). De randkwaliteit en oppervlaktekwaliteit van het bewerkt oppervlak bij dit sample zijn ondermaats. Verder onderzoek is nodig om een technologie te ontwikkelen die zowel een aanvaardbare snelheid als goede werkstuknauwkeurigheid verzekert. Daarom moet een stelselmatig testplan worden opgesteld dat het volledige bereik van de machine integreert, waarbij de hoofdparameters zoveel mogelijk variëren.

Hoofdstuk 4: Experimenteel onderzoek

Dit hoofdstuk vormt het zwaartepunt van deze thesis. Na een proefondervindelijke aanpak en inleidende testen wordt overgegaan op een structurele testfase. Het doel van deze testfase is vooral gericht op het onderzoek naar materiaalkundige fenomenen (materiaalafnamemechanismen) die plaatsvinden bij het vonken van CFRP. Zo'n fenomeen kan vaak pas waargenomen worden wanneer verschillende samples onderling vergeleken worden. Naast het materiaalkundig gedeelte geven deze testen een goede kijk op fysische uitgangsgrootheden zoals MRR en oppervlakteruwheid. De testen worden over het hele nuttige hoofdparameterbereik van de machine gevarieerd. Hieruit kan een geschikte vonktechnologie worden gevonden in functie van een uitgangsgrootheid (max. MRR of min. Ra). Naast het variëren van hoofdparameters worden de invloed van polarisatie en elektrodemateriaal nagegaan. Tot slot zullen de pulsen worden geëvalueerd met pulsmonitoring, om na te gaan hoe goed de ingestelde stroom overeenkomt met werkelijke waarden. Daarnaast wordt onderzocht of deze vormverschillen vertoont tussen verschillende instellingen.

4.1 Planning experimenteel onderzoek

De initiële bedoeling was om een DOE met twee levels per parameter te ontwerpen. De invloed van parameters op het vonkproces is moeilijk te voorspellen. Om een goed beeld van het proces te verkrijgen worden daarom meer dan twee levels per factor gebruikt. Dit in overeenkomst met het ontwikkelen van een nieuwe technologie. Hierbij zal de machinebouwer alle mogelijke levels per parameter uitproberen om hieruit de meest optimale technologie te bepalen. De verschillende resultaten worden achteraf statistisch verwerkt. Zo wordt bepaald of een parameter al dan niet significant is. Trends zullen weergegeven worden d.m.v. grafieken.

4.1.1 Parameterbereik

Met een Roboform 350 γ kan een groter machinebereik worden gebruikt dan voorgaand onderzoek uit Hoofdstuk 2. De waarden uit de literatuur bevinden zich tussen 0,5 - 10 A voor stroom en tussen 20 - 750 μ s voor pulsduur. Dit omdat geen

groter bereik kan ingesteld worden. Hogere stroomsterkten kunnen zorgen voor een slechte oppervlakte kwaliteit en hoge elektrode slijtage. Toch dienen deze stromen worden getest. Deze kunnen in combinatie met erg lage pulsduur een gunstig effect hebben, wat wordt waargenomen tijdens de proefondervindelijke testen (Hoofdstuk 3.3 Toepassingen). Een hoge stroom van 65 A en lage pulsduur, 6,4 μs zorgde er voor een hoge MRR (11,2 mm^2/min). Vervolgens worden tijdens de inleidende testfase de invloed van hoge pulsduren bij verschillende stromen nagegaan. Pulsduren hoger dan 200 μs zorgen voor een instabiel proces waarbij bijna geen materiaal wordt afgenomen. Uit deze vaststellingen wordt het bereik van de initiële testen gevarieerd tussen 1 – 65 A voor stroom en 5 – 200 μs voor pulsduur.

Naast het interval van de hoofdparameters dient de stapgrootte en aantal levels van deze parameters worden bepaald. Figuur 37 geeft het machinebereik weer, hieruit kunnen discrete waarden worden gekozen. Tabel 15 geeft de gewenste hoofdparameters weer. De meeste stromen worden in het interval van 1 – 11 A geselecteerd. Naar aanleiding van de literatuur worden in dit interval meer nuttige resultaten verwacht. Hogere stromen zouden voor te grote oppervlakteruwheid zorgen [11]. Tabel 15 zorgt voor het uitvoeren van 30 testen waarbij zes stroomsterkten worden ingesteld. Hierbij wordt bij elke stroomwaarde over dezelfde vijf pulsduren gevarieerd. Met deze testen wordt het bereik van de machine getest dat vermoedelijk resulteert in een stabiel vonkproces. Om deze parametercombinaties te kunnen gebruiken dienen deze beschikbaar te zijn in een bestaande technologie. Dit omwille van eerder aangegeven redenen (3.1.1 Machineparameters). De technologie van de machine is niet beschikbaar in een digitaal bestand en het is niet mogelijk om deze uit een Roboform te exporteren. De verschillende bestaande technologieën worden daarom manueel nagegaan, er wordt opzoek gegaan naar een parametercombinatie die de gewenste parameters uit Tabel 15 zo goed mogelijk benaderen. Tabel 16 geeft de resultaten hiervan weer, Bijlage EE geeft weer in welke technologie deze parameters kunnen gevonden worden. Er wordt opgemerkt dat twee testen niet kunnen uitgevoerd worden, omdat de twee parametercombinaties (1 A – 200 μs en 4 A – 200 μs) niet bestaan of benaderd kunnen worden.

	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
	4.5	5	5.5	6	7	8	9	10
[P]	11	13	15	17	25	33	49	65
	Parameter		Min [μs]	Max [μs]	Step value			
	A		0.2	3200	0.2			

Figuur 37: Machinebereik Roboform 350y, stroomsterkte aangeduid door P [A] en pulsduur aangeduid door A [μs] [18]

Stroom [A]	1	3	6	11	33	65
Pulsduur [μ s]	5					
	15					
	50					
	100					
	200					

Tabel 15: Gewenste parameters

Stroom [A]	1	4	7	13	33	65
Pulsduur [μ s]	6,4					
	12,8					
	50					
	100					
	200					

Tabel 16: Te gebruiken parameters

4.1.2 Polarisation en spanning

Om het aantal experimenten te beperken wordt de spanning en polarisation constant gehouden gedurende de 30 testen. Het grootste nadeel bij zinkvonken is de lage MRR ten opzichte van conventioneel bewerken. De spanning en polarisation worden daarom gekozen in functie van een zo hoog mogelijke MRR. De instellingen uit 3.3 Toepassingen (65 A en 6,4 μ s) zorgen bij een spanning van -80 V voor een bewerkingsduur van 6 min 46 s. Deze test wordt opnieuw uitgevoerd aan -120, -160 en -200 V. Het minteken geeft weer dat de elektrode negatief wordt gepolariseerd (deze tekenregel wordt in het verder verloop van deze thesis gebruikt). De resultaten worden weergegeven in Bijlage FF, deze geven weer dat de bewerkingstijd stijgt met toenemende spanning (spanning in absolute waarde). Anderzijds wordt visueel opgemerkt dat de oppervlaktekwaliteit verbeterd bij hogere spanning. Net zoals bij metalen, waarbij de machine een spanning van 200 V enkel gebruikt voor finisseer operaties.

Vervolgens wordt het effect van polariteit nagegaan. De test wordt herhaald bij 80 V, hiervoor zijn 30 min 3 s bewerkingstijd nodig. Deze bewerkingstijd is bijna vijf maal hoger dan dezelfde test aan -80 V. Uit deze resultaten blijkt dat de spanning voor de testfase steeds -80 V zal bedragen, de MRR is dan het hoogst mogelijk. Deze polariteitskeuze is het tegenovergestelde dan wat meestal gebruikt wordt bij het vonken van metalen. De elektrode wordt er positief gepolariseerd om steeds een lage oppervlakteruwheid te garanderen [20]. Bij vonkoverslag zullen ionen van positieve naar negatieve pool vloeien. De elektronen vloeien dan in de tegenovergestelde richting. Er ontstaat een geleidend plasma in de vonkspleet. De elektronen zijn lichter en sneller dan de ionen, hierdoor is het ionenbombardement op de kathode heviger en intenser dan op de anode. Zo ontstaat meer warmte waardoor het

kathodemateriaal zal afgenomen worden. Het anodemateriaal warmt minder op waardoor dit zorgt voor een beperkte elektrodeslijtage [20]. Voor het bewerken van keramieken wordt de omgekeerde polarisatie gebruikt. Dit in combinatie met hoge stroom en korte pulsduur. Het zorgt ervoor dat materiaal wordt afgenomen door thermische shock [21], terwijl metalen worden verdampt door toevoeging van warmte. Dit laatste werkt niet goed voor keramieken. De thermische shock kan voorgesteld worden door een lokaal zeer hoge verhitting van materiaal. Deze minuscule verhitting wordt gerealiseerd door de beweeglijke en snelle elektronen in het anodemateriaal. Het verhitte materiaaldeeltje zet kortstondig uit. Bij het opnieuw inkrimpen van dit deeltje zal het uit de materiaalstructuur worden verwijderd. Dit is mogelijk door de brosse materiaaleigenschappen van keramieken.

Op materiaalkundig niveau is de polariteitskeuze voor EDM van CFRP een moeilijke te voorspellen opdracht. Het bestaat zowel uit kunststof als koolstof. Van kunststof wordt verwacht dat het kan verdampt worden door toevoeging van warmte. Koolstofvezels kunnen beter bewerkt worden zoals keramieken, omdat het eveneens brosse materiaaleigenschappen bezit. De uiteindelijke keuze wordt gemaakt op basis van voorgaande testen in functie van maximale MRR (negatieve polarisatie). Mogelijk kan deze keuze niet optimaal zijn omdat de MRR anders kan reageren bij lagere stromen en hogere pulsduren.

4.1.3 Outputs

In Hoofdstuk 3 worden enkele testen gebruikt voor het bepalen van materiaalkundige fenomenen. Het besluit hierbij geeft aan dat er nood is aan enkele bijkomende testen zoals een EDX en spaanalyse. Om een zo compleet mogelijk onderzoek te verwezenlijken, worden onderstaande testen op de vonksamples gerealiseerd:

- Microscopisch evaluatie van de doorsnedes
- SEM evaluatie van de doorsnedes
- Bekijken van het bewerkt oppervlak met macrolens en SEM
- EDX analyse op doorsnedes en bewerkte oppervlakken
- Spaanalyse

Deze testen kunnen meer info verschaffen over het optredend materiaalafnamemechanisme. De microscopische evaluatie van doorsnedes zorgt voor heel wat informatie: Dikte van de warmte beïnvloede zone, eventuele recast layer en smeltzones. Ook de kwaliteit van de rand en oppervlakte zijn visueel waar te nemen. SEM figuren geven een andere kijk op materiaal waardoor deze eveneens gebruikt worden. Indien een bepaalde structuur optisch niet duidelijk is kan deze met een SEM microscoop wel worden weergegeven, daarnaast laat deze toe een EDX analyse uit te voeren. Een bewerkt oppervlak kan niet vlak worden gemaakt waardoor deze door een gewone microscoop moeilijk geanalyseerd kan worden. SEM beelden kunnen hier een oplossing voor bieden. Ook het visueel vergelijken van oppervlakken met een macrolens wordt toegepast om meer overzicht weer te geven. Ter afsluiting van het materiaalkundig onderzoek geeft een spaanalyse meer info

over optredende thermische fenomenen: Lange scherpe spanen zijn eerder afkomstig van thermische shock, terwijl afgeronde spanen worden gevormd door afsmelting. Naast materiaalkundige resultaten zijn er ook de fysische uitgangsgrootheden. Hierbij wordt voor elk sample de MRR, oppervlakteruwheid en schadefactor weergegeven.

4.2 Onderzoeksfase

Het uitvoeren van de experimenten wordt gestart aan -80 V (Tabel 16), deze testen worden gebruikt voor het materiaalkundig onderzoek. Verwacht wordt dat hiermee zowel extreme als goede vonksamples worden gegenereerd door het grote bereik waarover de testen worden afgenomen. Uit deze experimenten wordt per stroomsterkte de optimale pulsduur gevonden in functie van goede MRR en aanvaardbare oppervlaktekwaliteit. Indien dit optimum niet in het testbereik gelegen is worden extra testen uitgevoerd. Uiteindelijk kunnen twee optimale technologieën gevonden worden, met nadruk op maximale MRR of minimale oppervlakteruwheid.

4.2.1 Hoofdexperimenten

De verschillende testen met hoofdparameters uit Bijlage EE worden uitgevoerd. De instelling van de overige parameters wordt weergegeven in Bijlage GG. Pilot Expert II wordt ingeschakeld waardoor parameters B, SV, R, U en RF automatisch worden geregeld. Additionele spoeling wordt niet gebruikt, generator mode 1 wordt geselecteerd en de elektrode roteert aan 10 rpm. Verder zijn er instellingen voor extra pulsatie en micro pulsatie. EXTRA NPULSN en MICRO U worden gelijk gesteld aan nul (Bijlage Z), hierdoor worden deze additionele pulsaties niet gebruikt. Eventuele optimalisaties gerealiseerd door extra pulsaties van de z-as vallen buiten het bestek van deze masterproef.

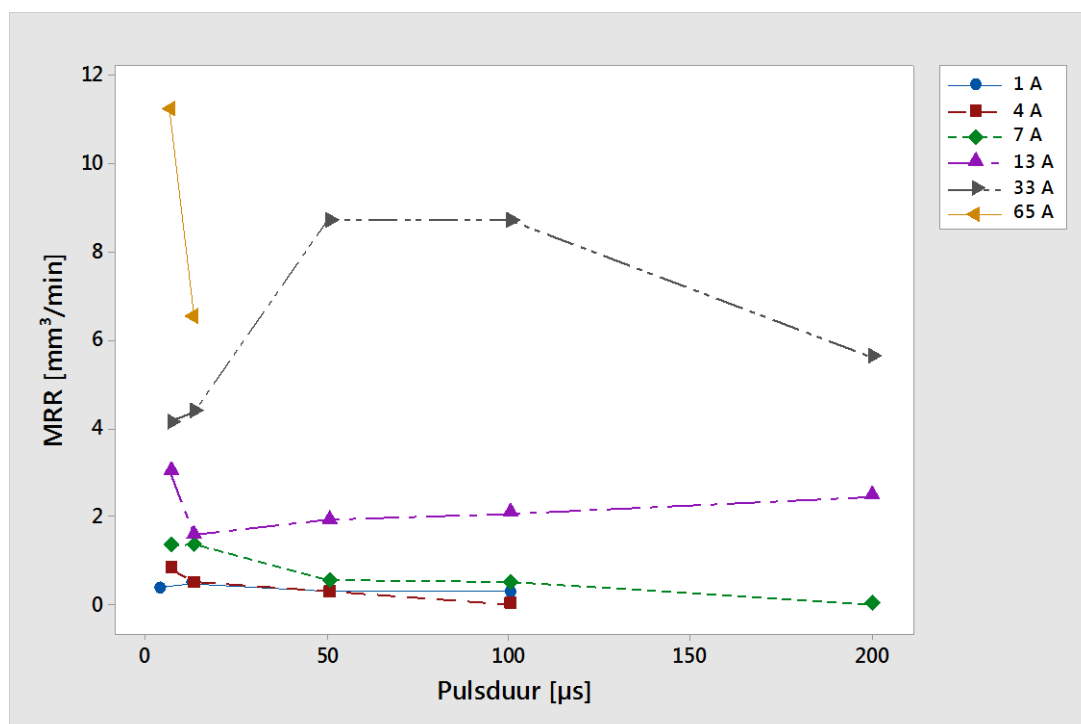
In een eerste deel worden de fysische uitgangsgrootheden weergegeven, om de kwantitatieve invloed van parameters te interpreteren alvorens over te gaan op materiaalkundig niveau. De MRR wordt bepaald, vervolgens de invloed op oppervlakteruwheid en als laatste de invloed op randkwaliteit. De invloeden zullen in de verschillende paragrafen materiaalkundig worden verklaard, hierbij berusten de verklaringen slechts op vermoedens. Deze vermoedens worden later in het materiaalkundig onderzoek onderbouwd.

Invloed van stroom en pulsduur op MRR

Na elke test wordt de bewerkingsduur geregistreerd. De MRR wordt verkregen door het afgenomen volume te delen door deze bewerkingsduur (mm^3/min). Het resultaat hiervan wordt weergegeven in Figuur 38. De figuur geeft weer dat de MRR stijgt met toenemende stroom zoals waargenomen in Hoofdstuk 3: Inleidende experimentele testen. De experimenten bij 65 A aan 50, 100 en 200 μs worden niet volledig uitgevoerd wegens veiligheidsoverwegingen. Na enig verloop van de test aan 65 A -

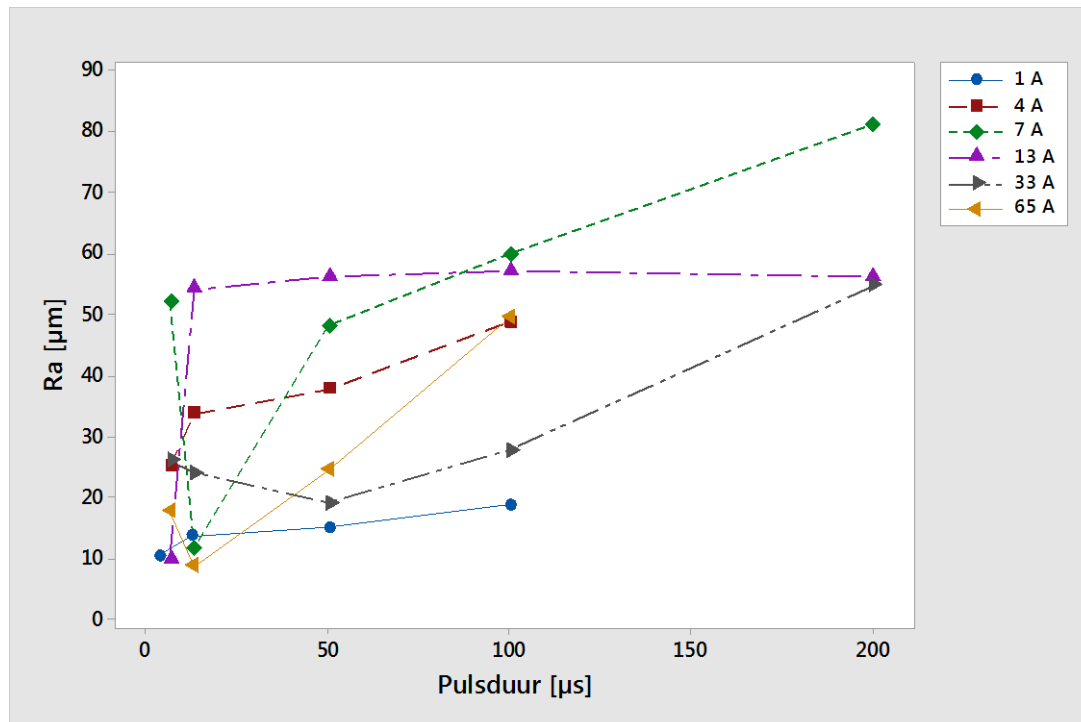
50 μs ontstaat lokaal een zelfontbranding van het diëlektricum. Het vlampunt van 102 $^{\circ}\text{C}$ wordt lokaal in de vloeistoflagen overschreden. De zelfontbranding dooft snel uit door de werveling in de vloeistofbak. Om dergelijke situaties te vermijden worden deze testen niet verder uitgevoerd. De testen bij 65 A aan 50 en 100 μs worden kort uitgevoerd om de oppervlakteruwheid en randkwaliteit te meten.

Verder kan in Figuur 38 de invloed van pulsduur op MRR worden waargenomen. Hierbij is telkens een zone met pulsduur die een maximale MRR bepaalt. Voor en na deze zone daalt de MRR. Hiervoor zijn volgende verklaringen: Een te lage pulsduur geeft een kortere inwerkingsduur van energie waardoor minder materiaal opwarmt (terwijl energie te laag is voor shock effect). Hierdoor zal minder materiaal smelten of verdampen waardoor de MRR laag is. Een te hoge pulsduur zorgt voor te grote materiaalpartikels die het smelten ondergaan, omdat energiehoeveelheden langer op het materiaal inwerken. De massa hiervan is te groot om onmiddellijk weg te spoelen. Dit materiaal blijft tussen de vonkspleet aanwezig waardoor deze het verdere verloop van het proces verstoren. Dit zorgt voor een daling van MRR. Deze verklaring kan niet overal worden toegepast. Bij de weergave van MRR voor 13 A verloopt de curve omgekeerd t.o.v. de andere curves. Hierbij wordt een pulsduur gevonden die voor een minimale MRR zorgt. Voor en na dit minimum stijgt de MRR opnieuw. Bij een korte pulsduur worden materiaaldeeltes verwijderd door thermische shock. Kortstondige energiepulsen zorgen voor uitzetting van materiaaldeeltes waardoor deze losbreken. Bij het verhogen van de pulsduur wordt het materiaal over een grotere zone verhit. De materiaaluitzetting gebeurt nu meer homogeen waardoor deeltes moeilijk loskomen. Dit zorgt voor een minimale MRR. Indien de pulsduur verhoogd wordt, stijgt de energie intensiteit. Zo wordt alsmear meer warmte aan het materiaal toegevoegd omdat energiehoeveelheden langer kunnen inwerken. Dit laat toe om materiaal te smelten en te verdampen, waarbij de hoeveelheid toeneemt met toenemende pulsduur. De MRR blijft stijgen totdat de afgenomen massa materiaal opnieuw te hoog is, waardoor deze het proces verhindert. Dit fenomeen is niet meer zichtbaar op de curve voor 13 A. De hoogste MRR wordt waargenomen bij 65 A - 6,4 μs .



Figuur 38: MRR vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V

Invloed van stroom en pulsduur op oppervlakteruwheid



Figuur 39: Oppervlakteruwheid vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V

De oppervlakteruwheid wordt nagemeten met een profilometer (Bijlage HH). Er worden per sample drie metingen met lengte 5 mm uitgevoerd. De metingen worden geconverteerd naar Ra ruheidswaarden in μ m. Elke meting wordt op een andere plaats op het bewerkt oppervlak gerealiseerd, om een zo realistisch mogelijk resultaat weer te geven. Het gemiddelde van de drie metingen wordt berekend (Bijlage JJ). De invloed van stroom en pulsduur op deze gemiddelde ruheidswaarde wordt weergegeven op Figuur 39. Het oppervlak wordt over het algemeen ruwer met stijgende pulsduur. Stroompulsen werken hierbij langer in op het oppervlak. Hierdoor worden grotere materiaalpartikels los gesmolten die moeilijk kunnen worden weggespoeld. Uiteindelijk verlaten deze toch het werkstuk door spoeling, wat zorgt voor grotere kraters die in het werkstuk achterblijven. Hogere stromen kunnen toegepast worden in combinatie met lage ruwheid. Zo is duidelijk dat voor stromen vanaf 7 A iedere keer een optimale oppervlakteruwheid aanwezig is. Dit afgewisseld door ruwheden die een stuk hoger liggen bij pulsduren links en rechts van dit optimum. Bij lage pulsduren treedt het shock effect op waardoor kleine koolstofpartikels uit het werkstukoppervlak bros uitbreken, hierdoor wordt een ruw oppervlak verkregen. Bij hoge pulsduren worden grote materiaaldeeltjes afgesmolten die te zwaar zijn om onmiddellijk weggespoeld te worden zoals eerder aangegeven (achterblijven van kraters). Indien een pulsduur wordt toegepast gelegen tussen deze twee materiaalafnamemechanismen, dan wordt een goede oppervlaktekwaliteit waargenomen. De pulsduur is te hoog voor thermische shock en laag genoeg om voldoende kleine materiaalvolumes af te smelten. Hierdoor

worden materiaaldeeltjes onmiddellijk weggespoeld. Het resterende gesmolten materiaaloppervlak stolt door de spoeling waardoor een kleine ruwheid wordt verkregen. Elke optimale ruwheid komt overeen met een maximale MRR voor dezelfde stroomwaarde. Het ideale materiaalafnamemechanisme treedt op voor deze uitgangsgrootheden. Zo wordt de kleinst mogelijke oppervlakteruwheid gevonden bij 65 A - 12,8 μ s. Dit wil zeggen dat er parametercombinaties bestaan die zorgen voor een hoge MRR en goede oppervlakteruwheid.

Het is een gunstig resultaat voor de industriële toepasbaarheid van EDM op CFRP. Toch dient dit resultaat verder geëvalueerd te worden met de schadefactor. Zo wordt de test bij 65 A - 6,4 μ s links weergegeven in Figuur 40, het valt op dat de kwaliteit van de rand ondermaats is ondanks een redelijke oppervlakteruwheid.

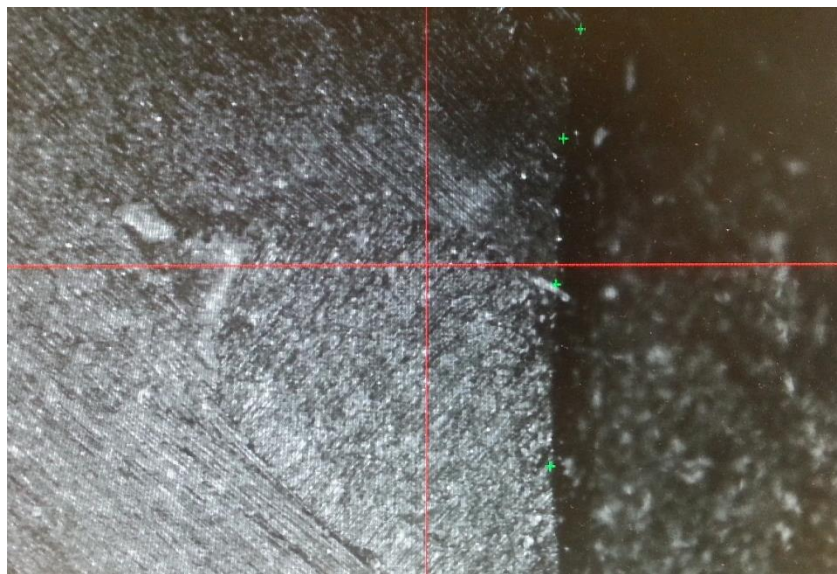
Invloed van stroom en pulsduur op randkwaliteit

Vonksamples met een lage oppervlakteruwheid en hoge MRR hebben niet altijd een goede randkwaliteit. Het is nodig een derde uitgangsgrootheid in te voeren die hiermee rekening houdt, dit is de schadefactor S, zie Figuur 32. Hierbij wordt de binnenste ingeschreven cirkeldiameter d aan het bewerkt oppervlak opgemeten. Deze wordt gedeeld door de omschreven cirkeldiameter D die gemeten wordt aan het werkstukoppervlak. De metingen worden uitgevoerd met een meetmicroscop met kleine vergroting (Bijlage KK). Voor het meten van de diameters wordt deze scherp gesteld op het te meten oppervlak. Hierna worden een tiental meetpunten geplaatst op de overgang tussen de scherp en niet scherp weergegeven zones. De niet scherpe zone stelt een andere werkstukhoogte voor waardoor deze het bewerkte of onbewerkte deel voorstelt. Naargelang welke meting wordt uitgevoerd worden de meetpunten verbonden door een omschreven of ingeschreven cirkel. Figuur 41 geeft dergelijke meting weer, er zijn drie meetpunten in het groen zichtbaar. Het werkstukoppervlak wordt scherp weergegeven waardoor de omschreven cirkeldiameter D wordt gemeten. Bijlage LL geeft de meetresultaten weer, hoe dichter het quotiënt d/D één benaderd, hoe beter de randkwaliteit. Er wordt opgemerkt dat de kleine diameter d steeds kleiner is dan 10 mm, desondanks een elektrode van 10 mm gebruikt wordt. De oorzaak wordt optisch verklaard: Aan de overgang van het bewerkt oppervlak met de opstaande bewerkte werkstukrand is geen ideale hoek van 90° , er is een kleine afronding zichtbaar. Deze kleine afronding zorgt voor een scherpstelling van de microscoop op een kleiner oppervlak. Hierdoor wordt een kleinere diameter dan de elektrodediameter gemeten. De kleine afronding is afkomstig van elektrode slijtage. Deze slijtage is nauwelijks zichtbaar, toch zal de elektroderand na elke bewerking een kleine afronding vertonen.

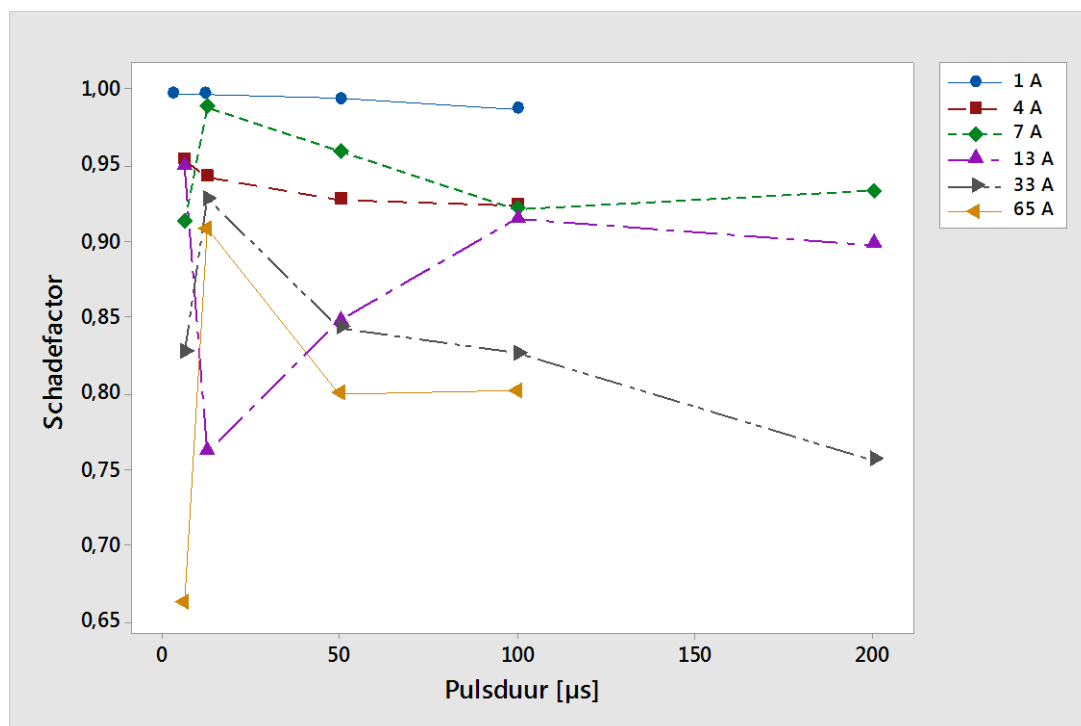


Figuur 40: Macroscopische weergave van experimenten, sample oppervlak bij 65 A - 6,4 μ s (links) en bij 65 A - 12,8 μ s (rechts)

Figuur 42 geeft de schadefactor weer in functie van stroom en pulsduur. Een Hogere stroom zorgt voor een slechtere randkwaliteit. De energie intensiteit neemt toe waardoor de warmte beïnvloede zone groter wordt, zo worden meer omliggende vezels aangetast. Hogere pulsduur zorgt eveneens voor een slechtere randkwaliteit (indien het optimaal materiaalmechanisme niet optreedt), door het achterblijven van kraters door het langer inwerken van energie. Bij de stromen boven 4 A is opnieuw een optimum zichtbaar. Dit is meestal gelegen op een punt waar de MRR hoog is en de oppervlakteruwheid laag, wat wil zeggen dat een stabiel materiaalafnamemechanisme inwerkt. Toch garandeert een stabiel proces niet altijd in een goede randkwaliteit, zie Figuur 40. Hierbij wordt de test bij 65 A – 12,8 μ s rechts aangeduid. Zowel de linkse als rechtse test hebben een hoge MRR en lage oppervlakteruwheid. Toch is de randkwaliteit van diegene op 65 A 6,4 μ s een stuk lager. Hiervoor is niet onmiddellijk een verklaring, materiaalkundige testen kunnen hier meer info over verschaffen.



Figuur 41: Meting van de omschreven cirkeldiameter D aan het werkstukoppervlak



Figuur 42: Randkwaliteit vs. pulsduur voor verschillende stroomsterkten bij -80 V

Om aan te tonen dat een verband bestaat tussen hoge MRR, lage oppervlakteruwheid en goede randkwaliteit wordt Tabel 17 weergegeven. Voor elke uitgangsgrootheid wordt de optimale stroom en pulsduur aangeduid. Dit zijn meestal pulsduren die gelijk zijn of in de buurt van elkaar liggen voor een bepaalde stroom, omdat bij dergelijke parameters een optimaal materiaalafnamemechanisme inwerkt.

Stroomsterkte [A]	Pulsduur [μ s]		
	Max MRR [mm^3/min]	Min Ra [μm]	Max S
1	12,0	3,2	3,2
4	6,4	6,4	6,4
7	12,8	12,8	12,8
13	6,4	6,4	6,4
33	50,0	50,0	12,8
64	6,4	12,8	12,8

Tabel 17: Vergelijking tussen optimale uitgangsgrootheden aangegeven door stroom en pulsduur

4.2.2 Statistische analyse

De effecten van stroom en pulsduur op MRR, oppervlakteruwheid en randkwaliteit worden nagegaan, door het analyseren van de DOE. Deze bevat twee factoren, stroom en pulsduur. De stroom bevat zes levels en de pulsduur bevat er vijf. De resultaten worden weergegeven in Bijlage II, de figuren maken optisch duidelijk dat stroom de grootste invloed uitoefent op MRR en S. Een hogere stroom zorgt voor een diepere warmte beïnvloede zone, waardoor de kwaliteit van de rand slechter wordt omdat deze dieper wordt aangetast. Zo zorgt een hogere stroom voor een hogere MRR, dit omdat de toevoeging van een grotere energie intensiteit zorgt voor een groter smeltvolume. Pulsduur bepaalt welk materiaalafnamemechanisme bij een bepaalde stroom zal optreden (shock effect, afsmelten of te grote massa afsmelten). De omvang van inwerking van dergelijk mechanisme wordt echter bepaald door de stroom. Hierdoor is de invloed van pulsduur op MRR en S optisch minder zichtbaar dan stroom. Bij de invloed op Ra is de pulsduur van zelfde invloed-grootteorde als de stroom. Dit resultaat wordt verwacht vanuit de materiaalafnamemechanismen: Een hogere pulsduur zorgt voor een groter smeltvolume (terwijl hogere stroom voor meerdere kleine smeltvolumes zorgt). Dit smeltvolume is te zwaar om onmiddellijk worden weggespoeld. Deze volumes worden na bepaalde tijd toch weggespoeld. Na afloop van de bewerking blijven enkele kraters in het werkstukoppervlak over, omdat grote volumes in één keer worden afgenomen. Dit zorgt voor een slechtere oppervlaktekwaliteit.

Bovenstaande optische waarnemingen worden bevestigd door het analyseren van statistische significantie. Zo geeft de P-waarde (Probability value) aan of het effect van een factor statistisch significant is. Wanneer het effect op MRR en S wordt geanalyseerd, dan is enkel de stroom significant. Terwijl voor het effect op Ra zowel stroom als pulsduur significant zijn. De interacties tussen factoren zijn niet significant.

Bij het uitvoeren van de verschillende experimenten in 4.2.1 Hoofdexperimenten wordt slechts één replica gebruikt per experiment. In deze paragraaf wordt nagegaan of dit zorgt voor betrouwbare resultaten, door één test meerdere malen uit te voeren, zo worden vier replica's uitgevoerd voor de test aan 33 A – 6,4 μ s. Het experiment is er slechts op gericht om een idee te vormen over de betrouwbaarheid van het resultaat, daarom wordt enkel de variatie op bewerkingstijd nagegaan. De opgemeten bewerkingstijden zijn achtereenvolgens: 14,97; 16,5; 15,41 en 17,11 min. Dit bepaalt een gemiddelde en standaarddeviatie (hieronder weergegeven). Onderstaande resultaten bepalen een repeeteerbaarheid van de experimenten waarbij 95 % kans is dat de resultaten zich bevinden in het interval [15,32; 17,68] min. Het gevolg hiervan is een variatie van bijna 3 min. Op basis van deze waarde wordt besloten dat de resultaten van één replica voldoende betrouwbaar zijn, omdat deze data slechts dient om verder inzicht te verwerven in optredende materiaalafnamemechanismen. De variatie gaat hierbij niet beletten onderscheidt te kunnen maken tussen verschillende samples.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{6} = 16,50 \text{ min}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^2 (x_i - \bar{x})^2}{4 - 1} = 0,59$$

$$\sigma = \sqrt{s^2} = 0,35$$

4.2.3 Optimale vonktechnologie

In deze paragraaf wordt gezocht naar een optimale vonktechnologie. Het resultaat hiervan zijn twee technologieën. Bij de ene kan nadruk worden gelegd op maximale bewerkingssnelheid en bij de andere op minimale oppervlakteruwheid, zoals in Figuur 21: Bewerkingsvoorkeur. De resultaten uit 4.2.1 worden nagegaan, hierin wordt per stroom een optimale pulsduur aangeduid voor een optimale combinatie van MRR, Ra en S. Deze pulsduren worden in het rood aangeduid op Bijlage MM. Bij de testen aan 1 en 4 A is dit 3,2 en 6,4 μ s. Testen bij 1 en 4 A worden aan hogere pulsduren uitgevoerd en geven een slechter resultaat. Mogelijk zorgen pulsduren lager dan 3,2 en 6,4 μ s voor een nieuw optimum. Deze experimenten kunnen niet uitgevoerd worden met de Roboform omdat deze combinaties niet voorkomen. Bij stromen hoger dan 4 A is het wel mogelijk om testen te generen in de buurt van het optimum. Er worden 14 testen extra gegenereerd, weergegeven in Bijlage NN. Het doel van deze extra testen is om na te gaan of een nieuw optimum bestaat. Zo worden eveneens een aantal pulsduren getest aan extra stroomsterkten, 9 en 49 A, omdat vorige testen geen waarden bevatten tussen 7 en 13 A en tussen 33 en 65 A. Ook hier kunnen positieve resultaten voorkomen. In Bijlage NN worden de optima van vorige testreeks in het rood aangeduid. De blauwe waarden rond deze optima zijn eveneens resultaten uit vorige testreeks. Vervolgens worden de nieuwe testen in het zwart aangeduid. De groene arcering duidt de nieuwe optimale pulsduren aan per stroomsterkte. Dit wordt bepaald op basis van een goede afweging tussen MRR,

oppervlakteruwheid en randkwaliteit. Na afloop van deze testen wordt de optimale technologie gezocht. Om in aanmerking te komen voor een industrieel toepasbare technologie dienen de testen aan enkele voorwaarden te voldoen. Zo wordt de maximale bewerkingstijd vooropgesteld: De tijd om 1 mm diep te bewerken met een elektrodediameter 10 mm mag niet langer dan 1 uur bedragen, dus de MRR dient hoger dan $1,31 \text{ mm}^3/\text{min}$ te zijn. Voor de oppervlakteruwheid wordt geopperd dat deze niet ruwer mag zijn dan het conventioneel ruw bewerken (draaien, frezen, boren ...), hieruit volgt dat de Ra waarde maximaal $12,5 \mu\text{m}$ mag bedragen [6]. Ten slotte wordt een maximum bepaald voor de schadefactor die de randkwaliteit uitdrukt. Vanuit visuele redenering wordt bepaald dat deze 0,900 niet mag overschrijden. Met deze voorwaarden kan opzoek worden gegaan naar een geschikte technologie. Indien de nadruk op minimale oppervlakteruwheid wordt gehanteerd, dan is er één set parameters met duidelijke voorkeur: de combinatie 13 A - $3,2 \mu\text{s}$. Hierbij bedraagt de oppervlakteruwheid $8 \mu\text{m}$, de kleinste waarde van alle experimenten. De MRR bedraagt $2,98 \text{ mm}^3/\text{min}$ waardoor de bewerkingstijd 27 minuten bedraagt, de schadefactor heeft een waarde van 0,921. Vervolgens kan een optimale technologie voor minimale bewerkingstijd worden gevonden: De combinatie 65 A - $12,8 \mu\text{s}$. Hierbij bedraagt de MRR $6,55 \text{ mm}^3/\text{min}$ wat zorgt voor een bewerkingstijd van 12 minuten, de oppervlakteruwheid bedraagt $8,7 \mu\text{m}$ en de randkwaliteit bedraagt 0,908. Het verschil in randkwaliteit zorgt voor de grootste tegenstelling in resultaat wanneer de twee technologieën onderling worden vergeleken.

De twee optimale vonktechnologieën worden getest op het CFRP. Telkens wordt een gat door en door uitgevonkt (door geweven - en UD structuur) met een elektrode diameter van 10 mm. De lengte van het gat bedraagt 11 mm (waarvan 4 mm geweven structuur), het visueel resultaat hiervan wordt weergegeven in Figuur 43. Aan de randkwaliteit kan worden afgeleid uit welke technologie een gat afkomstig is. Het gat met optimale MRR wordt gemaakt met een bewerkingstijd van 4 u 11 min (MRR = $3,44 \text{ mm}^3/\text{min}$). Deze MRR heeft een waarde die bijna twee keer lager ligt dan wanneer dezelfde technologie toegepast wordt op enkel de geweven structuur. Dit omdat de UD lagen een hogere elektrische weerstand bieden (3.2.1 Elektrische weerstand CFRP) dan de geweven lagen. Het andere gat dat wordt gevonkt met de technologie voor minimale Ra bepaalt een bewerkingstijd van 11 u 21 min (MRR = $1,27 \text{ mm}^3/\text{min}$). De bewerkte rand en oppervlakte is hier van mindere kwaliteit zoals te verwachten. De linkse afbeelding op Figuur 43 geeft de bovenzijde van het werkstuk weer. Hiermee wordt de zijde bedoeld waar de elektrode zijn intrede maakt (zijde met geweven structuur). De rechtse afbeelding geeft de onderzijde van het werkstuk weer (zijde met UD structuur).

In praktische toepassingen kunnen deze twee optimale technologieën worden gecombineerd. Zo kan de technologie met maximale MRR gebruikt worden om in een eerste bewerkingsspas, een hoog materiaalvolume af te nemen met een korte bewerkingstijd (bv. een gat met elektrode $\varnothing 10 \text{ mm}$). Vervolgens kan de kwaliteit van de rand en oppervlaktekwaliteit verhoogd worden door een tweede bewerkingsspas uit te voeren met de technologie voor minimale ruwheid (bv.

spiraalvormig uitvonken van het gat \varnothing 10 mm, waardoor een gat \varnothing 13 mm ontstaat met goede Ra en S).



Figuur 43: Doorgevonkt gat met optimale vonktechnologieën, bovenzijde (links), onderzijde (rechts)

4.2.4 Materiaalkundig onderzoek

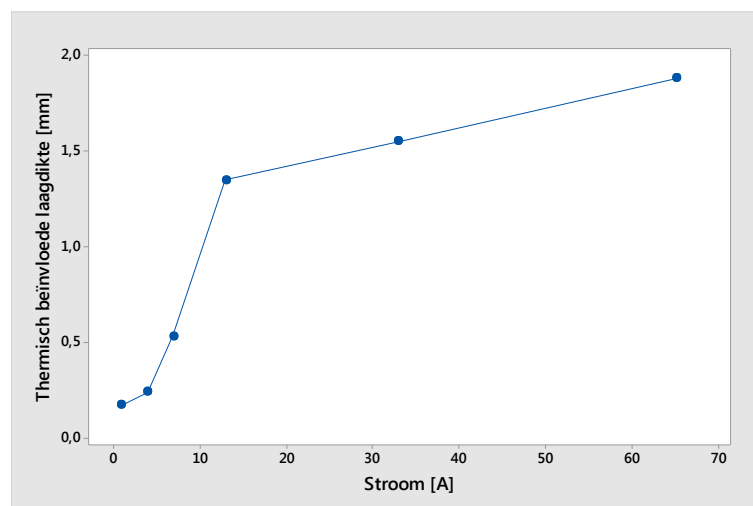
In deze paragraaf zullen verschillende materiaalkundige onderzoeken worden uitgevoerd zoals eerder aangehaald. Hierbij kunnen verklaringen uit hoofdstuk 4.2.1 worden bekrachtigd. Naast het bekijken van optredende verschijnselen worden de samples met elkaar vergeleken. Zo kan het effect van stroom en pulsduur materiaalkundig worden nagegaan. Om de invloed van stroomsterkte te analyseren zullen samples afkomstig van 1, 4, 7, 13, 33 en 65 A worden onderzocht waarbij telkens eenzelfde pulsduur van 12,8 μ s wordt gebruikt. In de eerste testfase gaf deze pulsduur voor de meeste stroomsterkten een optimaal resultaat. Door de pulsduur constant te houden worden consistente resultaten verkregen waarbij enkel de invloed van stroom zichtbaar mag zijn. Om de invloed van pulsduur na te gaan worden de samples uit de twee voorgaande testfases gebruikt (4.2.1 Hoofdexperimenten). De pulsduur wordt hierin het meest gevarieerd, dit zijn de samples bij een stroom van 13 A, de pulsduur bedraagt dan 0,8; 1,6; 3,2; 50; 100 en 200 μ s. Totaal zorgen deze testwaarden met invloed van stroom en pulsduur voor 12 samples, inbegrepen de twee samples afkomstig uit de twee optimale technologieën, bepaald in 4.2.2. Er wordt gestart met de microscopische evaluatie van de doorsnedes. Deze geven het best de invloed van thermische effecten weer. Dit zijn de diepte van de warmte beïnvloede zone, eventuele recast layers en mogelijke smeltzones.

Microscopische evaluatie van doorsnedes

De samples worden voorbereid voor het microscopisch onderzoek door ze door te zagen met een lintzaag bekleedt met artificiële diamant. Om een oppervlak optisch te kunnen evalueren dienen deze vlak en krasvrij te zijn. Het sample wordt ingebed vervolgens geschuurd en gepolijst. De doorsnedes waar de stroom wordt gevarieerd zijn zichtbaar in Bijlage OO. Deze waar pulsduur wordt gevarieerd worden weergegeven in Bijlage PP, de bewerkingsrichting is voor alle figuren verticaal naar

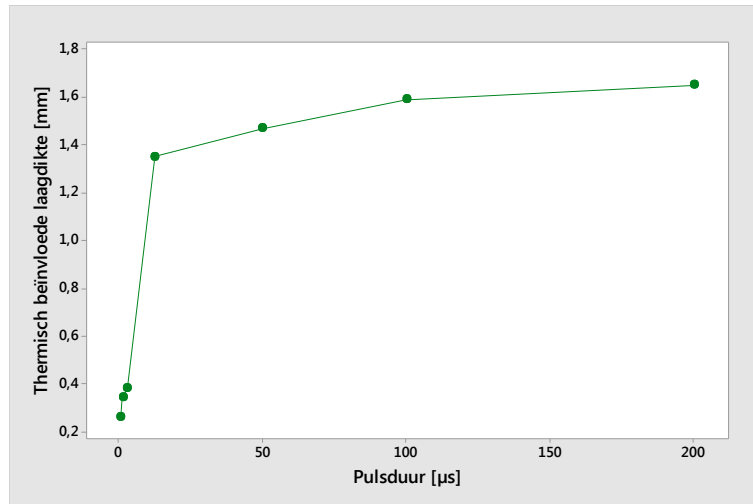
beneden. Per parameterinstelling worden telkens twee figuren weergegeven: De linkse figuren zijn een momentopname van het sample aan het bewerkt oppervlak. De rechtste figuren geven de opstaande rand van het bewerkt oppervlak weer. Voor alle figuren wordt de kleinste vergroting gebruikt waarover de microscoop beschikt. De overeenkomstige schaal wordt vermeldt in de linkerbovenhoek van de eerste figuur. De fysische betekenis van de verschillende vormen op een afbeelding wordt vermeld in 3.2.3 Inleidende testopstelling.

Er wordt gestart met een kwantitatieve aanpak waarbij de diepte van de warmte beïnvloede zone wordt nagemeten. Deze diepte varieert enkele honderdsten over het bewerkt oppervlak van één sample. Geprobeerd wordt om visueel steeds de gemiddelde afstand aan te duiden. Deze aanpak wordt voldoende geacht omdat de thermisch beïnvloede laagdikte slechts als indicatie dient en omdat dezelfde samples onderling eveneens een variatie bezitten. De invloed van de stroom op deze dikte wordt weergegeven in Figuur 44. De warmte beïnvloede zone varieert tussen 0,17 en 1,88 mm. Op de figuur zijn twee lineaire zones zichtbaar, van 7 tot 13 A en van 13 tot 65A, vanaf 13 A neemt de toename in beïnvloede laagdikte af. Uit deze waarnemingen kan afgeleid worden dat de thermisch beïnvloede laagdikte stijgt met toenemende stroom. De invloed van stroom is groter in het interval 1 tot 13 A dan deze van 13 tot 65 A.



Figuur 44: Invloed van de stroom op de thermisch beïnvloede laagdikte

De invloed van pulsduur op de thermisch beïnvloede zone wordt weergegeven in Figuur 45. Opnieuw kunnen twee quasi lineaire zones worden opgemerkt. Ook hier neemt de laagdikte toe met toenemende pulsduur. In het interval 0,8 tot 12,8 μ s heeft de pulsduur een grotere invloed dan in het interval 12,8 tot 200 μ s. Deze resultaten bevestigen de keuze uit 4.1 Planning experimenteel onderzoek. Hierbij wordt beslist welke stromen en pulsduren gebruikt zullen worden voor de testfase. Lage stromen en pulsduren volgen elkaar sneller op dan voor hogere waarden. Dit omdat de richtingscoëfficiënt voor deze lagere waarden in Figuur 44 en Figuur 45 steiler verloopt dan voor hogere waarden. Door deze parameterkeuze wordt de variatie bevordert tussen de testen onderling.



Figuur 45: Invloed van de pulsduur op de thermisch beïnvloede laagdikte

Alvorens de samples worden ingebed, worden deze ontvet (volgens 3.2.3 Inleidende testopstelling) om olievormige resten afkomstig van het diëlektricum grondig weg te spoelen. De samples worden gedurende enkele uren in een ontvettingsvloeistof (Disinfectol) geplaatst. Dit is nodig om goede cohesie te verkrijgen tussen sample en inbedmateriaal. Toch kunnen deze olieachtige sporen niet altijd volledig worden weggespoeld. Het gebruikte inbedmateriaal bestaat uit twee componenten. Bij het toevoegen van deze componenten aan het sample ontstaat een chemische reactie. Het geheel warmt op waardoor resterende oliesporen uit het materiaal aan het oppervlak verschijnen, zo ontstaan zones van lucht tussen inbedmateriaal en sample. Deze worden gezien als zwarte zones welke bij enkele figuren zichtbaar zijn aan de rand van het sample. Het sample van 33 A - 12,8 µs ondervindt hier het meeste invloed van. Met deze zwarte zones dient geen rekening gehouden te worden. Het diëlektricum kan de warmte beïnvloede zone binnendringen op plaatsen waar het matrixmateriaal verdampt door de toegevoerde energie. De verdamping van dit matrixmateriaal wordt bevestigd door de meer donkere tint van de warmte beïnvloede zone. Het kunststof verdampt tussen de vezels, waardoor de ontstane minuscule holtes worden opgevuld door diëlektricum. Bij het spoelen van de sample neemt het ontvettingsmiddel grotendeels de plaats in van het dielectricum. Vervolgens verdampt het ontvettingsmiddel door zijn vluchtig karakter en kunnen de holtes worden opgevuld door omgevingslucht. Deze lucht zorgt voor een optisch meer donkere weergave. De meeste hinder hiervan wordt ondervonden in de figuren met opstaande werkstukrand, omdat de verschillende lagen loodrecht op deze rand uitmonden, zo kan via de prepregnaden gemakkelijker diëlektricum binnendringen en uit het werkstuk komen bij de chemische reactie van het bindmiddel.

Vervolgens zijn er de verschillende materiaalafnamemechanismen uit 4.2.1 die al dan niet bevestigd kunnen worden. Een eerste materiaalafnamemechanisme, is het shock effect. Deze manier van afnemen kan verwacht worden bij de sample van 65 A - 12,8 µs en bij deze van 13 A - 0,8 µs. Het optreden van dit fenomeen wordt visueel moeilijk worden waargenomen. Mogelijk treed dit op bij het sample van 13 A - 0,8 µs.

Het is duidelijk dat dit niet optreedt bij de sample van 65A - 12,8 μ s, hier is een recast layer zichtbaar, deze wordt aangeduid in het rood op Figuur 46. Dit wil zeggen dat er net voldoende energie inwerkt om materiaal los te smelten. De smeltzone is niet te groot waardoor materiaal delen een voldoende kleine massa bezitten om onmiddellijk weggespoeld te worden. Wat overblijft, is een mengsel van voornamelijk in elkaar gesmolten koolstofvezels. Deze zone stolt na de laatste bewerking door spoeling van het diëlektricum. Door deze manier van stollen ontstaat een oppervlak met kleine ruwheid (door werveling diëlektricum). Dit oppervlak maakt deel uit van de recast layer. Door de versmolten koolstofvezels wordt verwacht dat dit een hardere laag is dan omliggend werkstukmateriaal. De recast layer is niet zichtbaar over de hele lengte van het bewerkt oppervlak omdat sommige smeltzones volledig wegspoelen waardoor deze laag niet achterblijft. Bij het sample aan 13 A - 3,2 μ s wordt eveneens een recast layer opgemerkt. Ook dit sample maakt deel uit van een optimale technologie. Daarom kan hier een recast layer verwacht worden omdat een optimaal materiaalafnamemechanisme inwerkt.

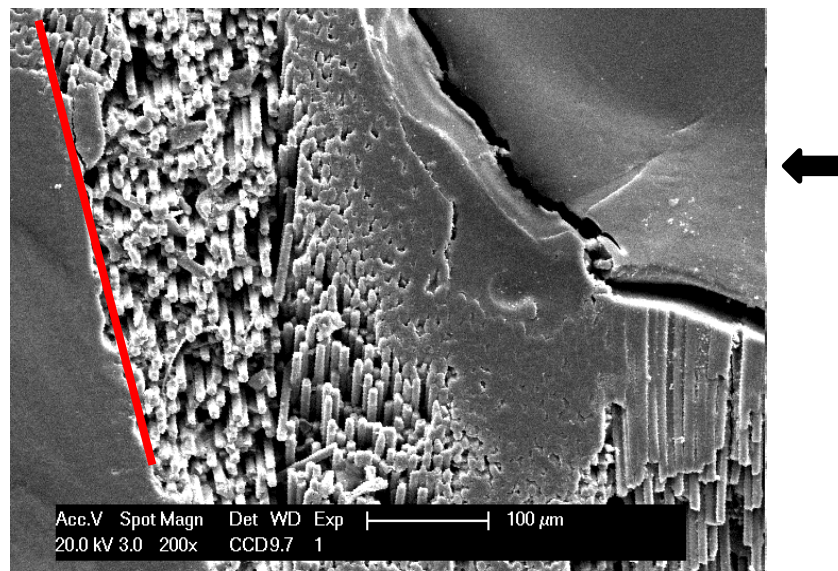


Figuur 46: Doorsnede van sample 65 A – 12,8 μ s

Vervolgens resteren nog twee materiaalafnamemechanismen die zorgen voor een traag of instabiel vonkproces. Een eerste soort is diegene waar de toegevoerde energie te laag is om efficiënt materiaal af te nemen. Deze samples hebben een dunne laagdikte van de warmte beïnvloede wat visueel zichtbaar is en wat bevestigd wordt door de metingen weergegeven in Figuur 44 en 45. Bij de tweede soort werkt een te grote energiehoeveelheid lokaal in op het materiaal. Het materiaal smelt maar wordt niet onmiddellijk afgenomen door spoeling omdat de massa gesmolten materiaal te groot is. De diepte van inbranding van vonken is diep waardoor een grote smeltzone kan ontstaan. Opnieuw zorgt dit voor hindering van het proces waardoor het instabiel wordt. In een volgende deel verduidelijkt de SEM analyse dit fenomeen, bij de paragraaf over spaananalyse wordt hier verder op ingegaan.

SEM evaluatie van de doorsnedes

Sommige doorsnedes uit vorige paragraaf worden optisch gehinderd door het vrijkomen van diëlektricum. Ook de warmte beïnvloede zone is minder goed zichtbaar door de donkere tint. Omwille van deze redenen worden enkele doorsnedes bekeken met de SEM microscoop. Het resultaat hiervan wordt weergegeven in Bijlage QQ en Bijlage RR, opnieuw worden samples met verschillende pulsduur en stroomsterkte afgebeeld. De bewerkingsrichting is steeds verticaal naar beneden, tenzij een zwarte pijl anders vermeldt. Over het algemeen worden dezelfde fenomenen waargenomen zoals deze met een optische microscoop. Toch wordt de invloed van verdampen van matrixmateriaal en het smelten van koolstofvezels duidelijker weergegeven, zie Figuur 47. De bewerkingsrichting wordt er aangegeven door de zwarte pijl. De zwarte scheidingslijn op de figuur duidt de overgang tussen bewerkt oppervlak en inbedmateriaal aan. De warmte beïnvloede zone reikt benaderend tot de rode lijn (de zone die niet door temperatuur beïnvloed wordt, heeft in deze figuur quasi hetzelfde uitzicht als de gesmolten koolstofvezels). Uit de figuur wordt duidelijk dat kunststof verdampt tot op grotere diepte, doordat het sublimatiepunt van kunststof lager ligt dan deze van koolstof. De achtergebleven



Figuur 47: SEM figuur van doorsnede aan 13 A 3,2 μs

gesmolten koolstofvezels aan het oppervlak kunnen verondersteld worden als een soort recast layer. Door de aard van de faseverandering zorgt dit voor een goede oppervlaktekwaliteit welke zichtbaar is op de figuur. De eerste figuur van Bijlage QQ geeft breuklijnen tussen de vezelbundels weer. Na verloop van tijd zullen de vezelbundels bij het verderzetten van het proces op deze lijnen uitbreken. In de laatste figuur op Bijlage QQ wordt ingezoomd op het sample uit Figuur 46, op de inkeping die zich aan de recast layer bevindt. Deze inkeping is vermoedelijk afkomstig van het verdampen van kunststof dat tijdens het vonkproces plaats vindt. Bij de laatste figuur van Bijlage RR wordt ingezoomd op het bewerkt oppervlak. Het ontstaan van een grote afgesmolten laag die niet onmiddellijk wordt weggespoeld wordt weergegeven. Tussen deze laag zijn sferen zichtbaar: Koolstofvezels die door

spoelen van het diëlektricum bolvormig stollen, dezelfde spaandeeltjes zoals gevormd bij EDM van metalen.

Onderzoek van het bewerkt oppervlak met macrolens en SEM

Het bewerkt oppervlak kan in tegenstelling tot de doorsnedes niet met een optische microscoop bekeken worden, omdat het oppervlak vlak moet kunnen gemaakt worden. Daarom wordt het bewerkte oppervlak bekeken met de SEM microscoop. De geanalyseerde oppervlakken waarbij de invloed van stroom wordt nagegaan wordt weergegeven in Bijlage SS. De eerste figuur die per sample wordt weergegeven, wordt gemaakt met een macrolens (zie opstelling in Bijlage UU). Dit om een beter overzicht te geven (is telkens een half doorgezaagd sample). Dit verduidelijkt van welke macroscopische samples de SEM beelden afkomstig zijn. De linkse figuren bepalen de weergave van het bewerkte oppervlak. Op de rechtse figuren wordt eveneens de opstaande werkstukrand en een deel van het onbewerkte oppervlak weergegeven. Deze laatste maakt mogelijk om bewerkt en onbewerkt oppervlak met elkaar te vergelijken. Op het onbewerkte deel zijn de vezels afzonderlijk goed zichtbaar. Op het bewerkte deel zijn deze vezels individueel moeilijk waarneembaar, doordat ze een enigszins gesmolten geheel vormen. De overgang tussen verschillende vezellagen is wel waarneembaar. Het nagenoeg zelfde uitzicht van beide oppervlakken aan verschillende stroom wordt bevestigd door de oppervlakteruwheid. Deze zijn 12 en 9 μm waardoor een grote gelijkenis ontstaat. De randkwaliteit voor het sample van 65 A bedraagt 0,908 terwijl dit voor het sample van 7 A 0,988 bedraagt. Dit verschil is zichtbaar op de rechtste figuren. Bij het sample van 65 A zijn enkele vezelbundels zichtbaar die het verloop van de rand verstoren. Het andere sample vertoont slechts enkele individuele uitstekende vezels. Deze worden mogelijk niet opgemerkt bij het opmeten van de schadefactor.

De invloed van pulsduur op het bewerkt oppervlak wordt weergegeven in Bijlage TT. Opnieuw wordt gestart met het weergeven van een macroscopische figuur. De samples aan 13A - 1,6 μs en 13 A - 100 μs worden weergegeven. Deze hebben een sterk verschillende oppervlaktekwaliteit. Dit wordt bevestigd door de ruheidswaarden, voor 1,6 μs is dit 11 μm terwijl 57 μm voor diegene aan 100 μs . Bij het eerste sample bestaat het oppervlak uit deels in elkaar gesmolten vezels. Op de twee laatste figuren aan 1,6 μs worden vergrotingen getoond. Hier bevinden zich gesmolten vezels afgewisseld door korte stukken afgebroken vezels. Deze laatste zijn individuele vezels die niet verder smelten tot één geheel. De figuren bevestigen het shock effect. Zoals eerder besproken treedt dit materiaalafnamemechanisme op wanneer een hoge stroom wordt gecombineerd met korte pulsduur, vezelbundels warmen kortstondig op tot hoge temperatuur en koelen snel weer af. Door dit verschijnsel zetten vezels uit waarna ze terug krimpen. Hierdoor ontstaan materiaalspanningen waardoor kleine stukjes vezels uit het materiaal losbreken. In praktische situaties treedt dit materiaalmechanisme in het sample aan 1,6 μs hoofdzakelijk op. Toch zullen andere mechanismen ook voorkomen, maar dan minder uitgesproken. Hierdoor kan naast de afgebroken vezels een gesmolten massa teruggevonden worden. Het sample aan 100 μs vertoont grote kraters aan het gestold oppervlak. Dit bevestigt het mechanisme waarbij te grote pulsduur wordt

toegepast. Grote hoeveelheden energie werken in op het materiaal, met als gevolg het ontstaan van grote en diepe materiaalzones die smelten. Door de grote massa van deze zones worden deze niet onmiddellijk weggespoeld. Na een tijd wordt zo'n materiaaldeel toch weggespoeld door de wervelingen van de spoeling. Hierdoor ontstaat een krater in het oppervlak waarna het proces zich herhaalt.

EDX analyse op doorsnede en bewerkt oppervlak

Om meer uitsluitsel te bieden over de verklaring van optredende materiaalafnamemechanismen wordt een EDX analyse uitgevoerd. Deze analyse bepaalt welke atomen aanwezig zijn in een geselecteerde zone (spot), gelegen in het werkstuk. Er wordt gekeken of hetzelfde fenomeen optreedt zoals in Figuur 12 (zie literatuurstudie). Hierbij diffundeert elektrodemateriaal (Cu) in het bewerkt oppervlak. De hoeveelheid hiervan stijgt met toenemende energie hoeveelheid.

In Bijlage VV wordt een EDX analyse uitgevoerd in een zone aan het bewerkt oppervlak, op een sample aan 7 A - 12,8 μ s. De vezels lijken deels in elkaar versmolten. De analyse geeft een grote koolstofpiek waar te verwachten valt bij CFRP. Naast deze piek wordt vervolgens een kleine koperpiek waargenomen. De procentuele fout op de aanwezigheid van dit element is slechts 4,03 %. Dit geeft een grote zekerheid over de aanwezigheid van het atoom. Deze analyse bevestigt 2.3.1 Resultaten uit de literatuur. Door het vonkproces zullen koperatomen in het bewerkt oppervlak diffunderen. Deze atomen worden losgemaakt door de ionen die inslaan op de elektrode. De ionen zijn afkomstig uit het werkstuk en zorgen voor elektrodeslijtage. De losgemaakte koperatomen worden meegevoerd met de elektronen waardoor deze in het bewerkt oppervlak terecht komen.

In een volgende analyse (Bijlage WW) wordt de atoomsamenstelling in het bewerkt oppervlak van dezelfde sample uitgevoerd (zie ligging spot 2). Hierbij zijn de vezels volledig in elkaar versmolten. Dit kan waargenomen worden door de afgeronde contour van de beschouwde zone. De analyse vertoont dezelfde pieken als het vorige resultaat, behalve de koper piek, deze is groter. De massaprocent Cu stijgt van 3,62 tot 15,9 %. Dit is een logisch resultaat omdat in een smeltzone meer elektronen inwerken waardoor hier meer koper atomen worden achtergelaten. Verder worden in beide analyses kleine pieken van calcium, broom en zwavel opgemerkt. Calcium komt slechts in weinig analyses voor. De procentuele kans op het niet voorkomen hiervan is vaak groter dan 20 %. Indien het element daadwerkelijk voorkomt dan kan dit verklaard worden door eerdere bewerkingen van metalen. Hierdoor kunnen sporen in het diëlektricum achterblijven welke niet volledig door de filterinstallatie worden tegengehouden. Calcium wordt bij metalen gebruikt als oxidator voor legeringselementen [22]. Bij de elementen broom en zwavel is de aanwezigheidsfout kleiner dan of gelijk aan 20 %, wat wil zeggen dat deze elementen wel degelijk voorkomen in het bewerkt oppervlak. Om te bepalen of deze elementen oorspronkelijk aanwezig zijn in het CFRP wordt een derde EDX analyse uitgevoerd.

In deze derde analyse wordt een onbewerkte zone op het CFRP oppervlak onderzocht. Het resultaat hiervan wordt weergegeven in Bijlage XX. Hierbij zijn

slechts drie pieken zichtbaar, deze van koolstof (veruit de grootste), zuurstof en zwavel. Zwavel kan toegevoegd worden om voor de uitharding van de prepregs te zorgen [23]. Dit is slechts een prognose, bijkomende info van de fabrikant kan hier meer uitsluitsel over bieden. Zuurstof komt vermoedelijk voor door de oxidatie van prepregs met de omgeving. Ook deze info dient bevestigd worden door de fabrikant, omdat de datasheet van het prepregmateriaal (Bijlage A) geen Lewis formules van de chemische samenstelling bevat. Vervolgens rest het achterhalen van de afkomst van broom, wat tijdens het EDM proces aan het materiaal wordt toegevoegd. Hierdoor blijven twee oorzaken over die de afkomst kunnen verklaren. Mogelijks komt het voor door de chemische reactie die ontstaat bij het vonken, wat onwaarschijnlijk is omdat broom niet gevormd worden bij bv. een verbrandingsreactie. Als tweede oorzaak rest het diëlektricum dat sporen in het bewerkt oppervlak nalaat zoals eerder aangehaald. Net zoals bij het matrixmateriaal wordt de chemische samenstelling van het diëlektricum niet vermeldt in de datasheet (Bijlage W). Verder onderzoek toont aan dat broom een uitstekende brandvertrager is [24]. Deze kan gebruikt worden om het vlammpunt van kerosine te verhogen tot 102°C waardoor een bruikbaar en veilig diëlektricum gevormd wordt. Dit verklaart de afkomst van broom in de EDX analyse.

Verschillen tussen vezels of matrixmateriaal worden nauwelijks opgemerkt. Dit omdat koolstof C, het meest voorkomende atoom betreft in zowel het kunststof als de koolstofvezels. De minimale spotgrootte die gebruikt kan worden is groter dan de vezeldiameter waardoor de vezels of kunststof niet apart kunnen worden geëvalueerd. Met een EDX analyse kan moeilijk worden gekeken of kunststof aanwezig is in smeltzones. Vermoedelijk verdampt dit uit het materiaal door het hogere sublimatiepunt. Deze veronderstelling wordt bevestigd door het SEM onderzoek van doorsnedes. Hierbij wordt de afwezigheid van matrixmateriaal tussen de vezels opgemerkt, in de warmte beïnvloede zone.

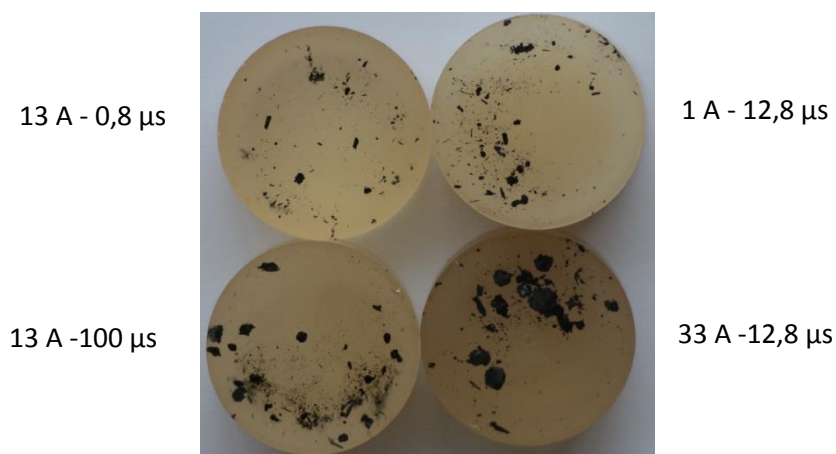
Een analyse wordt uitgevoerd ter vergelijking met de literatuur. Er wordt getest of een verhoging van energiehoeveelheid zorgt voor meer koperatomen in het materiaal. Een EDX analyse in een smeltzone wordt uitgevoerd, in het bewerkt oppervlak van een sample aan 65 A - 12,8 μ s (Bijlage YY). De analyse geeft een stijging van 23,23 % massaprocent Cu, van 15,09 % voor het sample van 7 A - 12,8 μ s naar 38,32 % voor 65 A - 12,8 μ s. Het bekomen resultaat bevestigt eerder uitgevoerd onderzoek [12]. Ook wordt getest of een verhoging van pulsduur zorgt voor meer koperdeeltjes in het oppervlak. Een EDX analyse wordt uitgevoerd voor het sample aan 13 A - 100 μ s (Bijlage ZZ). Deze geeft een koperpiek met 3,12 % (massaprocent), in vergelijking met Bijlage VV (7 A - 12,8 μ s) waar een Cu piek van 3,62 % gevonden wordt. Hieruit volgt dat zelfde grootte ordes voorkomen in samples met verschillende pulsduur. De pulsduur heeft weinig invloed op de hoeveelheid Cu atomen die voorkomen in het bewerkt oppervlak. Dit afhankelijk van welke thermische zone geanalyseerd wordt. In deze analyse gaat het over de vergelijking van twee niet-smeltzones.

Tot slot worden EDX analyses uitgevoerd op sample doorsnedes. Dit eveneens voor vier verschillende samples. Twee met verschillende stroom en twee samples met verschillende pulsduur. In Bijlage AAA wordt slechts één analyse hiervan weergegeven, omdat bij elke doorsnede dezelfde verschijnselen worden opgemerkt. De meest notabele vaststelling is het niet voorkomen van koper atomen in doorsnedes. Hierbij kan besloten worden dat Cu atomen enkel aan het bewerkt oppervlak voorkomen.

Spaananalyse

De spaananalyse is de laatst gebruikte methode die aangevat wordt voor het materiaalkundig onderzoek. Het doel is om opnieuw eerder aangehaalde verklaringen voor materiaalafnamemechanismen te staven. Een spaananalyse bestaat uit het microscopisch analyseren van spaandeeltjes. Om de spanen te verzamelen wordt een opvangbak voorzien, deze doet dienst als diëlektricum reservoir (Bijlage BBB). Zo worden spanen niet gescheiden via de filterinstallatie van de machine. Het reservoir wordt uit geleidend materiaal vervaardigd waarbij de bodem een schroef bevat om het CFRP op te spannen. Tijdens de testfase wordt de bak omringd door diëlektricum dat circulatie van de machine ondervindt, zo wordt voldoende koeling van het proces voorzien. Na afloop van een experiment wordt het diëlektricum door een papierfilter gegoten. De spanen worden ontvet met ontvettingsmiddel. Vervolgens worden spanen met inbedmateriaal geprepareerd om deze optisch te bekijken. Er worden voldoende spanen voorzien door meerdere testen uit te voeren, zodat deze niet allemaal worden verwijderd bij het vlakschuren van de samples.

Vier parameterinstellingen worden gebruik. Dit aan 1 A – 12,8 μ s en 33 A – 12,8 μ s om de invloed van de stroom na te gaan. De andere twee testen gebeuren aan 13 A – 0,8 μ s en 13 A - 100 μ s om de invloed van de pulsduur na te gaan. Het resultaat wordt macroscopisch weergegeven in Figuur 48. Naast elk sample worden de gebruikte parameterwaarden vermeldt. De figuur maakt duidelijk dat bij een grotere energie hoeveelheid, grotere spanen voorkomen. Aangezien de MRR dan groter is, was dit te verwachten.



Figuur 48: Macroscopische samples spaananalyse

In Bijlage CCC worden de microscopische figuren van de vier verschillende samples weergegeven. Op elke figuur wordt de schaal aangeduid omdat deze niet overal dezelfde is. Voor het sample 13 A - 0,8 μ s worden hoofdzakelijk kleine individuele, korte vezels waargenomen. Het shock effect wordt bevestigd als optredend materiaalafnamemechanisme.

Het sample 13 A - 100 μ s bevestigt het materiaalafnamemechanisme waar een te grote pulsduur gebruikt wordt. De toegevoegde energie werkt in over een te grote materiaalzone, met als gevolg het optreden van smelt. Het kunststof aan oppervlaktelagen verdampt, terwijl in diepere lagen het kunststof aanwezig blijft en zorgt voor een isolerende werking (de verdamping hiervan wordt tegengehouden door bovenliggende smeltlagen). Dit zorgt ervoor dat enkele vezelbundels niet in elkaar versmelten, deze worden omringd door een gesmolten geheel. Dit fenomeen kan gezien worden in Bijlage DDD. De sterke afrondingen en vloeiende contourlijnen duiden op het plaatsvinden van de smeltfase, het grote spaandeeltje is zichtbaar op de linkse figuur van het desbetreffende sample. Het vertoont niet versmolten vezelmateriaal in het midden van de spaan. Iets zwaardere elementen kunnen maar moeilijk in één keer worden weggespoeld door het diëlektricum. Zo blijven deze te lang aanwezig in de vonkspleet waardoor deze de efficiëntie van het vonkproces verstoren. Bij nog hogere pulsduren kunnen deze voorkomen als een losse laag die zich op het werkstukoppervlak bevindt. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in Bijlage DDD. Hierop worden twee macroscopische figuren van dergelijke laag afgebeeld. Deze wordt gevormd bij een parameterinstelling van 33 A - 200 μ s. Op de figuren is een opstaande rand zichtbaar welke gevormd wordt langs de rand van de elektrode. De microscopische figuur in Bijlage DDD geeft een structuur weer met veel vloeiende lijnen en afrondingen. Hieruit volgt dat gesmolten vezelbundels worden weergegeven. De rechtse figuur van het sample 13 A - 100 μ s geeft een volledig versmolten geheel weer. Ook kleinere spaandeeltjes zoals in het vorige sample kunnen worden teruggevonden (niet weergegeven) omdat een parameterinstelling zorgt voor één hoofdzakelijk afnamemechanisme, aangevuld met de andere mechanismen die nog op kleine schaal voorkomen.

Vervolgens wordt de invloed van stroom nagegaan. Voor het sample 1 A - 12,8 μ s worden kleine vezelbundels waargenomen. De vezels zijn afzonderlijk zichtbaar, waardoor de bundels niet versmolten zijn. Ze worden in kleine hoeveelheden van het oppervlak afgenomen doordat het kunststof tussen de vezelbundels verdampt. De kleine hoeveelheden, kleine spaandeeltjes en nauwelijks waarneembare smelt zijn afkomstig van een te lage energetische parameterinstelling, de MRR is dan zeer laag.

De laatste sample aan 65 A - 12,8 μ s geeft spaandeeltjes weer van een goed afnamemechanisme, er worden volledig versmolten spaanpartikels teruggevonden. De massa van deze deeltjes is laag genoeg om onmiddellijk te worden weggespoeld, omdat de MRR en oppervlakteruwheid laag is en de machine een stabiel verloop geeft (Figuur 28). Zoals besproken treden de andere mechanismen eveneens op, maar minder uitgesproken dan het inwerkende hoofdmechanisme. Zie rechtse figuur in Bijlage CCC, hier worden spaandeeltjes afgebeeld welke gevormd worden door een

ander mechanisme. De spaananalyse geeft een duidelijk beeld van de gevormde deeltjes. Het zorgt voor een goede bevestiging van eerdere verklaringen i.v.m. optredende materiaalafnamemechanismen.

4.2.5 Invloed van polarisatie

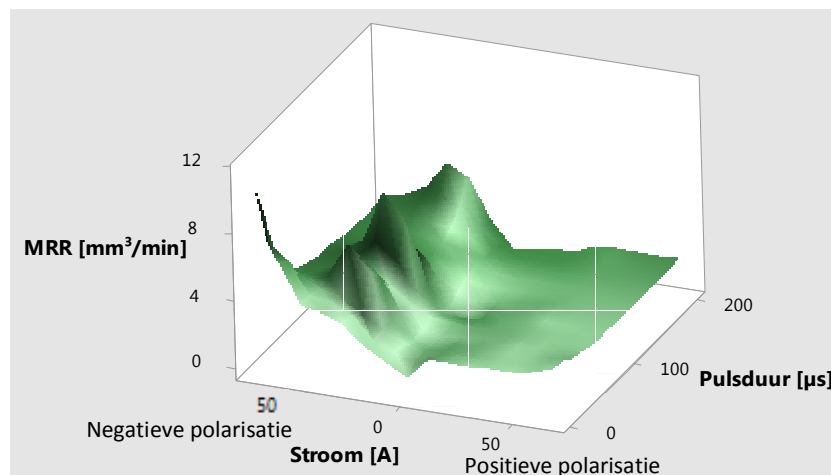
Alle 30 testen uit 4.2.1 Hoofdexperimenten worden opnieuw uitgevoerd aan 80 V, waardoor de elektrode positief is en het werkstuk negatief. Opnieuw komen testen voor die niet kunnen worden uitgevoerd omwille van veiligheidsvoorzorgen of omdat de parametercombinaties niet voorkomen. Het gaat over dezelfde falende parametercombinaties zoals gezien in 4.2.1. Het doel van deze testen is tweezijdig: Enerzijds kan de invloed van polarisatie op het vonken van CFRP worden nagegaan. De uitgangsgrootheden met de testen aan -80 V worden vergeleken (MRR, Ra en S). Anderzijds kan worden nagegaan of in 4.1 Planning experimenteel onderzoek de juiste keuze i.v.m. polariteit werd gemaakt, op basis van twee testen (80 V en -80 V aan 65 A - 6,4 μ s) werd bepaald dat negatieve polarisatie zorgt voor maximale MRR. De numerieke resultaten van de testen aan 80 V worden weergegeven in Bijlage EEE. Om de omvang van deze thesis binnen de voorziene grootte te beperken, worden materiaalkundige vergelijkingen en analyses op de experimenten met positieve polarisatie niet uitgevoerd. Door de polariteitsomwisseling werken ionen in op het werkstuk terwijl elektronen op het elektrode oppervlak inwerken, zoals beschreven in 4.1.2 Polariteit en spanning. Door de omgekeerde werking wordt meer smelt verwacht door mindere aanwezigheid van het shock effect, wat positieve invloeden kan hebben op de oppervlakteruwheid en randkwaliteit. Het verschil in MRR tussen testen aan tegenstrijdige polariteit is moeilijk te voorspellen.

Een extra analyse wordt aan de testreeks toegevoegd. De elektrodeslijtage wordt opgemeten door voor en na elke test de massa van de elektrode op te meten. Het gebruikte meetinstrument bevat een aflezing tot 0,0001 g (Bijlage FFF). Telkens worden drie metingen uitgevoerd om een nauwkeuriger resultaat te verkrijgen. Uit het gemiddelde van deze drie metingen wordt de elektrodeslijtagerate (EWR) berekend (zie Bijlage EEE) waardoor de procentuele massavermindering van de elektrode per experiment wordt weergegeven. Uit de resultaten wordt duidelijk dat EWR stijgt met toenemende stroom (van min. 0,00004 % tot max. 0,00173 %). Het resultaat is logisch aangezien er meer elektronen inwerken op de elektrode. Ook wordt opgemerkt dat de elektrodeslijtage erg laag blijft waardoor deze moeilijk visueel waarneembaar is omdat tot slechts 1 mm diep wordt bewerkt. De resultaten van EWR moeten met de nodige voorzichtigheid geëvalueerd worden. Na elke test wordt de elektrode gereinigd met staalwol. Bij deze reiniging worden kleine hoeveelheden elektrodemateriaal afgenomen (tot 0,0001 g), wat resulteert in resultaten met variatie afhankelijk van de reinigingsduur. Een oplossing is om de elektrode door spoeling ultrasoon te reinigen na elk experiment, zo wordt geen elektrode materiaal afgenomen. De invloed van reinigen met staalwol wordt te laat opgemerkt. In een volgend onderzoek kunnen deze testen hervat worden met aangepaste reinigingsmethode. Het niet reinigen van elektrodes wordt afgeraden omdat testen dan onderling worden beïnvloed. De elektrodeslijtage zal dan ook afhankelijk zijn van de hoeveelheid materiaal die achterblijft op de elektrode uit een

vorig experiment, deze hoeveelheid is verschillend per test. Bovenstaande uitleg zorgt ervoor dat enkel invloed van stroom waarneembaar is. Een trend die wijst op de invloed van pulsduur is niet zichtbaar omdat de invloed hiervan vermoedelijk kleiner is dan de invloed van stroom. Deze kleinere invloed wordt verstoord door de elektrodereiniging.

Invloed van polarisatie op MRR

In Figuur 49 wordt de invloed van polarisatie op MRR weergegeven. In deze figuur zijn zowel de testen op 80 V als op - 80 V aangeduid met de vermelding 'positieve polarisatie' en 'negatieve polarisatie'.

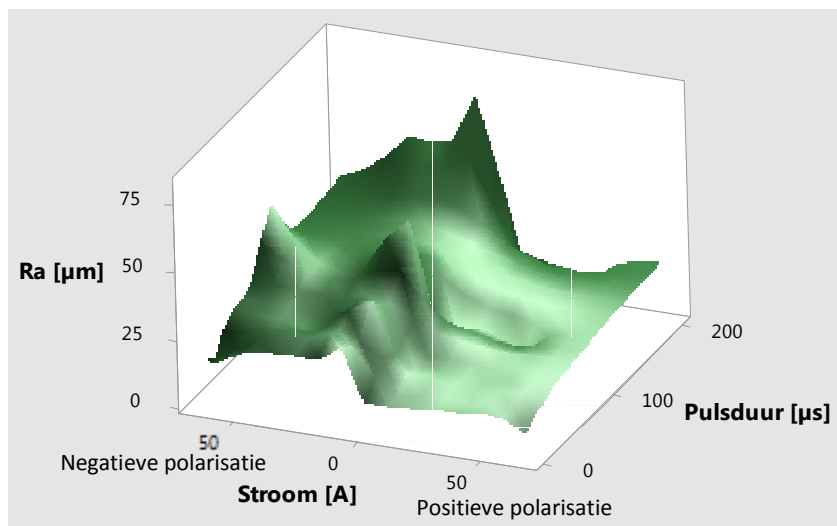


Figuur 49: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op MRR

De figuur geeft weer dat een negatieve polarisatie een hogere MRR veroorzaakt. Hieruit wordt bevestigd dat de keuze om de hoofdtesten aan -80 V uit te voeren correct is. De maximale MRR voor -80 V is 11,22 mm³/min terwijl deze bij 80 V slechts 2,91 mm³/min bedraagt. Ook bij 80 V stijgt de MRR met stijgende stroomsterkte (in grote lijnen), terwijl de pulsduur een minder uitgesproken effect uitoefent. De reden hiervoor is dat het shock effect in mindere mate optreedt. Materiaal wordt voornamelijk afgenomen door smelten welke vooral beïnvloed wordt door de stroom.

Invloed van polarisatie op oppervlakteruwheid

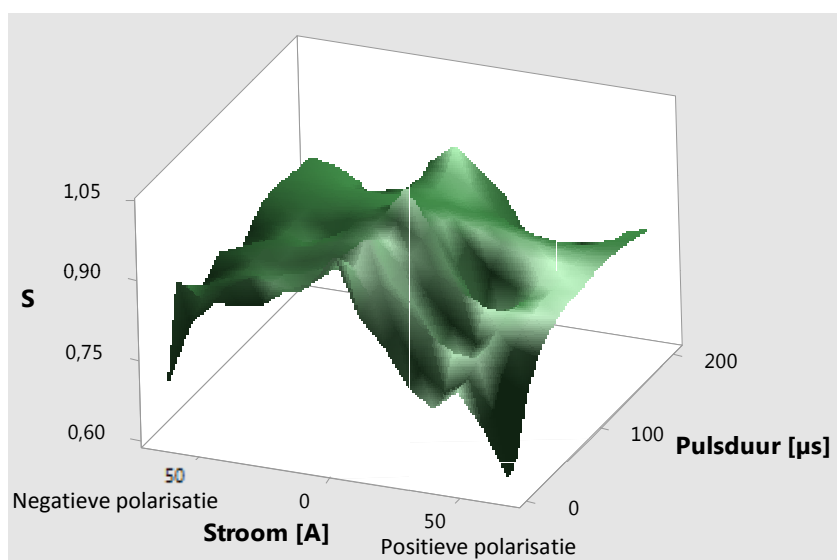
In Figuur 50 wordt de invloed op oppervlakteruwheid weergegeven. Deze is beduidend lager voor een positieve polarisatie. Een verwacht resultaat omdat smelt voor een kleinere ruwheid zorgt, het oppervlak stolt simultaan door de spoeling van het diëlektricum. De kleinste waargenomen ruwheid bedraagt 5 µm aan 80 V, terwijl deze 9 µm bedraagt bij -80 V.



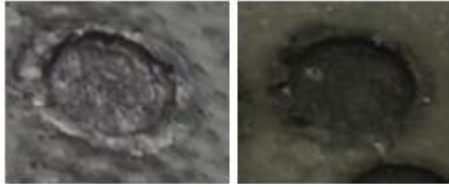
Figuur 50: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op oppervlakterutheid

Invloed van polarisatie op randkwaliteit

Figuur 51 geeft de invloed van polarisatie op randkwaliteit weer door het opmeten van de schadefactor S . De randkwaliteit voor testen aan 80 V vertonen grote gelijkenissen met deze aan -80 V. Een logisch gevolg aangezien een gelijke energiehoeveelheid inwerkt op de rand van de samples. Toch ziet de bewerkte werkstukrand er visueel meer aangetast uit voor negatieve polarisatie. Door de elektronenstroom brengt het shock effect een meer uitgesproken uitwerking teweeg, terwijl positieve polarisatie een duidelijker smeltkarakter als afnamemechanisme bepaalt. De rand wordt bij beide mechanismen even diep aangetast. Toch zorgt het shock effect voor een randafwerking met meer delaminatie door het bros uitbreken van de koolstofvezels. Figuur 52 geeft het verschil in randkwaliteit weer tussen twee samples aan identieke parameterinstellingen met tegengestelde polarisatie.



Figuur 51: Invloed van polarisatie (80 V vs. -80 V) op de randkwaliteit



Figuur 52: Randkwaliteit (links: 33 A, 100 μ s, -80 V; rechts: 33 A, 100 μ s, 80 V)

4.2.6 Invloed van elektrode materiaal

De invloed van een grafietelektrode wordt getest. De parameterinstellingen en resultaten voor MRR, Ra en S worden weergegeven in Bijlage GGG. In deze bijlage worden eveneens de resultaten voorgesteld van overeenkomstige testen met een koperelektrode. Er worden vier testen met een grafietelektrode uitgevoerd, om de invloed van stroom en pulsduur te onderzoeken. Het valt op dat alle resultaten afkomstig van de grafietelektrode gelijkaardig of minderwaardig zijn t.o.v. het gebruik van een koperelektrode. Zo is niet enkel de MRR lager, ook de oppervlakteruwheid en schadefactor zijn van mindere kwaliteit. Dit in tegenstelling tot [11] waar een grafietelektrode enkel voor hogere elektrodeslijtage en een lagere oppervlakteruwheid zorgt (bij het bewerken van CFRP). Het effect van lagere MRR is het omgekeerde dan wordt waargenomen bij het bewerken van staal met grafiet [25], waarbij de elektrode eveneens negatief wordt gepolariseerd. De verklaring voor de mindere resultaten omdat koolstof door koolstof wordt bewerkt, zowel het CFRP als grafiet bevatten een hoog percentage koolstof. Verder onderzoek is nodig om de precieze oorzaak van de optredende resultaten te verklaren.

4.3 Pulsmonitoring

In dit hoofdstuk wordt pulsmonitoring toegepast om een beter idee te krijgen van het verloop van spanning en stroom tijdens machinewerking. Naast de grafische bloksignalen wordt nagegaan of deze overeenkomen met de ingestelde machineparameters. De analyse wordt uitgevoerd voor vier parameterinstellingen. Aan 1 en 33 A -12,8 μ s waarbij de stroom een wijziging ondergaat. De andere twee experimenten worden uitgevoerd aan 3,2 en 100 μ s - 13 A, waarbij de pulsduur wordt gevarieerd. De kleinst mogelijk optredende periode bedraagt 3,2 μ s (indien de pulsintervaltijd voldoende hoog blijft). Hiervoor is een meettoestel nodig dat signalen tot minimum 3,2 MHz kan opmeten. De te gebruiken oscilloscoop (Tektronix oscilloscope TDS210) kan signalen tot 60 MHz opmeten en wordt daarom geschikt geacht.

4.3.1 Stroom en spanningspulsen

De Stroompulsen worden opgemeten met een stroomtang. Deze tang wordt aangewend op een stroomdraad verbonden met de elektrode. De stroomtang bezit

een convertieratio waarbij 100 mV overeenkomt met 1 A. De resultaten van de verschillende metingen worden weergegeven in Bijlage HHH (Figuur a, b, c en d). De stroom komt voor elke meting goed overeen met de ingestelde waarde. De bovenste flank van de blokpulsen vertonen een ruiswaarde. Deze ruiswaarde is sterker aanwezig bij hogere pulsduur omdat het plasmakanaal over langere duur blootgesteld wordt aan omgevingsinvloeden. Indien de blokvormen met Figuur 4 (literatuur) worden vergeleken dan worden sterke overeenkomsten opgemerkt. Ook de beginafrondding van de bovenflank van een stroompuls wordt waargenomen. Deze afronding omdat het plasmakanaal geleidelijk aan gevormd wordt. De ingestelde pulsduur komt exact overeen met de ingestelde waarde. Hieruit volgt dat parameters door de machine nauwkeurig worden geïmplementeerd. De ingestelde parameterwaarden geven een betrouwbare weerspiegeling van de werkelijk optredende waarden.

In Bijlage HHH wordt in Figuur e getracht om spanningspulsen op te meten (oranje curve). De meetprobes van de oscilloscoop wordt verbonden met de elektrode en machinebed. Om geen verwarring te creëren en om resultaten goed te vergelijken met Figuur 4, worden stroomtang en spanningsprobes zo geplaatst zodat de metingen steeds positief zijn. Bij het aansluiten van de spanningsmeting verandert het bloksignaal van de stroom in een andere vorm. Ook het vonkproces wordt instabiel en er wordt nauwelijks materiaal afgenomen. Door de grote ingangsimpedantie van de oscilloscoop wordt het servo-systeem van de machine misleid. De vonkspleet neemt een foutieve waarde aan waardoor het vonkproces niet goed verloopt. Er wordt een spanning gemeten die niet meer overeenkomt met het originele proces bij normale werking. De methode gebruikt voor de spanningsmeting is niet geschikt.

4.4 Besluit

De hoofdintentie van deze thesis is om optredende materiaalafnamemechanismen te onderzoeken. Deze kunnen enkel worden geanalyseerd wanneer deze vooraf worden gegaan aan een goede planningsfase, met juiste keuzes van factor en levelwaarden. Deze planningsfase kan correct worden geacht aangezien vier mechanismen worden opgemerkt die door het materiaalkundig onderzoek telkens opnieuw worden bevestigd.

Het optimale materiaalafnamemechanisme is één van de vier mogelijke mechanismen dat kan optreden, wat wil zeggen dat net voldoende energie inwerkt om materiaal los te smelten (optimale combinatie stroom-pulsduur). De smeltzone is niet te groot waardoor materiaaldelen een voldoende kleine massa bezitten om onmiddellijk weggespoeld te worden. Wat overblijft, is een recast layer, een hardere laag dan omliggend werkstukmateriaal, door de versmolten koolstofvezels. Bij elke stroomwaarde kan een pulsduur gevonden worden die resulteert in een optimaal mechanisme wat zorgt voor een optimale MRR, Ra en S (zie Tabel 17). Als tweede mechanisme is er het shock effect, vergelijkbaar met het vonkmechanisme dat

gebruikt wordt om geleidende technische keramieken te bewerken. Hierbij breken koolstofvezels op een brosse manier uit, door de korte pulsduur en hoge stroomsterkte. Dit fenomeen wordt zeer goed waargenomen met een SEM analyse van het bewerkte oppervlak (Bijlage TT). Vervolgens resteren nog twee materiaalafnamemechanismen die zorgen voor een traag of instabiel vonkproces. Een eerste soort is diegene waar de toegevoerde energie te laag is om efficiënt materiaal af te nemen. Behalve een dunne laagdikte van de warmte beïnvloede zone resulteert dit mechanisme eveneens in kleine niet versmolten spaandeeltjes. De tweede soort is waarbij een te hoge pulsduur gebruikt wordt. De toegevoegde energie werkt in over een te grote materiaalzone. Hierdoor treedt smelt op. Het kunststof aan oppervlaktelagen verdampt. Terwijl deze in diepere lagen aanwezig blijft en zorgt voor een isolerende werking. Enkele vezelbundels kunnen hierdoor niet in elkaar versmelten, deze worden omringd door een gesmolten geheel. Een fenomeen dat eveneens kan worden opgemerkt a.d.h.v. de spaanalyse (Bijlage DDD).

Om een optimale vonktechnologie te bepalen voor het CFRP worden bijkomstige experimenten uitgevoerd. De technologie die een maximale MRR ($6,55 \text{ mm}^3/\text{min}$) met aanvaardbare ruwheid ($R_a = 9 \text{ }\mu\text{m}$) en randkwaliteit ($S = 0,908$) bepaalt heeft een stroom van 65 A en pulsduur van 12,8 μs . De technologie voor een optimale ruwheid ($R_a = 8 \text{ }\mu\text{m}$) met aanvaardbare MRR ($2,98 \text{ mm}^2/\text{min}$) en randkwaliteit ($S = 0,921$) bezit een stroom van 13 A en een pulsduur van 3,2 μs . Deze parameterinstellingen worden telkens gebruikt bij een spanning van -80 V aangevuld met parameters uit Bijlage GG.

De verschillende EDX analyses bevestigen de literatuur, hierbij worden koper deeltjes afkomstig van de elektrode waargenomen in het bewerkte oppervlak. Deze worden meegenomen met de elektronen welke zorgen voor de materiaalafname aan de anode. Hoe groter de ingestelde energiehoeveelheid hoe meer koperdeeltjes in het oppervlak worden waargenomen. Ook de invloed van diëlektricum wordt in het bewerkte oppervlak waargenomen.

Alle 30 hoofdexperimenten worden herhaald met een positieve polarisatie. Hierbij worden een lagere MRR, lagere ruwheid en ongeveer gelijkmatige randkwaliteit opgemerkt t.o.v. negatieve polarisatie. Vier testen worden uitgevoerd met een grafielektrode. Deze bepalen voor elke uitgangsgrootheid gelijke of minderwaardige resultaten t.o.v. gebruik van een koperelektrode. Tot slot worden stroompulsen nagegaan met pulsmonitoring. Deze experimenten bevestigen een nauwkeurige uitvoering van de ingestelde parameters door de machine. De pulsvorm vertoont sterke overeenkomsten met deze uit de literatuur voor EDM toegepast op metalen.

Hoofdstuk 5: Besluit

De geringe literatuur die beschikbaar is over EDM van CFRP, geeft weer dat CFRP goed vonkbaar is indien aangepaste parametercombinaties worden gebruikt. Er worden slechts vier papers gevonden met relevante resultaten afkomstig van verschillende soorten koolstofcomposiet. De literatuur wordt gebruikt ter inleiding van het onderzoek. De informatie hieruit wordt vaak niet onderbouwd of verklaard waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten in vraag kan gesteld worden.

De doelstelling van deze thesis omvat onderzoek naar materiaalkundige fenomenen die optreden bij het zinkvonken van industrieel gebruikt CFRP. Deze analyse wordt vervolgens gebruikt om de verkregen resultaten te onderbouwen. Bijkomende experimenten worden uitgevoerd om een optimale vonktechnologie te ontwikkelen voor het desbetreffende CFRP. Daarnaast worden verschillende invloeden van uiteenlopende parameters geanalyseerd (polarisatie, elektrodemateriaal ...). In wat volgt zal de realisatie van deze doelstellingen beknopt worden weergegeven.

De doorgronding van de machine zorgt voor het gebruik van additionele functionaliteiten die het onderzoek kunnen helpen. Zo wordt 'pilot expert II' ingeschakeld om de parameters zoals pulsintervaltijd, pulsatie, RF en SV automatisch te regelen. Weerstandsmetingen bepalen dat het te onderzoeken CFRP een weerstand bezit van $0,01 \Omega\text{cm}$. Dit is orde 10^{-4} onder de nodige $100 \Omega\text{cm}$, deze bovengrens wordt voor geleidende technische keramieken in [1], [2] bepaald. Inleidende experimentele testen bepalen dat het industrieel CFRP bewerkbaar is met EDM. Verder wordt in een inleidende onderzoeksfase bepaald welke materiaalkundige analyses nuttig en bruikbaar zijn om resultaten voldoende te onderbouwen. Zo worden microscopische en SEM analyses gemaakt van doorsneden en van het bewerkt oppervlak. Twaalf samples met sterk verschillende stroom en pulsduur worden in een volgend onderzoek gebruikt om de invloed van deze parameters te kunnen nagaan. Vervolgens worden EDX analyses van deze doorsneden en bewerkte oppervlakken uitgevoerd om de samenstelling van het bewerkt materiaal te achterhalen. Een laatste materiaalkundig onderzoek bepaalt in welke vorm materiaal wordt afgenomen d.m.v. het uitvoeren van een spaanalyse.

In de experimentele onderzoeksfase bepalen 30 testen met verschillende stroom en pulsduur (elektrode negatief) drie uitgangsgrootheden: Materiaalafnameratio (MRR), de oppervlakteruwheid (Ra) en de randkwaliteit (S). Zo wordt waargenomen

dat een hogere stroom en/of pulsduur resulteert in een hogere MRR en slechtere randkwaliteit. Hierbij zorgt de stroom voor de grootste invloed (stroom is significant). Een hogere stroom in combinatie met hogere pulsduur zorgen voor een hogere oppervlakteruwheid. De stroom oefent quasi evenveel invloed uit op de oppervlakteruwheid als de pulsduur (stroom en pulsduur zijn significant). Verder wordt het gebruik van één replica in een statistische analyse verantwoord geacht. Ondanks de hierboven vermelde algemene trends waarvoor stroom en pulsduur verantwoordelijk zijn, wordt per stroomsterkte een optimale pulsduur gevonden. Deze combinatie van stroom en pulsduur zorgen voor een optimale waarde van MRR, oppervlakteruwheid en randkwaliteit omdat dan een optimaal materiaalafnamemechanisme inwerkt op het CFRP.

De kwantitatieve resultaten (MRR, Ra en S) worden verklaard vanuit materiaalkundig standpunt. Deze verklaringen worden in het materiaalonderzoek bevestigd. Zo worden vier mogelijke optredende materiaalafnamemechanismen waargenomen, het optimale materiaalafnamemechanisme is hier één van: Er werkt net voldoende energie in om materiaal efficiënt los te smelten (optimale combinatie stroom - pulsduur). Als tweede mechanisme is er het shock effect, hierbij breken koolstofvezels uit door de korte pulsduur en hoge stroomsterkte. Vervolgens resteren nog twee mechanismen die zorgen voor een traag of instabiel vonkproces. Een eerste soort is diegene waar de toegevoerde energie te laag is om efficiënt materiaal af te nemen. De tweede soort is waarbij een te hoge pulsduur gebruikt wordt. Het gevolg is het smelten van te grote vezelbundels met te grote massa. Deze bundels worden niet onmiddellijk afgevoerd waardoor deze aanwezig blijven in de vonkspleet en het verdere proces hinderen. Al deze mechanismen komen in verschillende analyses voor waardoor deze het ontstaan hiervan steeds verduidelijken en bevestigen.

Een optimale vonktechnologie wordt gevonden naar maximale MRR (65 A -12,8 μ s) en minimale Ra (13 A - 3,2 μ s), door het uitvoeren van extra experimenten. De hoogste MRR die gevonden wordt bedraagt 11,2 mm³/min wat overeenkomt met een MAS van 0,14 mm/min. In vergelijking met de literatuur (vier papers) is dit de derde hoogst voorkomende waarde. EDX analyses van het bewerkt oppervlak bevestigen de literatuur: Koperdeeltjes afkomstig van de elektronen komen voor in het werkstukoppervlak, de hoeveelheid verhoogt indien een hogere energie intensiteit wordt ingesteld. De EDX analyse bevestigt eveneens de aanwezigheid van diëlektricum in het bewerkt oppervlak. Het dient verder onderzocht te worden of de invloed van diëlektricum en aanwezigheid van koperdeeltjes zorgen voor andere materiaaleigenschappen. Alle hoofdexperimenten worden herhaald met een positieve elektrode wat zorgt voor een lagere MRR, lagere Ra en gelijkwaardige S-waarde. Elektrodeslijtage wordt niet voldoende onderzocht, dit kan gebeuren in toekomstig onderzoek. Het gebruik van een grafietelektrode zorgt voor minderwaardige uitgangsgrootheden, de verklaring hiervan dient verder onderzocht te worden. Tot slot zorgt pulsmonitoring voor een bevestiging van een nauwkeurige uitvoering van de ingestelde parameters door de machine.

Bijlagen

Bijlage A: Datasheet van het gebruikte prepreg afkomstig van Cytec

> CYCOM[®] 977-2 EPOXY RESIN SYSTEM

TECHNICAL DATA SHEET



DESCRIPTION

CYCOM[®] 977-2 is a 350°F (177°C) curing toughened epoxy resin with a 260 – 280°F (126 – 138°C) dry and 220°F (104°C) wet service capability. CYCOM 977-2 is formulated for autoclave or press molding. Unidirectional tape and woven fabric impregnated with CYCOM 977-2 resin will retain tack for at least 10 days at 72°F (22°C) and has a long mechanical out life suitable for fabrication of large structures.

The recommended lay-up procedure for this material is L-15. The recommended cure is C-50.

FEATURES & BENEFITS

- Toughened epoxy using Cytec Engineered Materials' proprietary "co-continuous" morphology
- 350°F (177°C) cure
- Available in a broad range of fibers and forms including tape, fabric and roving
- Excellent impact resistance
- Controlled flow
- 260 – 280°F (126 – 138°C) dry and 220°F (104°C) wet service temperature
- Autoclave or press mold processing
- Shelf life of 12 months at 0°F (-18°C), 42 days at 72°F (22°C)

SUGGESTED APPLICATIONS

- Aircraft primary and secondary structure
- Space structure
- Ballistics
- Cryogenic tanks
- Any application where impact resistance and light weight are required

> CYCOM[®] 977-2 EPOXY RESIN SYSTEM

TECHNICAL DATA SHEET

CHARACTERISTICS & PROPERTIES

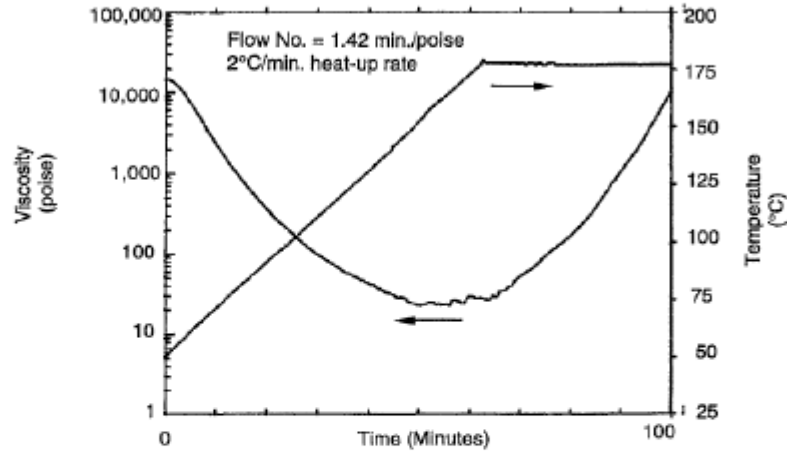


Figure 1 | Viscosity Profile: Straight Heat-up Cure Cycle to 350°F (177°C)

Table 1 | Typical Neat Resin Properties at Room Temperature

Tensile Strength, ksi (MPa)	11.8 ± 1.6 (81.4 ± 11)
Tensile Modulus, msi (GPa)	0.51 ± 0.02 (3.52 ± 0.14)
Flexural Strength, ksi (MPa)	28.6 ± 1.0 (197 ± 7)
Flexural Modulus, msi (GPa)	0.50 ± 0.01 (3.45 ± 0.07)
G ₁₀ , in-lb/in ² (J/m ²)	2.73 ± 0.48 (478 ± 84)
K ₁₀ , ksi-in ^{1/2} (MPa-m ^{1/2})	1.34 ± 0.15 (1.22 ± 0.14)
T _g , °C (RDS, 10°C/minute) *	212
Density, g/cc	1.31

* **NOTE:** T_g data is not applicable for U.S. export control classification or licensing. For export-related information please contact us.

> CYCOM[®] 977-2 EPOXY RESIN SYSTEM

TECHNICAL DATA SHEET

Table 2 | Typical Properties of 977-2 Composite Laminates
Intermediate Modulus [40 msi (276 GPa) Class] Carbon Fiber Reinforced Unidirectional Tape
Typical Cytec Engineered Materials Product Codes: Hy-E 1377-2T, Hy-E 1577-2E, Hy-E 5377-2A

Mechanical Property	-65°F (-55°C)	Room Temperature	180°F (82°C)	180°F (82°C) Wet ¹
0° Tensile Properties				
Strength, ksi (MPa)	390 (2690)	390 (2690)	-	-
Modulus, msi (GPa)	24.0 (165)	24.0 (165)	-	-
0° Compression Properties				
Strength, ksi (MPa)	-	230 (1580)	210 (1450)	180 (1240)
Modulus, msi (GPa)	-	22.0 (152)	22.0 (152)	22.0 (152)
Quasi Compression After Impact (1500 in-lb/in impact)				
Strength, ksi (MPa)	-	38 (262)	-	-
Quasi Open Hole Compression				
Strength, ksi (MPa)	-	45 (310)	39 (269)	37 (255)
Quasi Open Hole Tensile				
Strength, ksi (MPa)	-	65 (448)	-	-

¹ Wet: 7 day water immersion at 165°F (74°C)

Property values listed are typical for laminates with 57 to 63% fiber volume. All testing per BMS 8-276

Cure: 3 hours at 355°F (180°C)

UNCURED PREPREG PHYSICAL PROPERTIES (for information only)

Prepreg mass per unit area	g/m ²	294 ± 20
Fiber mass per unit area	g/m ²	194 ± 8
Resin content	% by mass	34 ± 2.5
Resin flow	%	20 ± 7
Volatile content	%	≤ 2
Tackiness	-	Low to medium

CURED PREPREG PROPERTIES (for information only)

Cured ply thickness	mm	0.186 ± 0.007
Fiber volume fraction	%	60 ± 4
Wet service temperature	°C	-55 to +105

PREPREG PROCESSING REQUIREMENTS (for information only)

Cure temperature	°C	180 nom +10 / -5
Cure pressure	kPa	150 - 1100

> CYCOM[®] 977-2 EPOXY RESIN SYSTEM

TECHNICAL DATA SHEET

PRODUCT HANDLING AND SAFETY

Cytec Engineered Materials recommends wearing clean, impervious gloves when working with epoxy resin systems to reduce skin contact and to avoid contamination of the product.

Materials Safety Data Sheets (MSDS) and product labels are available upon request and can be obtained from any Cytec Engineered Materials Office.

DISPOSAL OF SCRAP MATERIAL

Disposal of scrap material should be in accordance with local, state, and federal regulations.

CONTACT INFORMATION

GLOBAL HEADQUARTERS

Tempe, Arizona
tel/ 480.730.2000
fax 480.730.2088

NORTH AMERICA

Olean, New York
tel/ 716.372.9650
fax 716.372.1594

Springfield, Massachusetts
tel/ 1.800.253.4078
fax 716.372.1594

Havre de Grace, Maryland
tel/ 410.939.1910
fax 410.939.8100

Winona, Minnesota
tel/ 507.454.3611
fax 507.452.8195

Anaheim, California
tel/ 714.630.9400
fax 714.666.4345

Orange, California
tel/ 714.639.2050
fax 714.532.4096

Greenville, Texas
tel/ 903.457.8500
fax 903.457.8598

Cytec Carbon Fibers LLC
Piedmont, South Carolina
tel/ 864.277.5720
fax 864.299.9373

D Aircraft Products, Inc.
Anaheim, California
tel/ 714.632.8444
fax 714.632.7164

EUROPE AND ASIA

Wrexham, United Kingdom
tel/ +44.1978.665200
fax +44.1978.665222

Ostringen, Germany
tel/ +49.7253.934111
fax +49.7253.934102

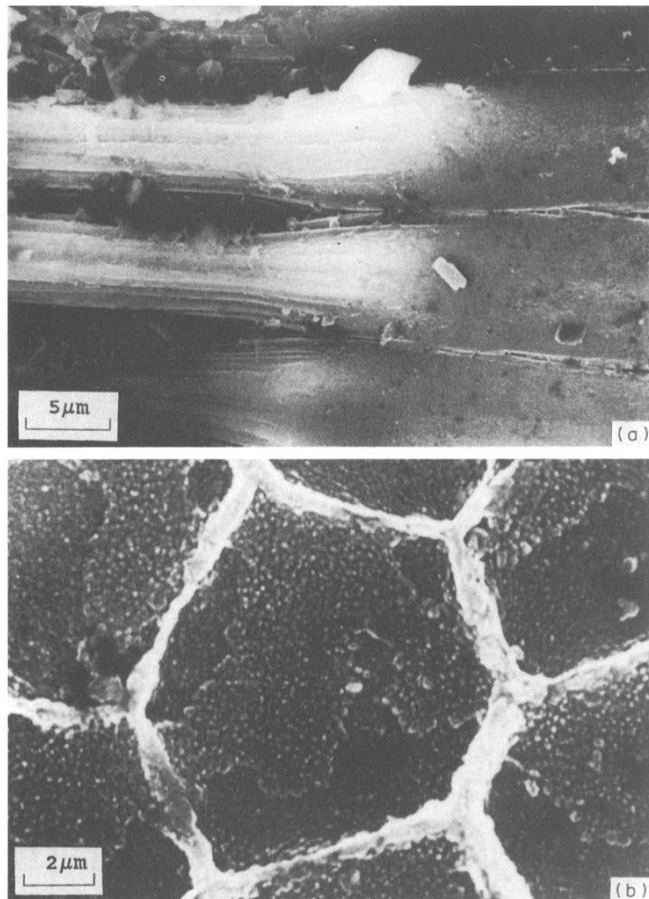
Shanghai, China
tel/ +86.21.5746.8018
fax +86.21.5746.8038

DISCLAIMER: The data and information provided in this document have been obtained from carefully controlled samples and are considered to be representative of the product described. Cytec Engineered Materials (CEM) does not express or imply any guarantee or warranty of any kind including, but not limited to, the accuracy, the completeness or the relevance of the data and information set out herein. Because the properties of this product can be significantly affected by the fabrication and testing techniques employed, and since CEM does not control the conditions under which its products are tested and used, CEM cannot guarantee that the properties provided will be obtained with other processes and equipment. No guarantee or warranty is provided that the product is adapted for a specific use or purpose and CEM declines any liability with respect to the use made by any third party of the data and information contained herein. CEM has the right to change any data or information when deemed appropriate.

All trademarks are the property of their respective owners.

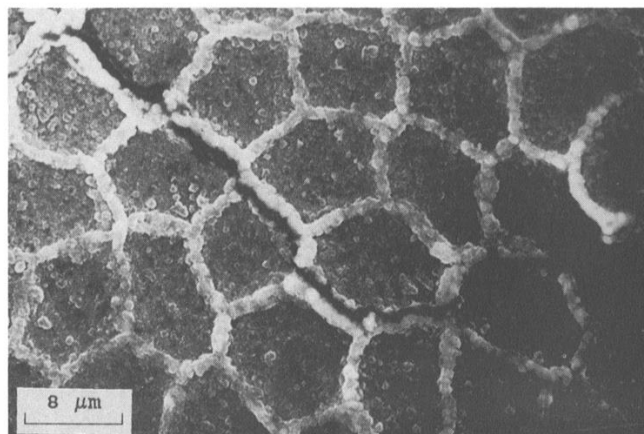
Bijlage B: SEM figuren bij een stroomsterkte van 1,5 A [11]

Figuur (a) geeft weer dat de vezels uitzetten aan hun uiteinden door de toevoeging van thermische energie. Figuur (b) geeft weer dat de vezels een hexagonale vorm hebben. Hiervoor wordt er geen verklaring vermeldt. Op de witte zones is het polymeer tussen de vezels zichtbaar.



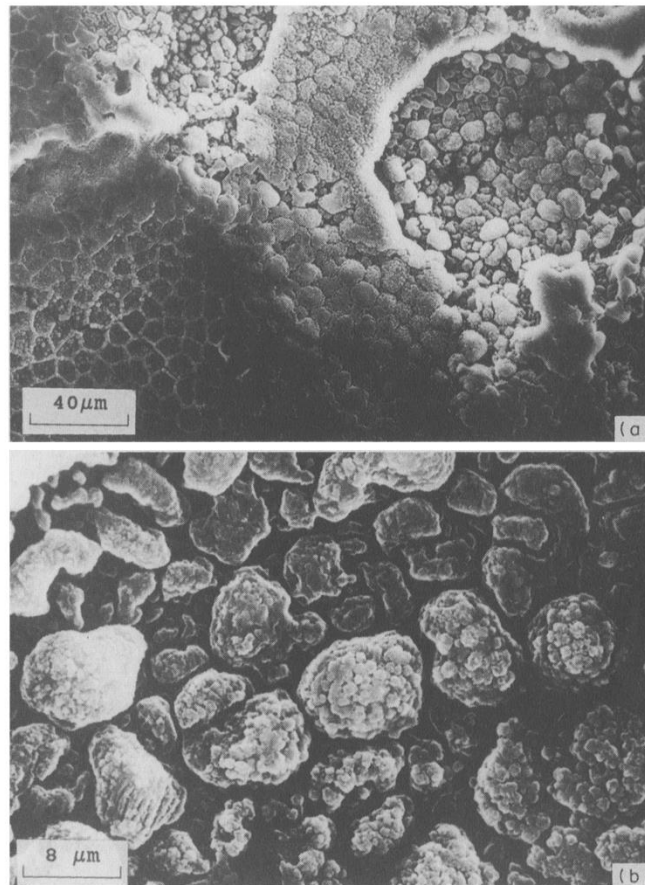
Bijlage C: SEM figuur bij een stroomsterkte van 1,5 A [11]

De figuur geeft een doorsnede van het werkstuk weer. Een breuklijn tussen de vezels is zichtbaar.



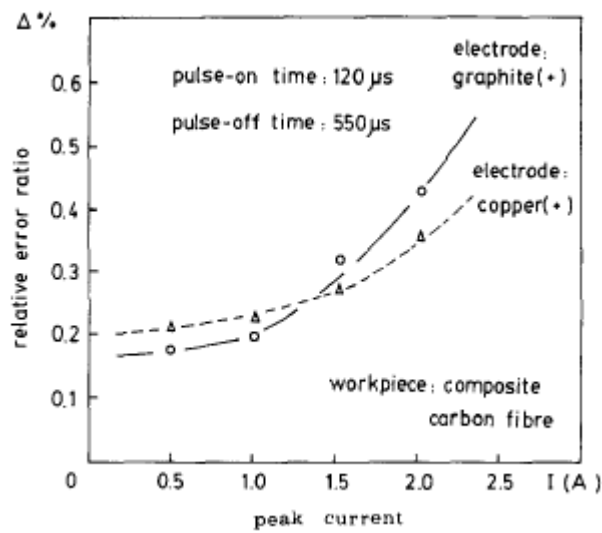
Bijlage D: SEM figuren bij een stroomsterkte van 1,5 A [11]

Beide figuren geven de doorsnede weer van het werkstuk in de buurt van het bewerkt oppervlak. Links op figuur (a) is een onaangetaste vezelstructuur zichtbaar. Rechts op de figuur zijn meer versmolten vezelbundels zichtbaar. Figuur (b) geeft een vergroting van figuur (a) weer. Deze figuur geeft een beter beeld van gestolde vezelbundels in de buurt van het oppervlak.



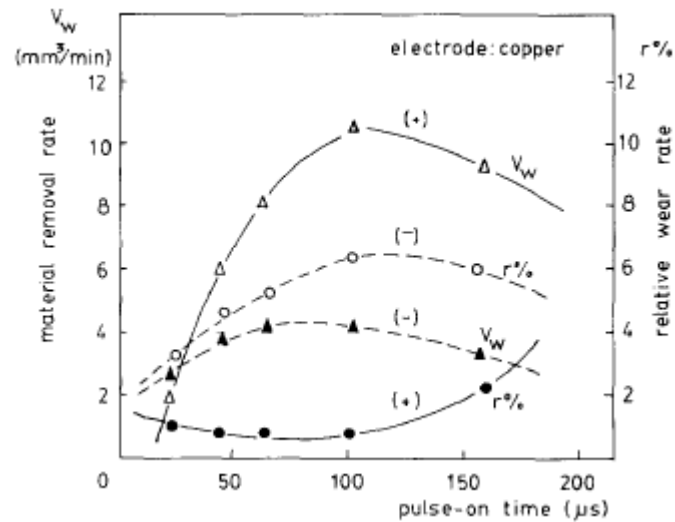
Bijlage E: Effect van stroomsterkte en soort elektrode op de dimensionele nauwkeurigheid van het werkstuk. [11]

De figuur geeft weer dat de dimensionele onnauwkeurigheid tot 1 A slechts ~0,2 % bedraagt. Verhoging van de stroomsterkte zorgt voor een toenemende onnauwkeurigheid, waarbij deze voor een grafietelektrode steiler verloopt.



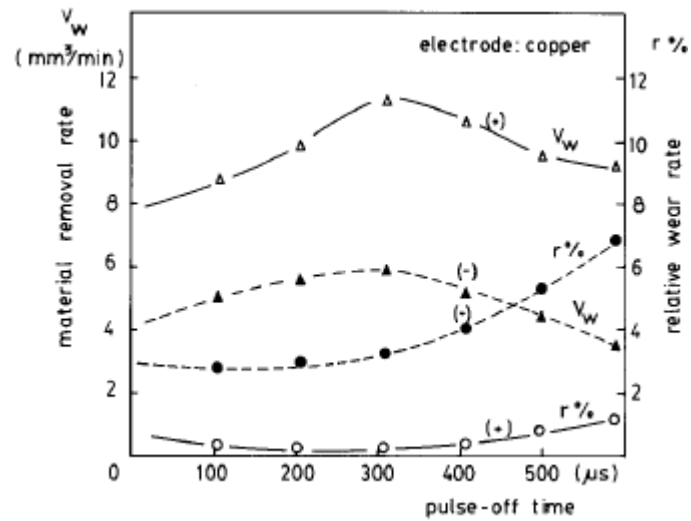
Bijlage F: Effect van pulsduur en polariteit op MRR en EWR ($I = 1 \text{ A}$; $t_{\text{off}} = 550 \text{ } \mu\text{s}$). [11]

De figuur geeft weer dat een positief gepolariseerde elektrode zorgt voor een grotere MRR. Bij een pulsduur van $100 \text{ } \mu\text{s}$ is er een maximale MRR van $10 \text{ mm}^3/\text{min}$. Voor een negatief gepolariseerde elektrode is de elektrodeslijtageratio maximaal bij $100 \text{ } \mu\text{s}$. Voor een positief gepolariseerde elektrode kan dus een optimale MRR en EWR gevonden worden bij één bepaalde pulsduur.



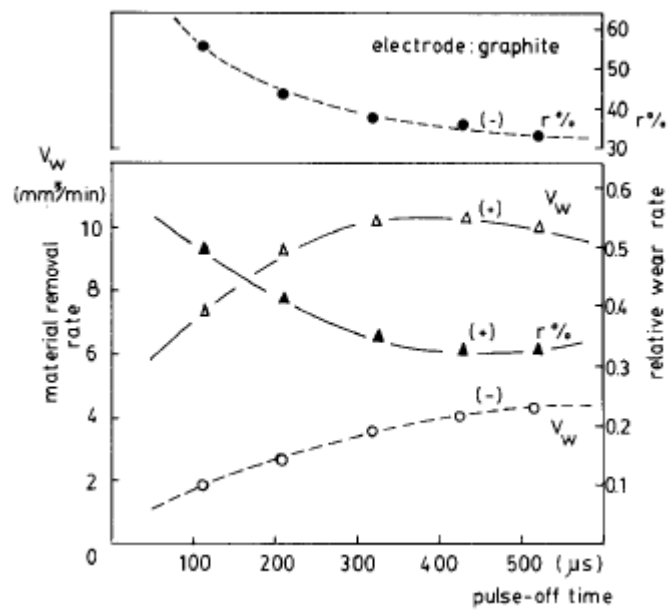
Bijlage G: Effect van pulsintervaltijd en polariteit op MRR en EWR voor een koperelektrode ($I = 1A$, $t_{on} = 120\mu s$). [11]

Er bestaat een optimale pulsintervaltijd waarbij de MRR maximaal is en waarbij de EWR minder dan 1 % bedraagt.



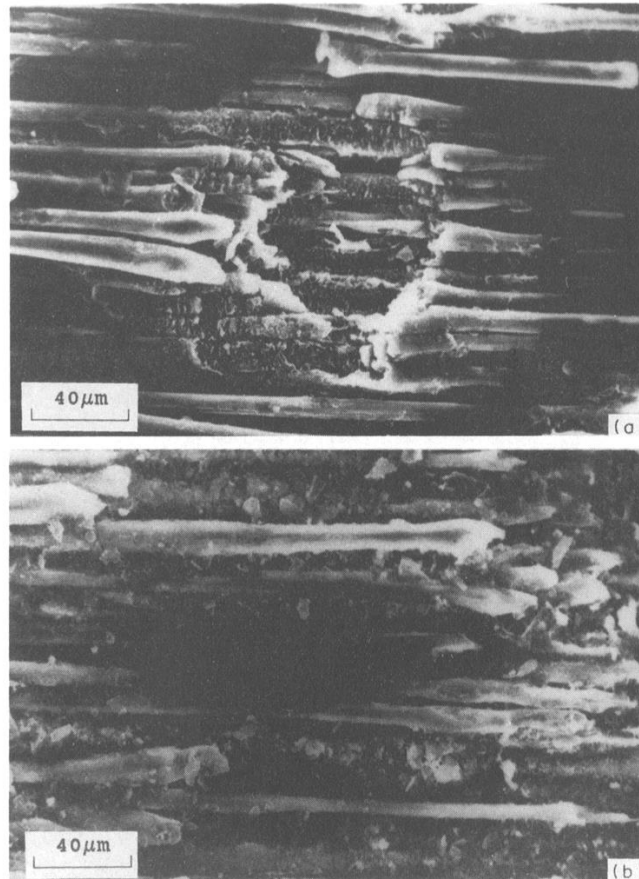
Bijlage H: Effect van pulsintervaltijd en polariteit op MRR en EWR voor een grafietelektrode ($I = 0,5A$, $t_{on} = 120\mu s$). [11]

De elektrodeslijtage verloopt omgekeerd t.o.v. een koperelektrode vanaf $300 \mu s$. De EWR voor een grafietelektrode blijft stijgen met toenemende pulsintervaltijd. Deze slijtage wordt zeer groot, tot 50% wanneer de elektrode negatief gepolariseerd wordt. De elektrode is dan niet meer bruikbaar. Met een grafietelektrode kan eenzelfde MRR worden gehaald zoals bij een koperelektrode. De EWR is voor een positieve elektrode groter dan bij koper.



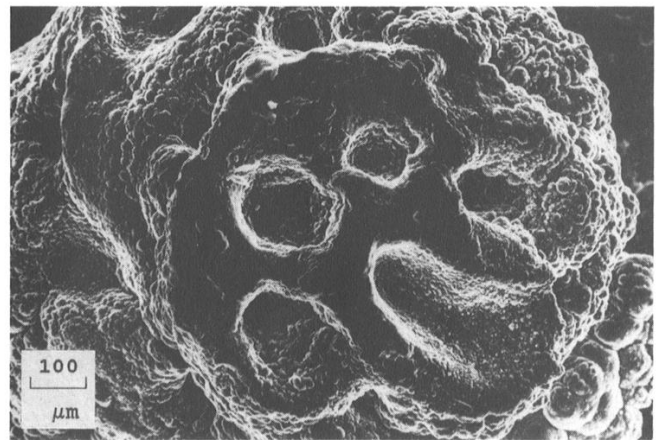
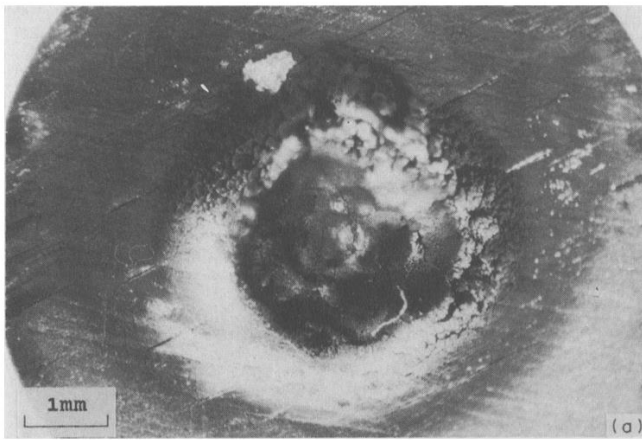
Bijlage I: SEM figuren van het bewerkte oppervlak bij een stroomsterkte van 0,5. [11]

Figuur (a) geeft een krater weer die voorkomt in het werkstukoppervlak. elektrode is positief gepolariseerd. Figuur (b), elektrode negatief gepolariseerd geeft een krater weer met grotere diameter maar minder diep dan in (a).



Bijlage J: Microscopische figuren van het bewerkte oppervlak bij een stroomsterkte van 5A. [11]

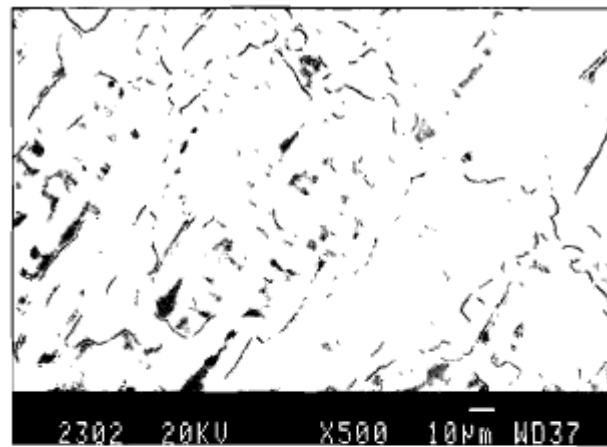
Figuur (a), elektrode negatief gepolariseerd geeft een krater in het werkstukoppervlak weer. Terwijl figuur (b) elektrode positief, opbouw materiaal op het midden van het bewerkte oppervlak weergeeft. Dit opbouw materiaal heeft een kleinere diameter dan de krater in figuur (a). Maar bij het verwijderen van het opbouw materiaal blijft er een diepere krater over. Dezelfde conclusies kunnen gemaakt worden zoals in vorige bijlage. Negatief gepolariseerde elektroden resulteren in grotere maar minder diepe kraters in het werkstukoppervlak. De derde figuur geeft een SEM figuur weer van het opbouw materiaal.



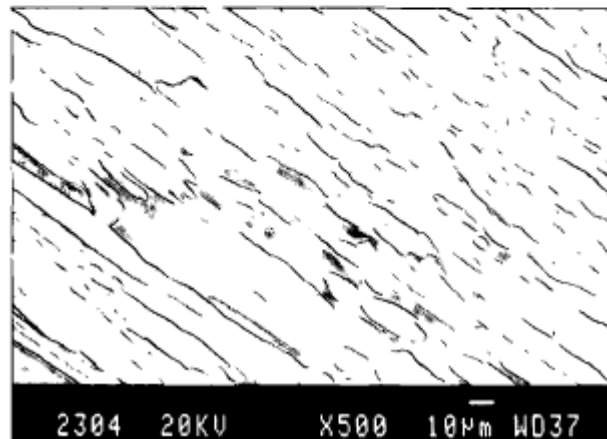
Bijlage K: Gebruikte EDM machine [26]



Bijlage L: Microscopische SEM figuren (a) 0,2 A; 25 μ s (b) 5 A; 25 μ s [12]



(a)

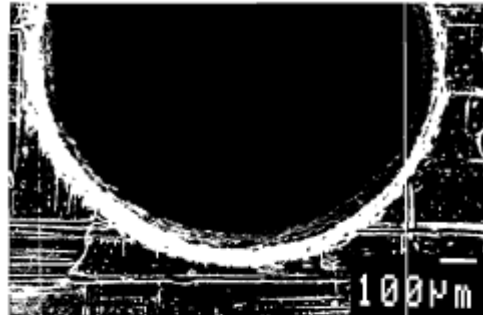


(b)

Bijlage M: Diepte van de 'recast layer' bij verschillende stroomsterkten [12]

Pulse Current (A)	0.2	2.5	5.0
Depth (μ m)	5	9	15

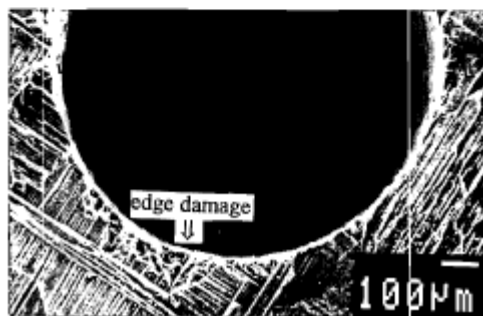
Bijlage N: Invloed op de rand van het bewerkte oppervlak (a) 0,2 A; A25 μ s (b) 1,0 A; A25 μ s (c) 10,0; A25 μ s [12]



(a)

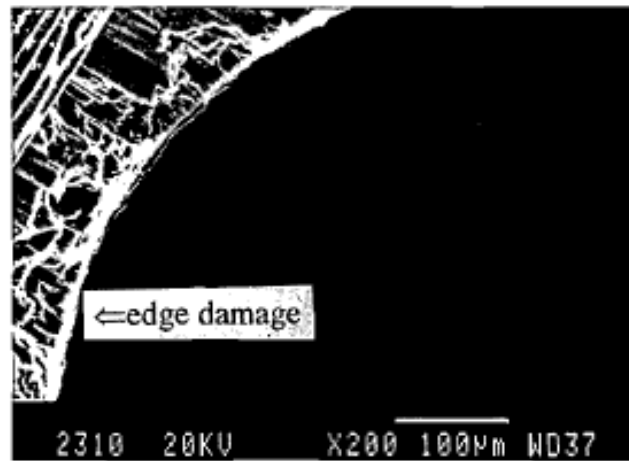


(b)

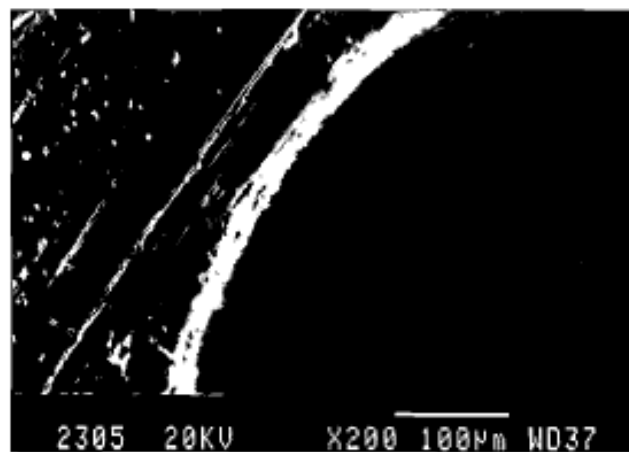


(c)

Bijlage O: Effect van de vezelrichting op de randaantasting (10 A; 25 μ s)
[12]

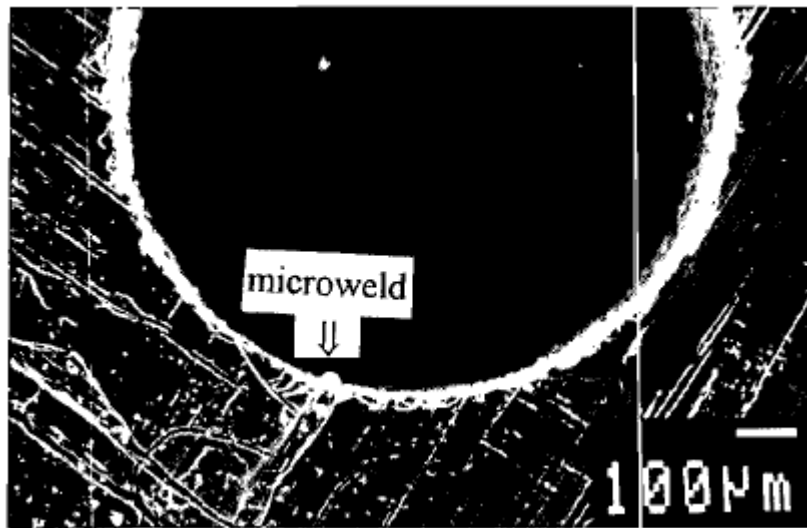


(a)

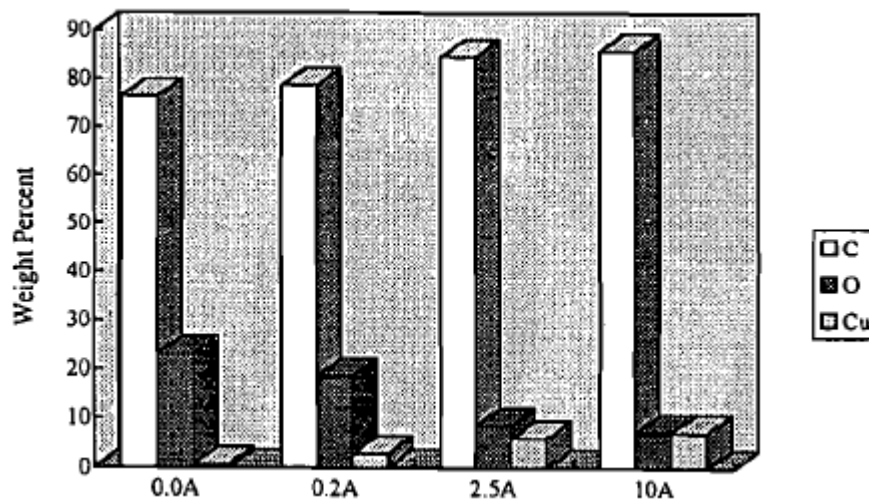


(b)

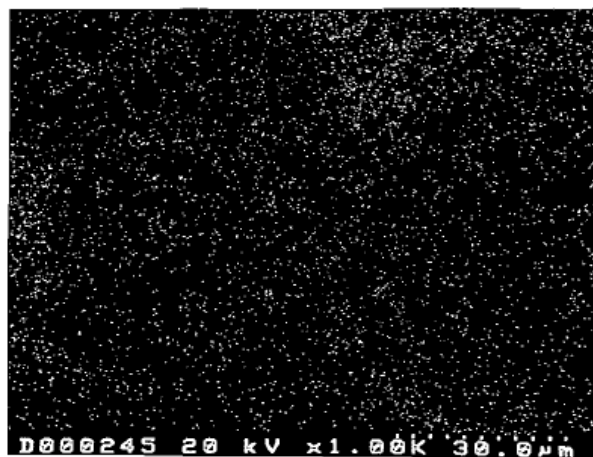
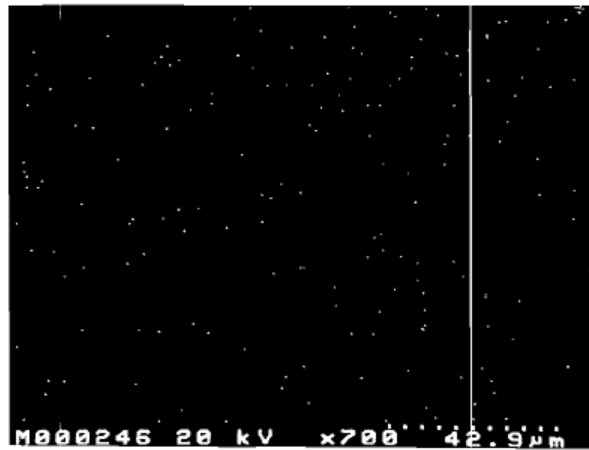
Bijlage P: Afdichting van de vezels met 'recast layer' (1,0 A; 25 μ s) [12]



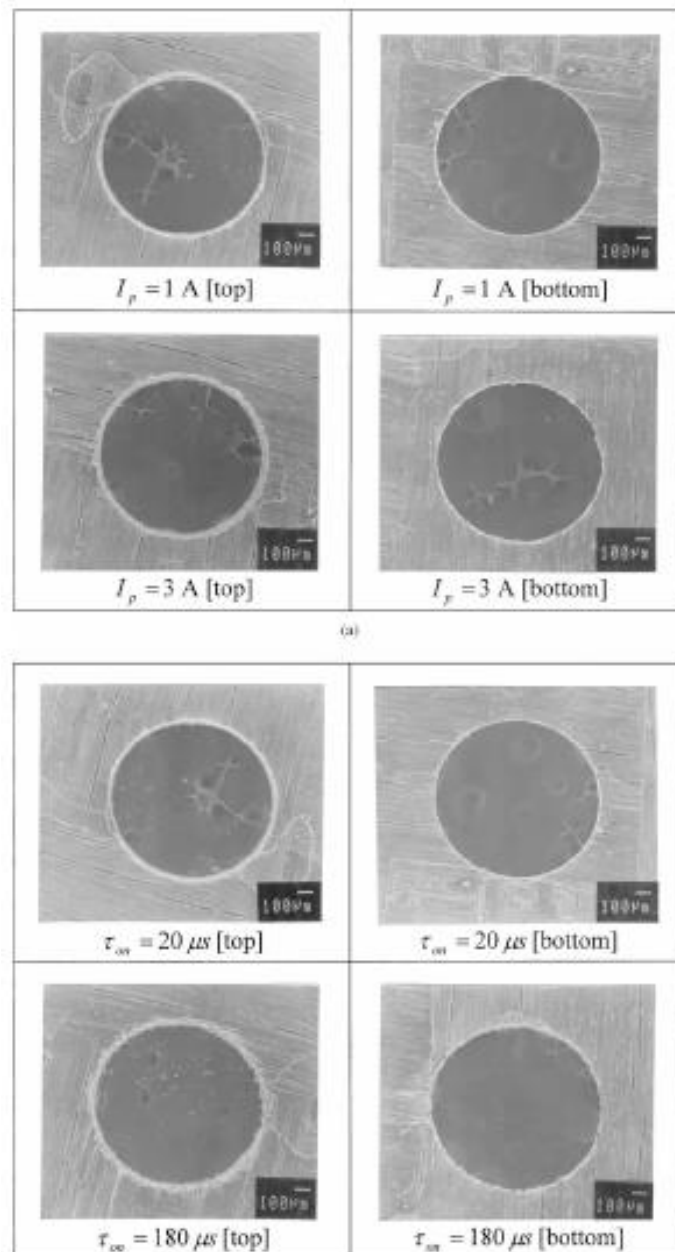
Bijlage Q: Gewichtspercentage van verschillende elementen in het bewerkte CFRP in functie van de stroomsterkte (25 μ s) [12]



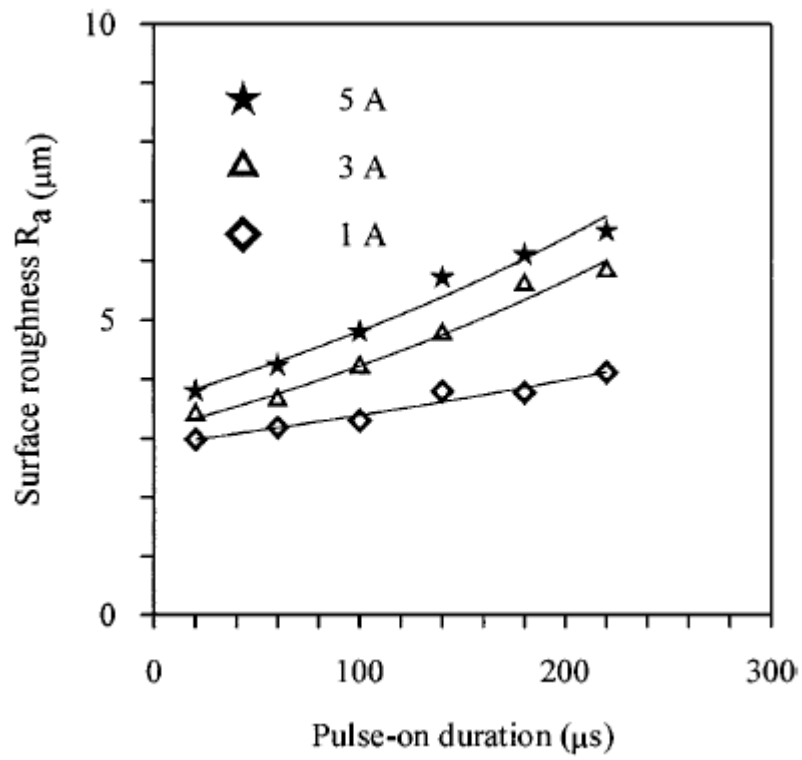
Bijlage R: Distributie van koper in het bewerkte oppervlak (a) 0,2 A; 25 μ s (b) 2,5 A 25 μ s [12]







Bijlage S: SEM figuren van het boven – en beneden bewerkte
werkstukoppervlak (a) 20 μ s (b) 1 A



Bijlage T: Oppervlakte ruwheid bij verschillende parameter instellingen
[15]



Bijlage U: Ondermaat berekeningsmodule [18]

Dielectric	Calculation of the under-sizes taking account of the Gamma option (if installed)
Materials	Material pair (electrode, part) used
Application	Type of application
	Surface finish state The surface finish state is given according to two different units : [CH] and [Ra]
 D	Cavity depth
Maximum frontal surface area	Maximum area of the electrode subjected to machining
	Electrode length (Only visible in some material pairs)
	Tool diameter (Only visible for the drilling, stamping and contouring applications)
Nature of cavity	Type of cavity: Straight Tapered Point

Priorities Machining priority / tool wear :

- Minimum wear** Choice favoring minimum wear contra speed
- Maximum speed** Choice favoring speed contra wear






Machining priority / surface condition :

- Surface condition quality** Choice favoring a homogeneous surface condition contra speed
- Maximum speed** Choice favoring speed contra a homogeneous surface condition

Wear / surface condition capabilities depend on the "selected materials & application" pair.



Undersize : display of the calculated subdimension values.

-  Machining pass subdimension 1
-  Machining pass subdimension 2
-  Machining pass subdimension 3
-  Machining pass subdimension 4
-  Machining pass subdimension 5

Bijlage V: CH ruwheidswaarden, conversietabel naar Ra [18]

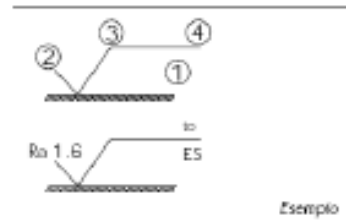
$$N^* CH = 20 \log_{10} Ra (\mu m)$$

VDI 3400				VDI 3400			
CH	Ra = CLA = AA		Class	CH	Ra = CLA = AA		Class
	μm	$\mu inch$	ISO 1302		μm	$\mu inch$	ISO 1302
0	0.1	4	N3	23	1.4	56	N7
1	0.11	4.4		24	1.62	63	
2	0.12	4.8		25	1.8	72	
3	0.14	5.6	N4	26	2	80	N8
4	0.16	6.4		27	2.2	88	
5	0.18	7.2		28	2.5	100	
6	0.2	8	N5	29	2.8	112	N9
7	0.22	8.8		30	3.2	125	
8	0.25	10		31	3.5	140	
9	0.28	11.2	N6	32	4	160	N10
10	0.32	12.8		33	4.5	180	
11	0.35	14		34	5	200	
12	0.4	16	N7	35	5.6	224	N11
13	0.45	18		36	6.3	250	
14	0.5	20		37	7	280	
15	0.56	22.4	N8	38	8	320	N12
16	0.63	25.2		39	9	360	
17	0.7	28		40	10	400	
18	0.8	32	N9	41	11.2	448	N13
19	0.9	36		42	12.6	500	
20	1	40		43	14	560	
21	1.12	44.8	N10	44	16	640	N14
22	1.26	50.4		45	18	760	

3.2 Specification on drawings

Depending on requirements:

- (1) Abbreviations of the function.
- (2) Symbols and numerical values of chosen criterion/criteria.
- (3) Abbreviations of workpiece creation procedure.
- (4) Supplementary specifications.



DIEL MS 7000



Metalworking



Electro Discharge Machine Fluid.

UTILISATIONS

- Multifunctional fluid particularly suitable for semi finishing and finishing operations when the shapes are complex and with very accurate dimensions.

SPECIFICATIONS

- CHARMILLES TECHNOLOGIES (Switzerland)
- ONA (Spain and France)
- INGERSOLL (France)
- INGERSOLL HANSEN (France)
- AGIE (Switzerland and France)

ADVANTAGES

- Very clear fluid mineral oil
- Good resistance to oxidation
- **High flash point**
- **This product was chosen for its very narrow petroleum cut (low volatility)**
- **Very low aromatics content**
- Low pour point, possibility of storage outside.

TYPICAL CHARACTERISTICS	METHODS	UNITS	DIEL MS 7000
Appearance	Visual	-	Transparent
Colour	ASTM D 156	-	0.5
Density	ISO 3675	kg/m ³	812
Viscosity at 20°C	ISO 3104	mm ² /s	3.4
Flash point Pensky-Martens	ISO 2719	°C	102
Pour Point	ISO 3016	°C	- 50
Total aromatics content	TOTAL I L 14 (DMSO - UV)	Weight %	0.01
Distillation range	ISO 3405	°C	230/270

Above characteristics are mean values given as an information.

TOTAL LUBRIFIANTS
Industrie & Spécialités

23 July 2001
DIEL MS 7000
1/1

This lubricant used as recommended and for the application for which it has been designed does not present any particular risk.

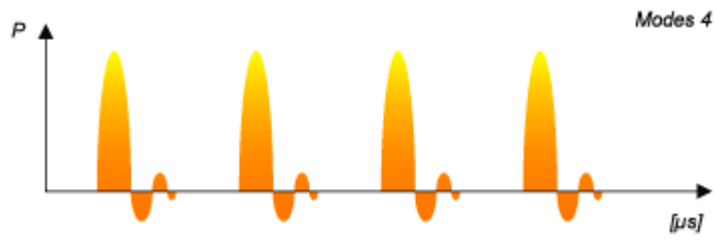
A material safety data sheet conforming to the regulations in use in the E.C. is obtainable via your commercial adviser www.quick-fds.com.



Bijlage X: Technologie voor koper-staal

E	Engage Mode	Lchg [mm]		[mn]	Flush	Flush (M70)
323	1	0,129	B		0 ON	
312	1	0,085	B		0 ON	
282	1	0,054	B		0 ON	
262	1	0,038	B		0 ON	
251	1	0,028	B		0 ON	
241	1	0,019	B		0 ON	
P [A]	A [μs]	B [μs]	SV [%]	R [s]	U [s]	
9	100	10	30	0,15	2	0,6
9	50	25	30	0,2	2	0,6
7	25	50	50	0,2	2	0,4
5	25	25	40	0,2	2	0,5
5	12	75	40	0,2	2	0,25
5	6	75	40	0,2	2	0,25
M	C	V [V]	RF [V]	Pilot Expert	EXTRA NPULSN	EXTRA NPULSE
29	0	160	25	OFF	15	1
29	0	160	25,5	OFF	15	1
29	0	160	26	OFF	15	1
29	0	160	25	OFF	15	1
29	0	160	30	OFF	15	1
29	0	160	32,5	OFF	15	1
EXTRA R [s]	EXTRA VPULS	MICRO U	MICRO R [mm]	MICRO VPUL	Techno	
0,3	7500	0	0,1	2625	SCUAC	33
0,3	2380	0	0,1	2380	SCUAC	33
0,3	1785	0	0,1	1785	SCUAC	33
0,3	1470	0	0,1	1470	SCUAC	33
0,3	1335	0	0,1	1335	SCUAC	33
0,3	1215	0	0,1	1215	SCUAC	33

Bijlage Y: Pulsvorm voor verschillende generator modes [18]



Bijlage Z: Verklaring van alle parameters in de technologie [18]

#	E	Engage Mode	Lchg [mm]	[mn]	Flush
1	325	1	0 B	0	OFF
Flush (M70)	[rpm]	P[A]	A [μs]	B [μs]	SV [%]
0	10	65	6,4	100	60
R [s]	U	VPULS [mm/mn]	M	C	V [V]
0,1	1	3600	10	26	-80
RF [V]	Pilot Expert	EXTRA NPULSN	EXTRA NPULSE	EXTRA R [s]	EXTRA VPULS [mm/mn]
0	OFF	10	1	0,2	3600
MICRO U [s]	MICRO R [mm]	MICRO VPULS [mm/mn]	Techno		
0	0,1	1800	SCUECC_BC 33		

#	Indexgetal
E	Energiewaarde
Engage mode	Manier van toetreden tot het werkstuk (recht naar beneden, cilindrisch, helicoïdiaal ...)

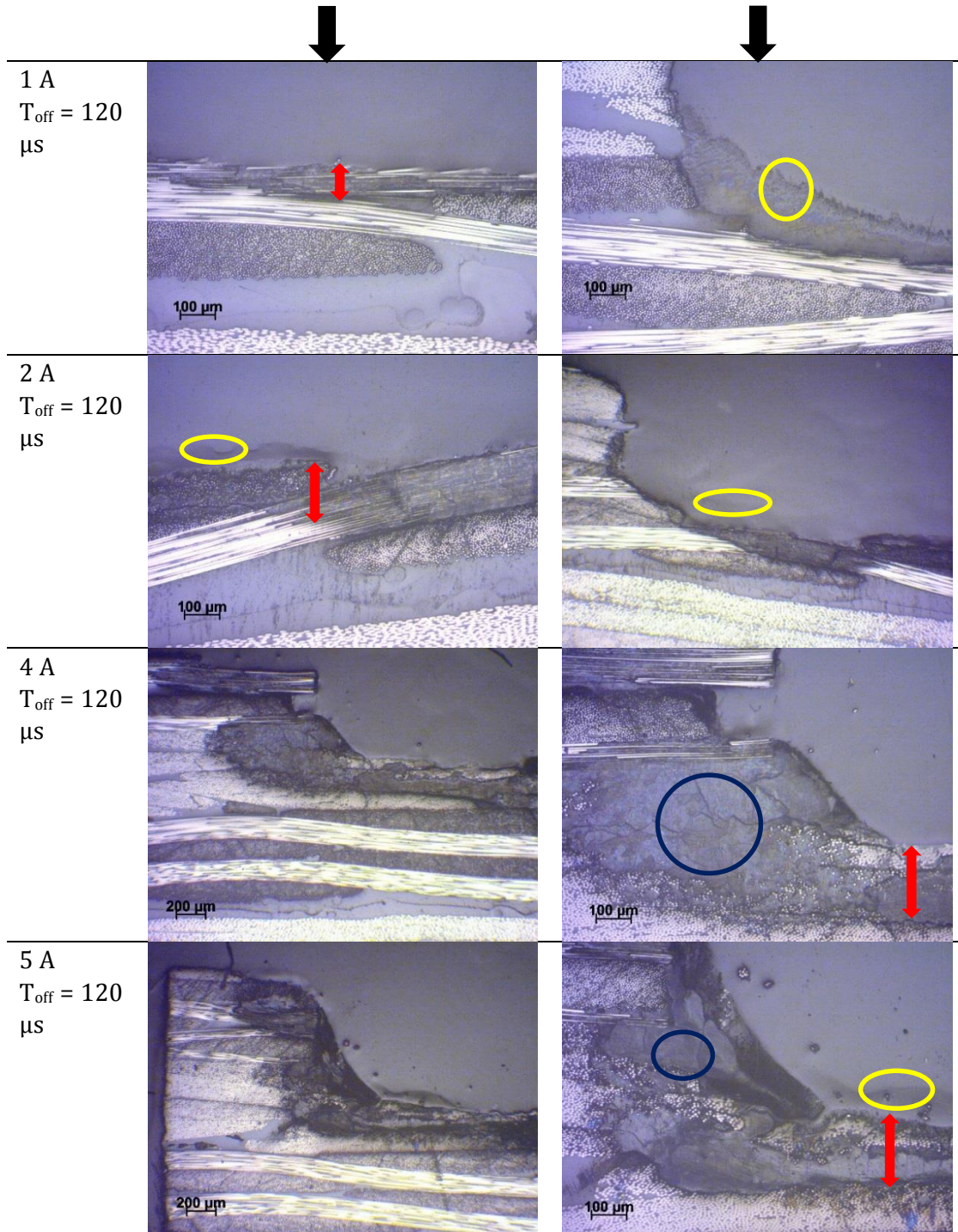
Lchg [mm]	Afstand dat de elektrode van de onderkant B (Bottom) of bovenkant T (Top) van de te bewerken caviteit zal blijven.
[mn]	Als deze waarde op nul gezet wordt dan zal de bewerking rekening houden met Lchg. Bij een andere waarde stelt deze het aantal minuten voor eer de bewerking beëindigd wordt.
Flush	Aan-en af schakelen van spoeling
Flush (M70)	Hiermee worden de kanalen om spoeling te voorzien geselecteerd (kanaal A, B, C en/of D). Per kan kanaal zijn er drie mogelijkheden (0 = stop, 1 = continu, 2 = pulserend)
[rpm]	Rotatie van de elektrode uitgedrukt in [rpm]
P [A]	Stroomsterkte
A [µs]	Pulsduur
B [µs]	Pulsintervaltijd
SV [%]	Servo-systeem
R [s]	Terugtrekkingstijd van de elektrode
U	Pulsatiemogelijkheid (0 = geen pulsatie, 1 = normale pulsatie, 2 = reguliere pulsatie)
VPULS [mm/min]	Pulsatiesnelheid
M	Machine mode: 1 = Standaard 2 = Standaard lage slijtage 3 = Standaard zeer lage slijtage 7 = Standaard 8 = Standaard lage slijtage 9 = Standaard zeer lage slijtage 14 = Micro 15 = Micro lage slijtage 16 = Micro zeer lage slijtage 26 = Rib 27 = Rib lage slijtage 28 = Rib zeer lage slijtage
C	Afwerkingscapaciteit (waarde kan niet worden aangepast)

V [V]	Opengeneratorspanning
RF [V]	Referentiespanning
Pilot Expert	<p>Additionele machinefunctionaliteit:</p> <p>OFF = B, R, U, RF en SV nemen de waarden uit de technologietabel aan</p> <p>II = B, R, U, RF en SV worden geoptimaliseerd in functie van machine efficiëntie</p> <p>III = B, R en U worden geoptimaliseerd in functie van machine efficiëntie</p> <p>IV = B, R en U worden automatisch aangepast in functie van de bewerkingsdiepte</p>
(Extra pulsatie)	Extra pulsatie kan gebruikt worden voor het efficiënter afvoeren van spaandeeltjes. Het kan zorgen voor minder elektrodeslijtage. Om deze functionaliteit te kunnen gebruiken moet U = 2, reguliere pulsatie.
EXTRA NPULSN	Het aantal normale opeenvolgend pulsen vooraleer extra pulsen worden ingeschakeld.
EXTRA NPULSE	Aantal opeenvolgende extra pulsen
EXTRA R [s]	Terugtrekkingstijd van de extra pulsaties
EXTRA VPULS [mm/min]	Terugtrekkingssnelheid van de extra pulsaties
(Micro pulsatie)	Micro pulsatie kan gebruikt worden voor het efficiënter afvoeren van microspaandeeltjes. Deze pulsatie gebruikt een zeer korte terugtrekkingstijd. Het kan zorgen voor minder elektrodeslijtage. Om deze functionaliteit te kunnen gebruiken moet U = 2, reguliere pulsatie.
MICRO U [s]	Machinetijd van de micropulsatie
MICRO R [mm]	Terugtrekkingsafstand van de micro pulsatie
MICRO VPULS [mm/mn]	Pulsatiesnelheid van de micro pulsatie
Techno	Naam en versie van de technologie

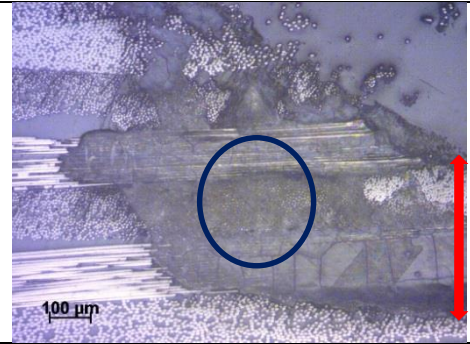
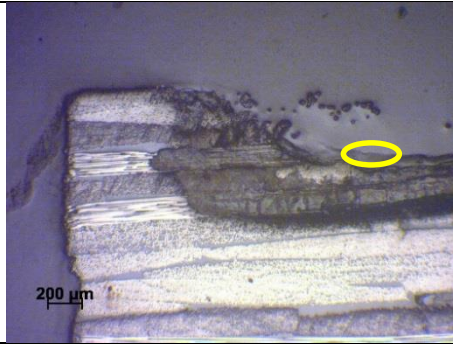
Bijlage AA: Weerstandsmetingen CFRP

<i>Geweven lagen</i>	IN 2102 Insulation tester		SkyTronic 600-463	
meting nr.	Oppervlak [Ω]	Doorsnede [Ω]	Oppervlak [Ωcm]	Doorsnede [Ω]
1	24,64	13,72	24,6	12,21
2	26,38	7,99	36,21	10,32
3	29,93	12,2	24,9	13,22
4	25,43	12,76	34,3	10,22
5	32,15	13,95	17,2	11,46
gemiddelde	27,706	12,124	27,442	11,486
totaal gemiddelde	27,574	11,805	27,574	11,805
<i>UD lagen</i>	IN 2102 Insulation tester		SkyTronic 600-463	
meting nr.	Oppervlak [Ω]	Doorsnede [Ω]	Oppervlak [Ω]	Doorsnede [Ω]
1	34,22	16,65	33,8	25,33
2	33,6	22,4	47,61	18,36
3	32,79	23,35	36,31	21,3
4	39,01	31,95	39,48	26,67
5	38,34	26,63	42,32	29,86
gemiddelde	35,592	24,196	39,904	24,304
totaal gemiddelde	37,748	24,25	37,748	24,25
<i>combinatie beide lagen</i>	IN 2102 Insulation tester		SkyTronic 600-463	
meting nr.		Doorsnede [Ω]		Doorsnede [Ω]
1		17,27		15,16
2		21,23		14,2
3		15,22		9,86
4		20,3		12,31
5		25,1		9,1
gemiddelde		19,824		12,126
totaal gemiddelde		15,975		15,975

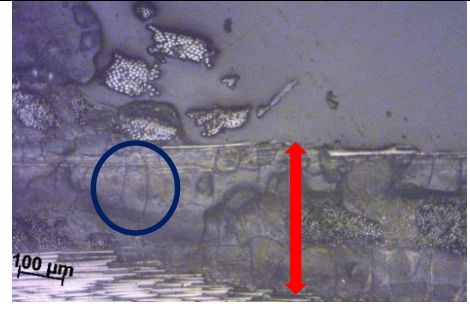
Bijlage BB: Microscopische doorsnede figuren aan 1, 2, 4, 5, 7 en 9 A



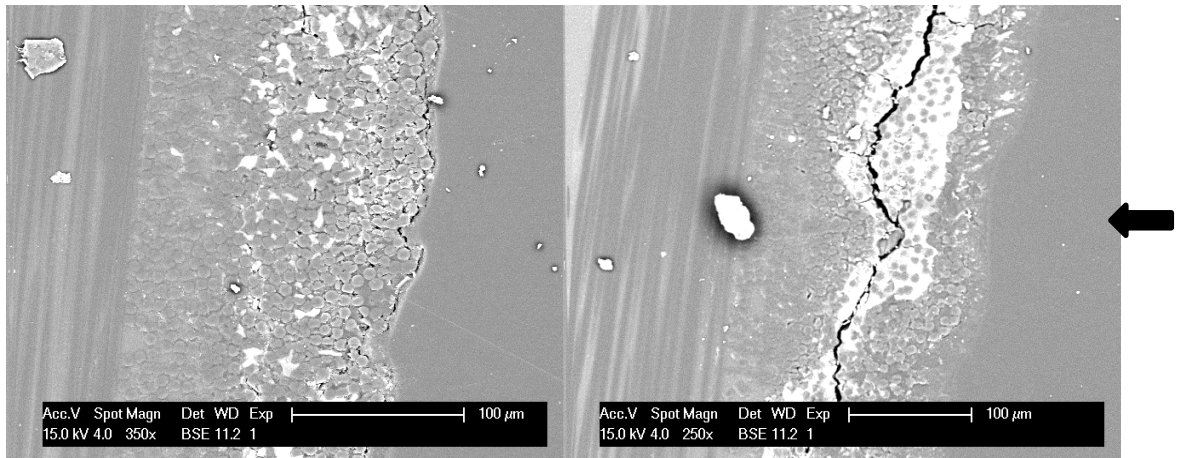
7 A
 $T_{\text{off}} = 210$
 μs



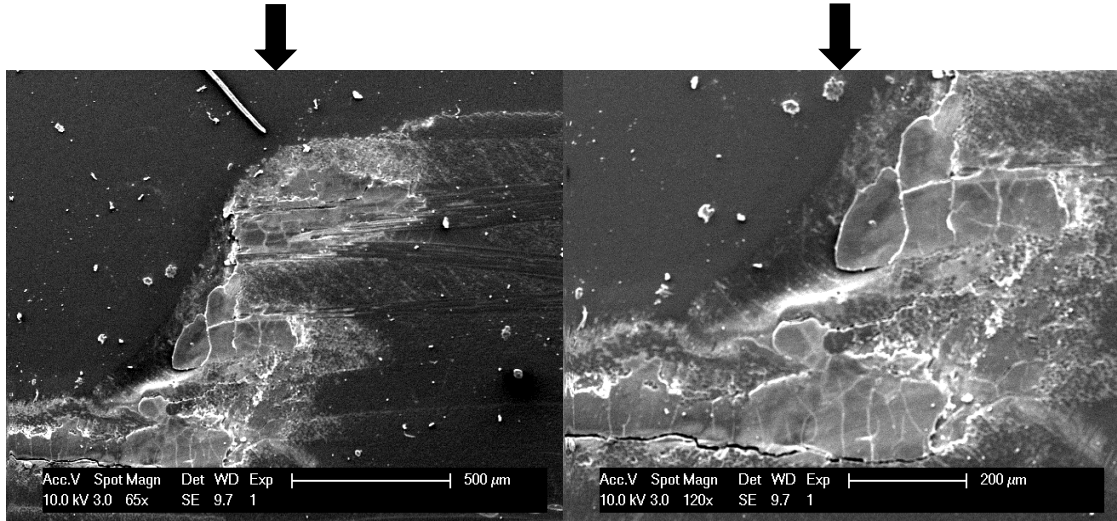
9 A
 $T_{\text{off}} = 270$
 μs



Bijlage CC: Doorsnede figuren (SEM) voor 2 en 5 A



2A; $T_{off} = 120 \mu s$



5A; $T_{off} = 120 \mu s$

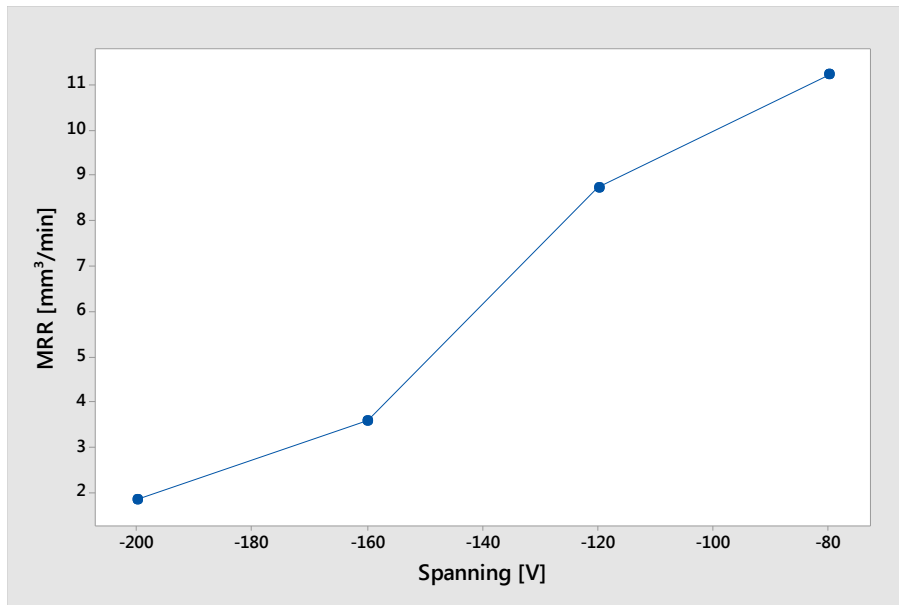
Bijlage DD: Technologie voor slecht geleidende keramieken

SCUECC_BC Bad Electro conductive Ceramic - CUECC - FOX50							
#	E	Engage Mode	Lchg [mm]		[mn]	Flush	Flush (M70)
1	325	1	0,129	B		0 ON	
2	295	1	0,085	B		0 ON	
3	285	1	0,072	B		0 ON	
4	265	1	0,054	B		0 ON	
5	245	1	0,04	B		0 ON	
[rpm]	P [A]	A [μs]	B [μs]	SV [%]	R [s]	U [s]	
	65	6,4	100	60	0,1	1	0,15
	65	3,2	100	60	0,1	1	0,15
	65	3,2	100	60	0,1	1	0,15
	49	3,2	100	60	0,1	1	0,15
	3,5	0,2	15	20	0,1	1	0,15
VPULS [mm]/M	C	V [V]	RF [V]	Pilot Expert	EXTRA NPULSN	EXTRA NPULSE	
3600	10	26	-80	0 OFF	10	1	
3600	10	24	-80	0 OFF	10	1	
3600	10	23	-80	0 OFF	10	1	
3600	10	20	-80	0 OFF	10	1	
3600	23	6	-200	25 OFF	10	1	
EXTRA R [s]	EXTRA VPULS	MICRO U [s]	MICRO R	MICRO VPULS	Techno		
0,2	3600	0	0,1	1800	SCUECC_BC	33	
0,2	3600	0	0,1	1800	SCUECC_BC	33	
0,2	3600	0	0,1	1800	SCUECC_BC	33	
0,2	3600	0	0,1	1800	SCUECC_BC	33	
0,2	3600	0	0,1	900	SCUECC_BC	33	

Bijlage EE: Te gebruiken parameters met technologie

Te gebruiken parameters		
I [A]	Ton [μ s]	Technologie
1	3,2	Cu-Steel > Standard
	12	Cu-Steel > Standard
	50	Cu-Steel > Standard
	100	Cu-Steel > Standard
	-	
4	6,4	Cu-Al
	12,8	Cu-Al
	50	Cu-Al
	100	Cu-Al
	-	
7	6,4	Cu-Al
	12,8	Cu-Al
	50	Cu-Steel > Standard
	100	Cu-Steel > Standard
	200	Cu-Steel > Standard
13	6,4	Cu-Cu
	12,8	Cu-Al
	50	Cu-Al
	100	Cu-Al
	200	Cu-Al
33	6,4	Cu-Cu
	12,8	Cu-Cu
	50	Cu-Al
	100	Cu-Al
	200	Cu-Al
65	6,4	Cu-Cu
	12,8	Cu-Cu
	50	Cu-Al
	100	Cu-Al
	200	Cu-Al

Bijlage FF: Invloed van spanning op MRR



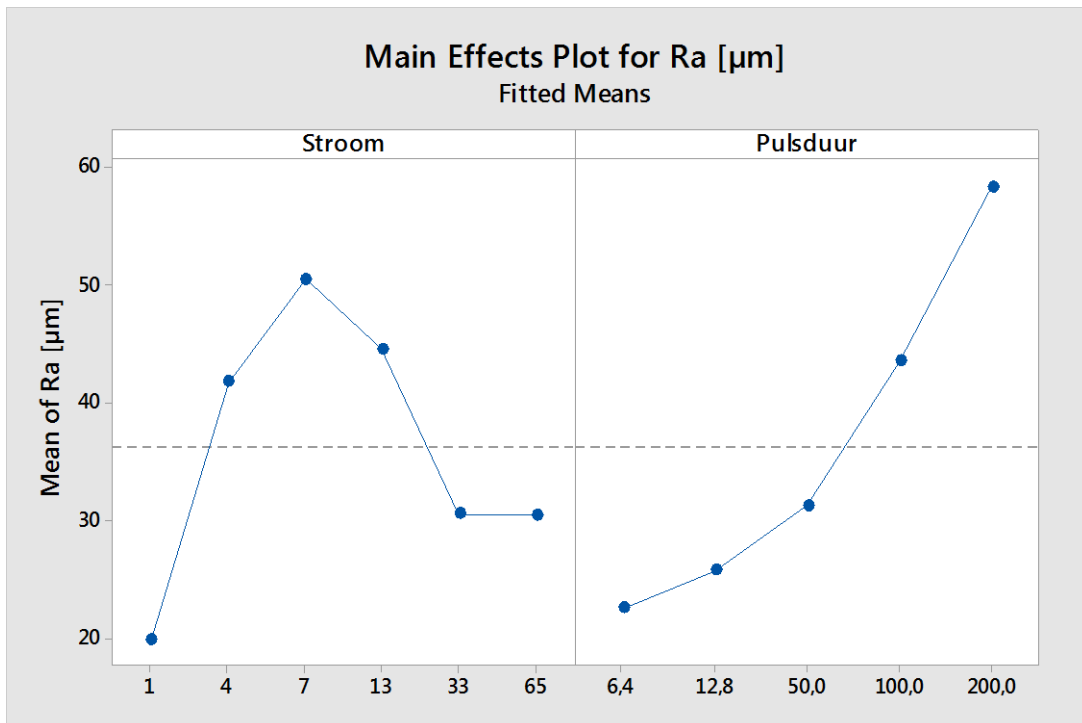
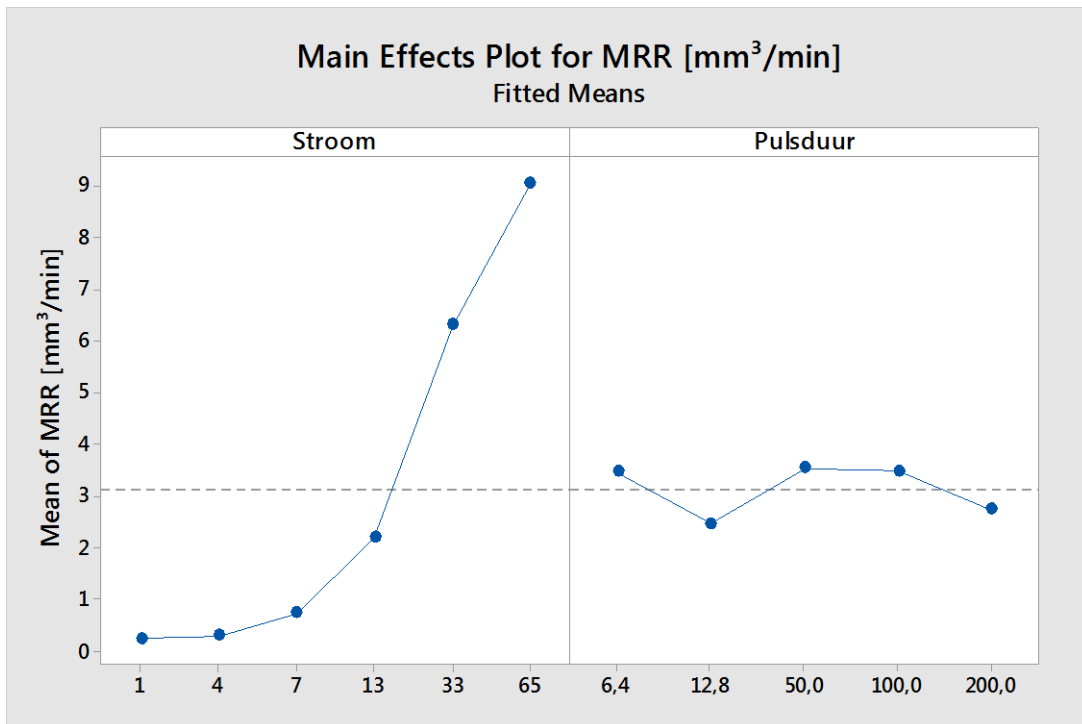
Bijlage GG: Overige parameters gebruikt in hoofdexperimenten

#	E	Engage Mode	Lchg [mm]	[mn]	Flush
1	Zie Bijlage EE	1	0 B	0	OFF
Flush (M70)	[rpm]	P[A]	A [μs]	B [μs]	SV [%]
0	10	Zie Bijlage EE	Zie Bijlage EE	auto	auto
R [s]	U [s]	VPULS [mm/mn]	M	C	V [V]
auto	auto	240	1	0	-80
RF [V]	Pilot Expert	EXTRA NPULSN	EXTRA NPULSE	EXTRA R [s]	EXTRA VPULS [mm/mn]
auto	II	0	1	0,2	240
MICRO U [s]	MICRO R [mm]	MICRO VPULS [mm/mn]	Techno		
0	0,1	240	Zie Bijlage EE		

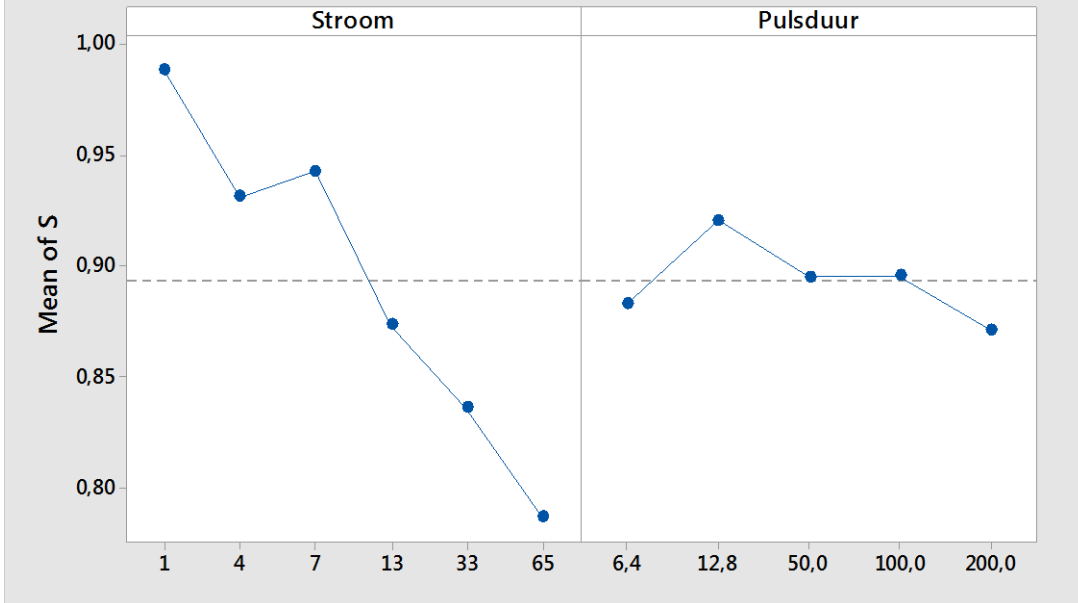
Bijlage HH: Opmeten van ruheidswaarden met profilometer (Taylor-Hobson)



Bijlage II: Effecten van stroom en pulsduur op MRR, oppervlakteruwheid en randkwaliteit



Main Effects Plot for S
Fitted Means



Bijlage JJ: Ruwheidswaarden, resultaten (-80 V)

Te gebruiken parameters -80 V		Ra [μm]			Ra gemiddeld [μm]
I [A]	Ton [μs]				
1	3,2	10	13	8	10
	12	11	17	13	14
	50	14	11	10	15
	100	30	18	8	19
	-				
4	6,4	34	20	21	25
	12,8	38	33	30	34
	50	19	36	58	38
	100	47	39	60	49
	-				
7	6,4	50	57	49	52
	12,8	9	10	16	12
	50	47	34	63	48
	100	74	48	57	60
	200	98	76	69	81
13	6,4	12	7	10	10
	12,8	45	69	55	56
	50	50	56	25	44
	100	40	90	41	57
	200	40	42	86	56
33	6,4	23	19	20	21
	12,8	39	25	28	31
	50	23	13	21	19
	100	17	31	35	28
	200	54	61	49	55
65	6,4	12	23	18	18
	12,8	0	12	14	9
	50	29	28	16	24
	100	26	53	69	49
	200				

Bijlage KK: Opmeten van de omschreven cirkeldiameter D en ingeschreven cirkeldiameter d met een meetmicroscop (Quick Vision, Mitutoyo)



Bijlage LL: Meetresultaten van de omschreven en ingeschreven cirkeldiameter voor de testen aan – 80 V.

Te gebruiken parameters -80 V		d	D	d/D
I [A]	Ton [μ s]			
1	3,2	10,03	10,06	0,997
	12	10,06	10,09	0,997
	50	10,07	10,13	0,994
	100	9,99	10,12	0,987
	-			
4	6,4	9,91	10,39	0,954
	12,8	9,82	10,42	0,942
	50	9,86	10,63	0,928
	100	9,93	10,75	0,924
	-			
7	6,4	9,84	10,78	0,913
	12,8	10	10,12	0,988
	50	9,78	10,2	0,959
	100	9,83	10,67	0,921
	200	9,86	10,57	0,933
	-			
13	6,4	9,73	10,26	0,948
	12,8	9,39	12,34	0,761
	50	9,57	11,29	0,848
	100	9,8	10,72	0,914
	200	9,82	10,94	0,898
	-			
33	6,4	9,93	12,01	0,827
	12,8	9,68	10,43	0,928
	50	10,23	12,13	0,843
	100	9,98	12,08	0,826
	200	9,9	13,09	0,756
65	6,4	10,01	15,11	0,662
	12,8	9,58	10,55	0,908
	50	10,1	12,63	0,800
	100	10,79	13,46	0,802
	200			

Bijlage MM: Optimale pulsduur per stroom voor een optimale combinatie van MRR, Ra en S.

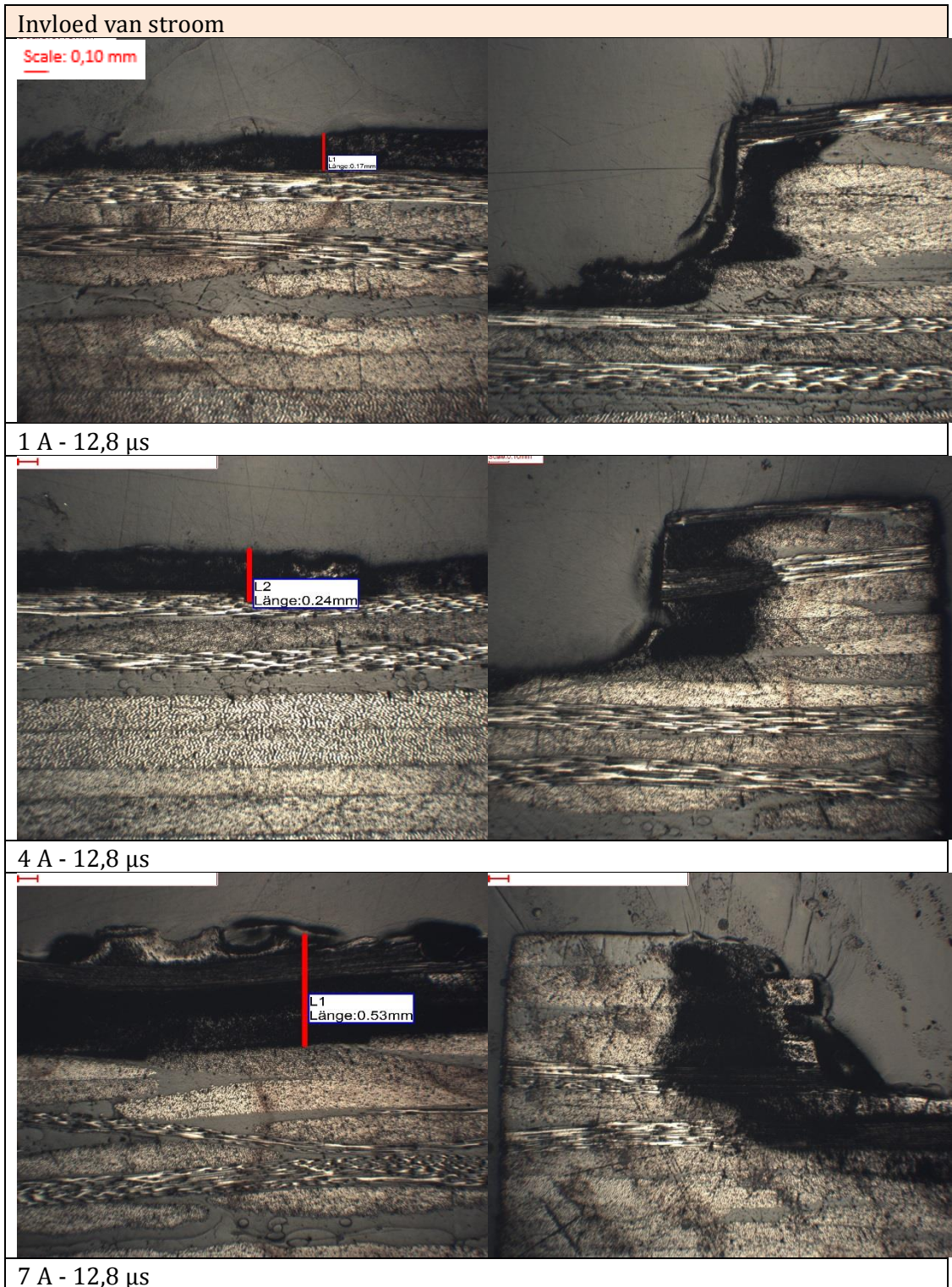
Te gebruiken parameters -80 V		MRR	Ra	S
I [A]	Ton [μ s]	[mm ³ /min]	[μ m]	
1	3,2	0,37	10	0,997
	12	0,48	14	0,997
	50	0,31	15	0,994
	100	0,28	19	0,987
	-			
4	6,4	0,81	25	0,954
	12,8	0,48	34	0,942
	50	0,29	38	0,928
	100	0,00	49	0,924
	-			
7	6,4	1,33	52	0,913
	12,8	1,35	12	0,988
	50	0,54	48	0,959
	100	0,50	60	0,921
	200	0,00	81	0,933
13	6,4	3,02	10	0,948
	12,8	1,57	56	0,761
	50	1,92	44	0,848
	100	2,07	57	0,914
	200	2,45	56	0,898
33	6,4	4,13	21	0,827
	12,8	4,36	31	0,928
	50	8,73	19	0,843
	100	8,73	28	0,826
	200	5,61	55	0,756
65	6,4	11,22	18	0,662
	12,8	6,55	9	0,908
	50		24	0,800
	100		49	0,802
	200			
legende: Rood = optimale pulsduur per stroomstekte				

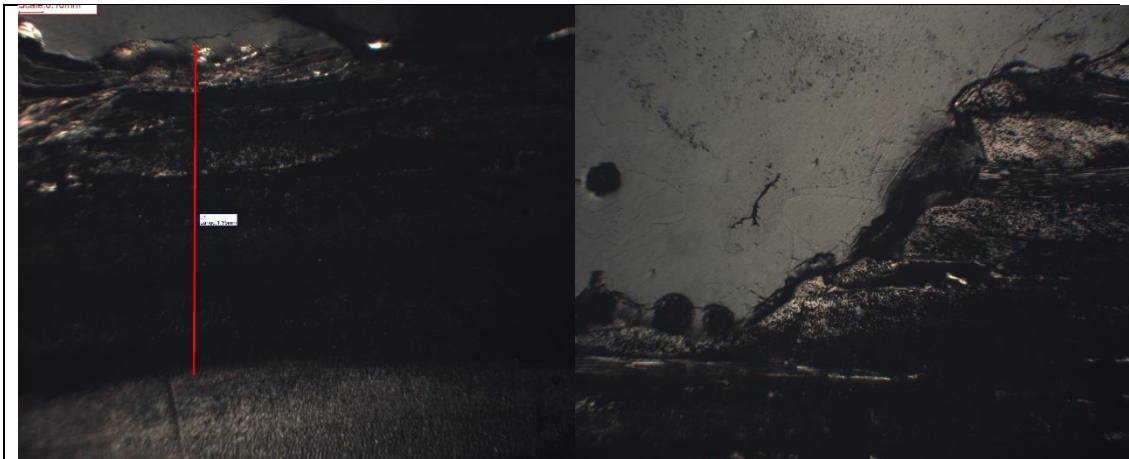
Bijlage NN: Aanvullende testen i.v.m. onderzoek naar een optimale vonktechnologie.

Te gebruiken parameters -80 V			MRR	Ra	S
P [A]	A [μ s]	Technologie	[mm ³ /min]	[μ m]	
7	6,4	Cu-Al	1,33	52,0	0,879
	12,8	Cu-Al	1,35	11,7	0,988
	25	Cu-Al	0,37	41,3	0,949
9	3,2	Cu-Cu	0,78	14,3	0,940
	6,4	Cu-Cu	0,95	37,0	0,942
	12,8	Cu-Cu	1,71	15,0	0,946
	25	Cu-Cu	1,29	14,0	0,927
13	0,8	Cu-Cu	0,46	23,3	0,859
	1,6	Cu-Cu	1,27	11,0	0,923
	3,2	Cu-Cu	2,98	8,0	0,921
	6,4	Cu-Cu	3,02	9,7	0,948
	12,8	Cu-CU	1,57	56,3	0,761
33	1,6	Cu-Cu	2,81	27,7	0,820
	3,2	Cu-Cu	2,45	12,4	0,905
	6,4	Cu-Cu	4,13	20,7	0,827
	12,8	Cu-Cu	4,36	30,7	0,928
	50	Cu-Al	8,73	19	0,843
49	1,6	Cu-Cu	5,24	19,0	0,906
	3,2	Cu-Cu	7,14	24,7	0,920
	6,4	Cu-Cu	6,04	33,7	0,820
	12,8	Cu-Cu	5,61	29,3	0,928
65	6,4	Cu-Cu	11,22	18,0	0,662
	12,8	Cu-Cu	6,55	8,7	0,908

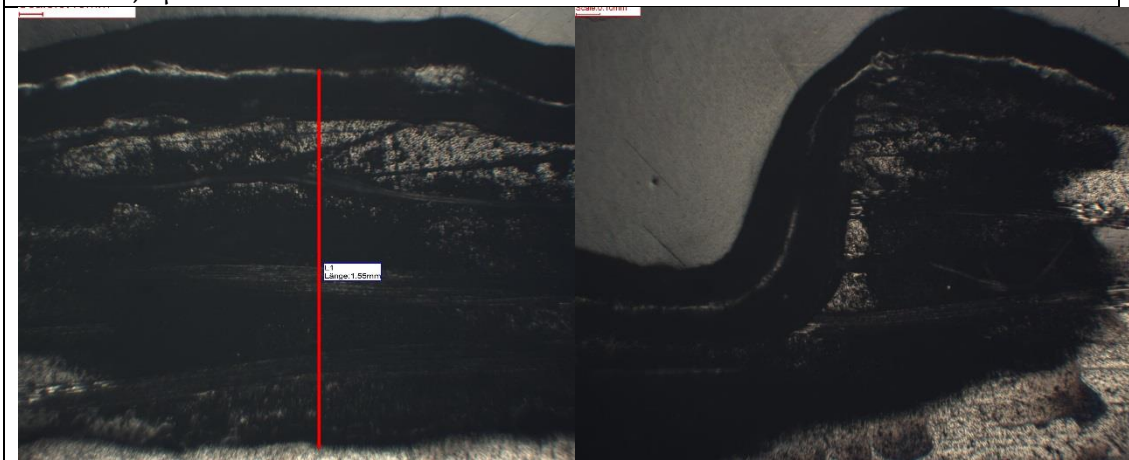
legende: **Blauw** = Testen afkomstig uit vorige testreeks
Rood = Optimale pulsduur per stroomsterkte uit vorige testreeks
Lichtgroen gearceerd = Nieuwe optimale pulsduur per stroomsterkte

Bijlage OO: Doorsnede evaluatie naar invloed van stroom

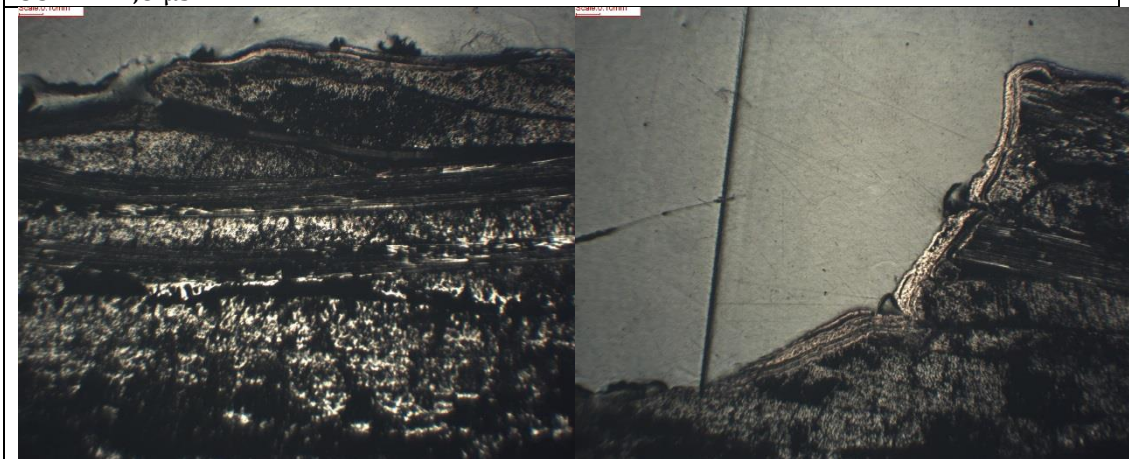




13 A - 12,8 μ s

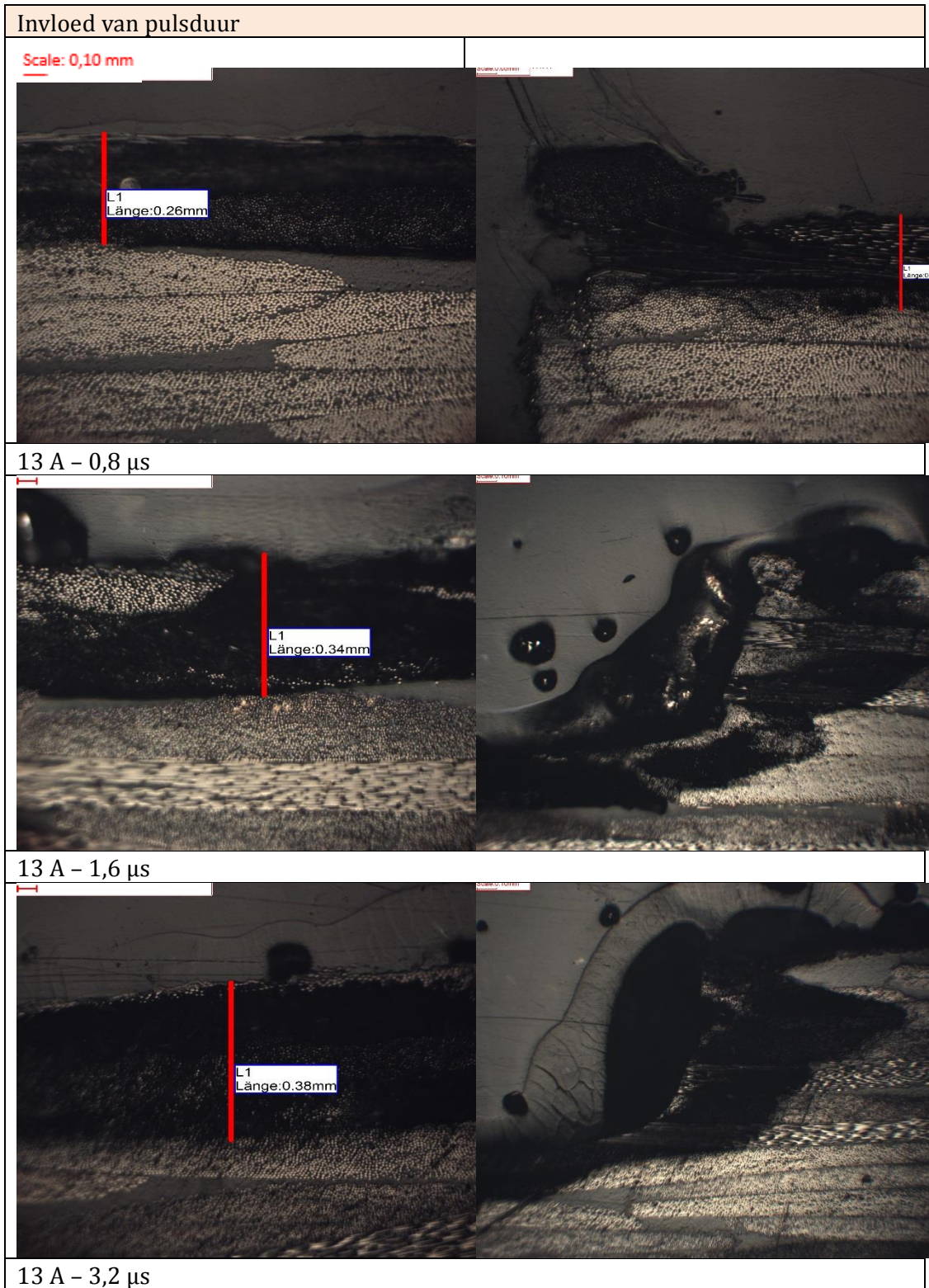


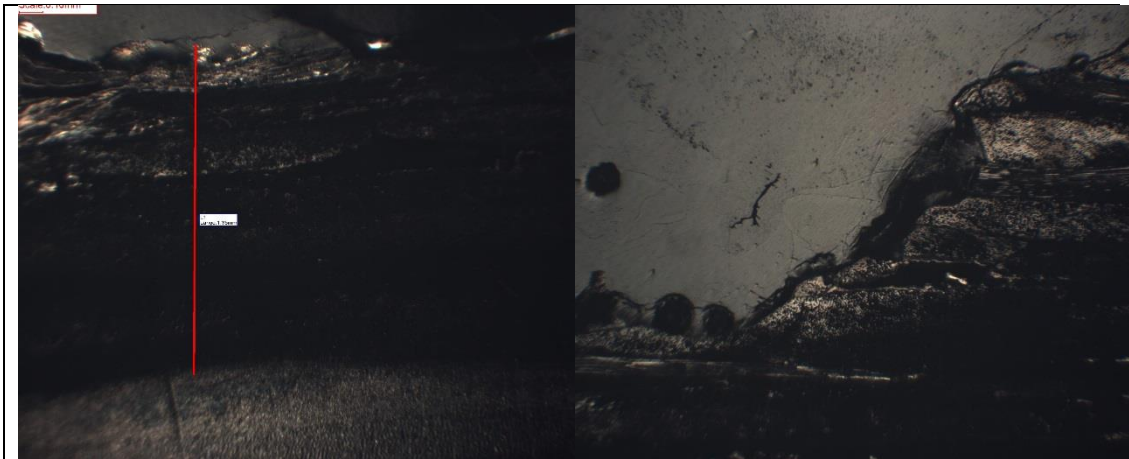
33 A - 12,8 μ s



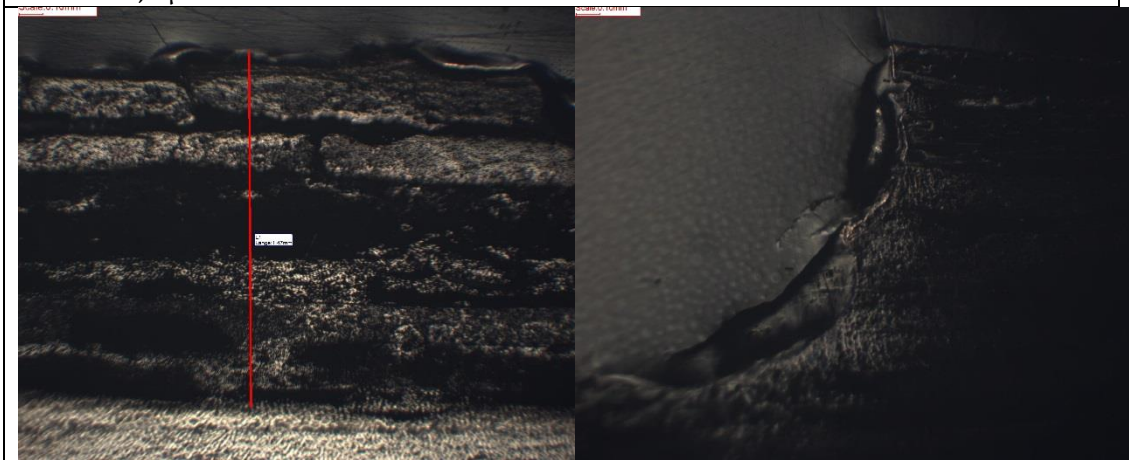
65 A - 12,8 μ s

Bijlage PP: Doorsnede evaluatie naar invloed van pulsduur

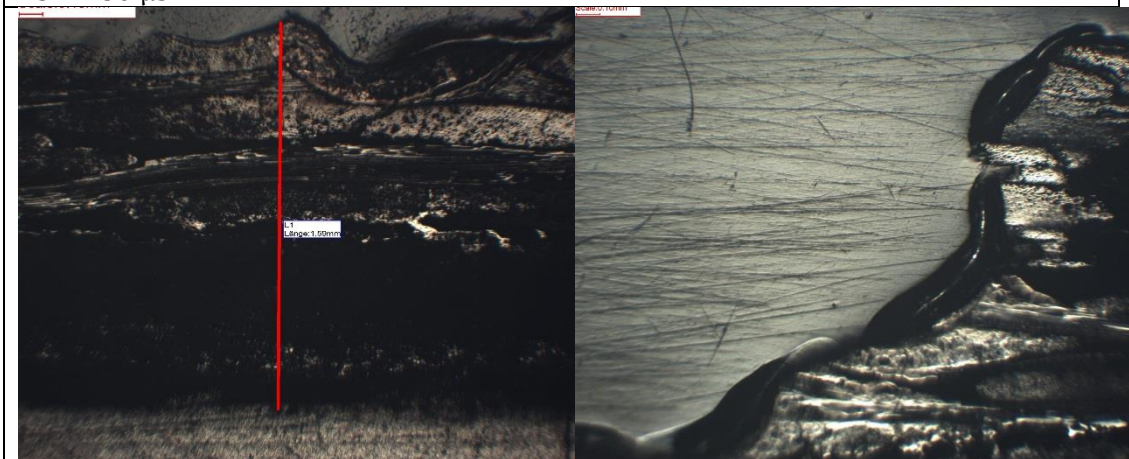




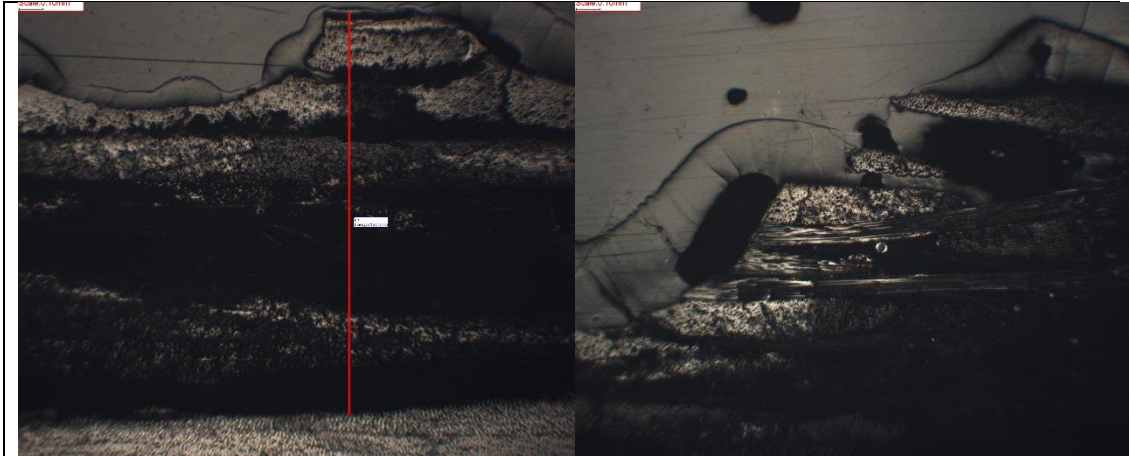
13 A - 12,8 μ s



13 A - 50 μ s

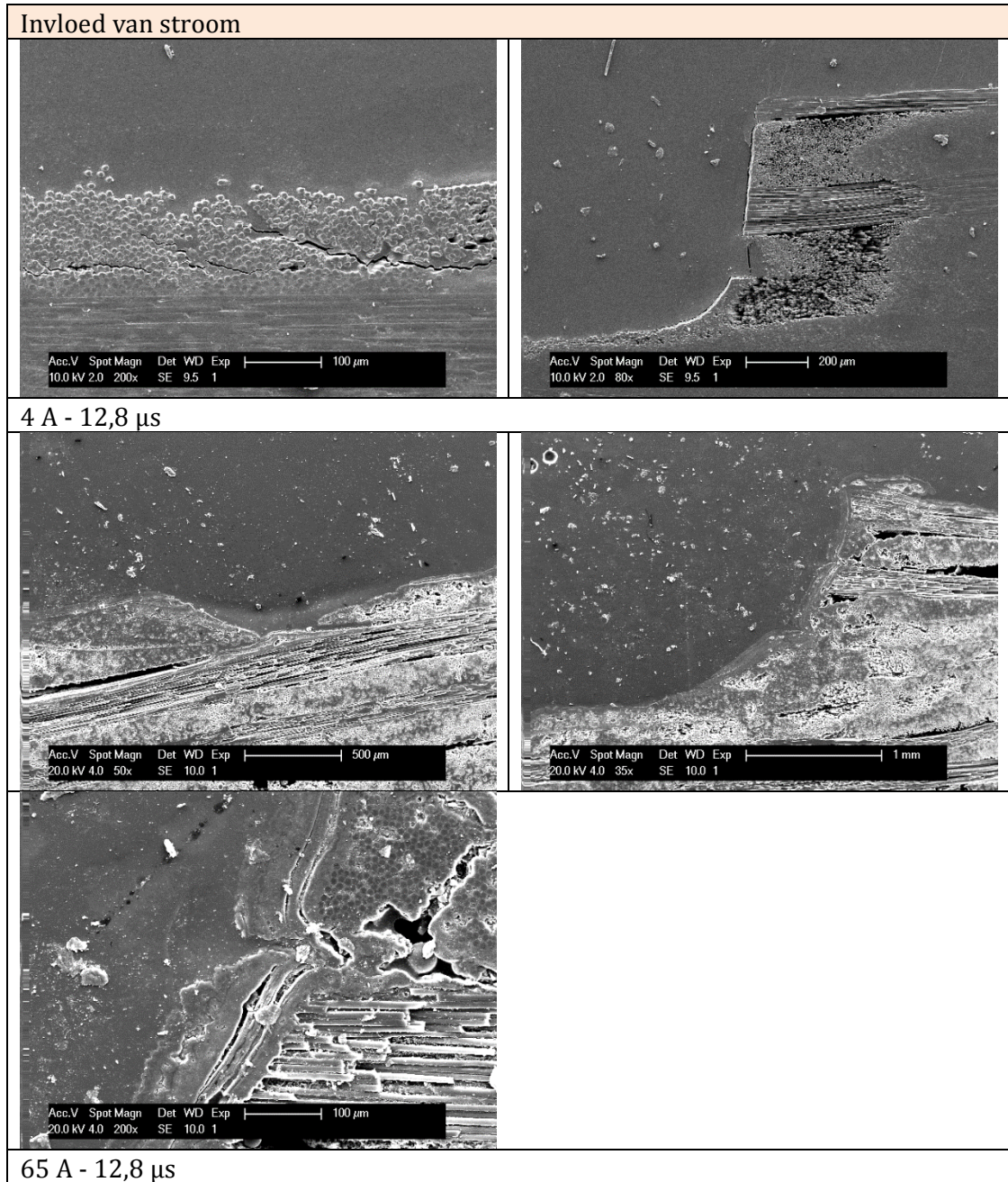


13 A - 100 μ s

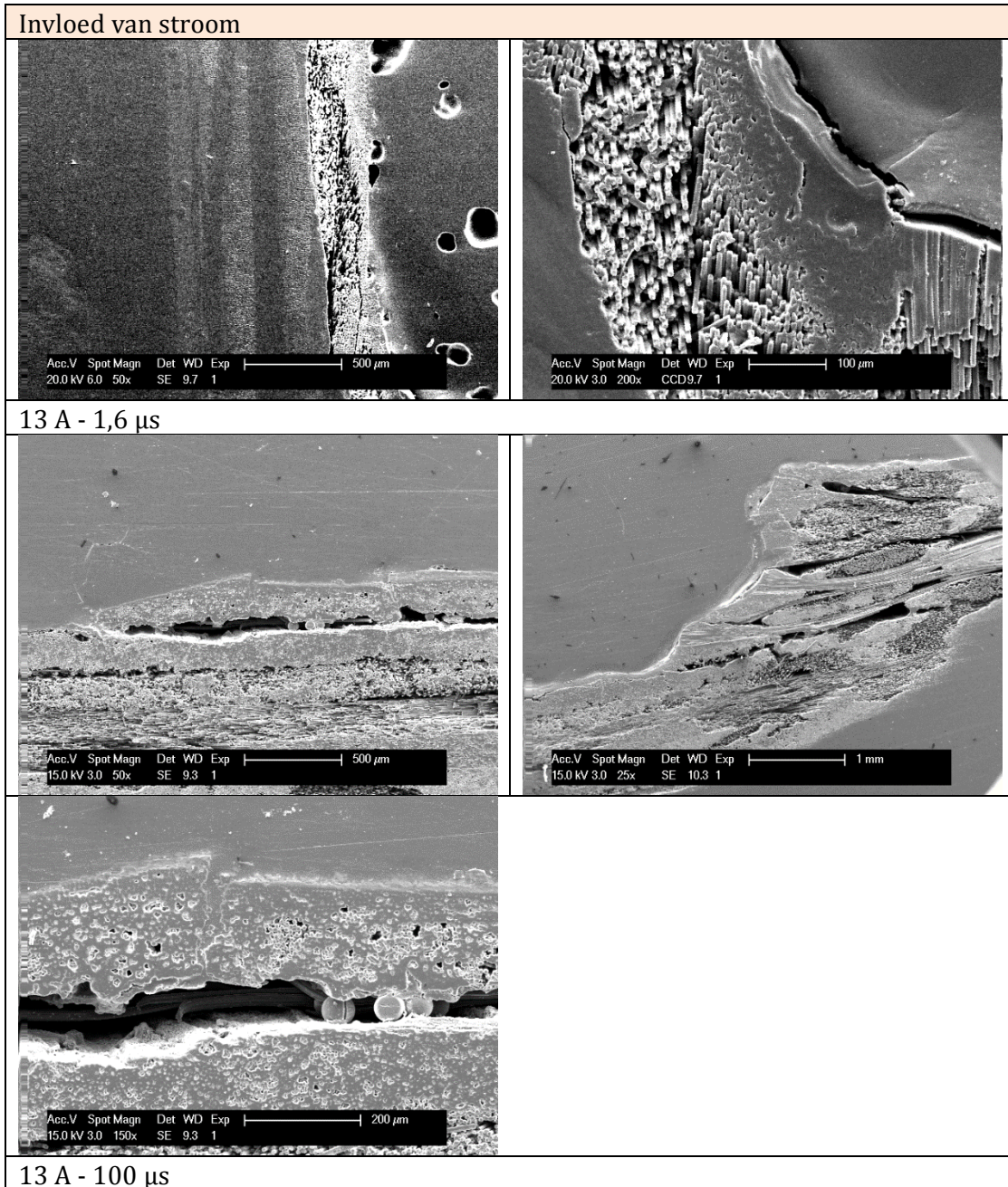


13 A - 200 μ s

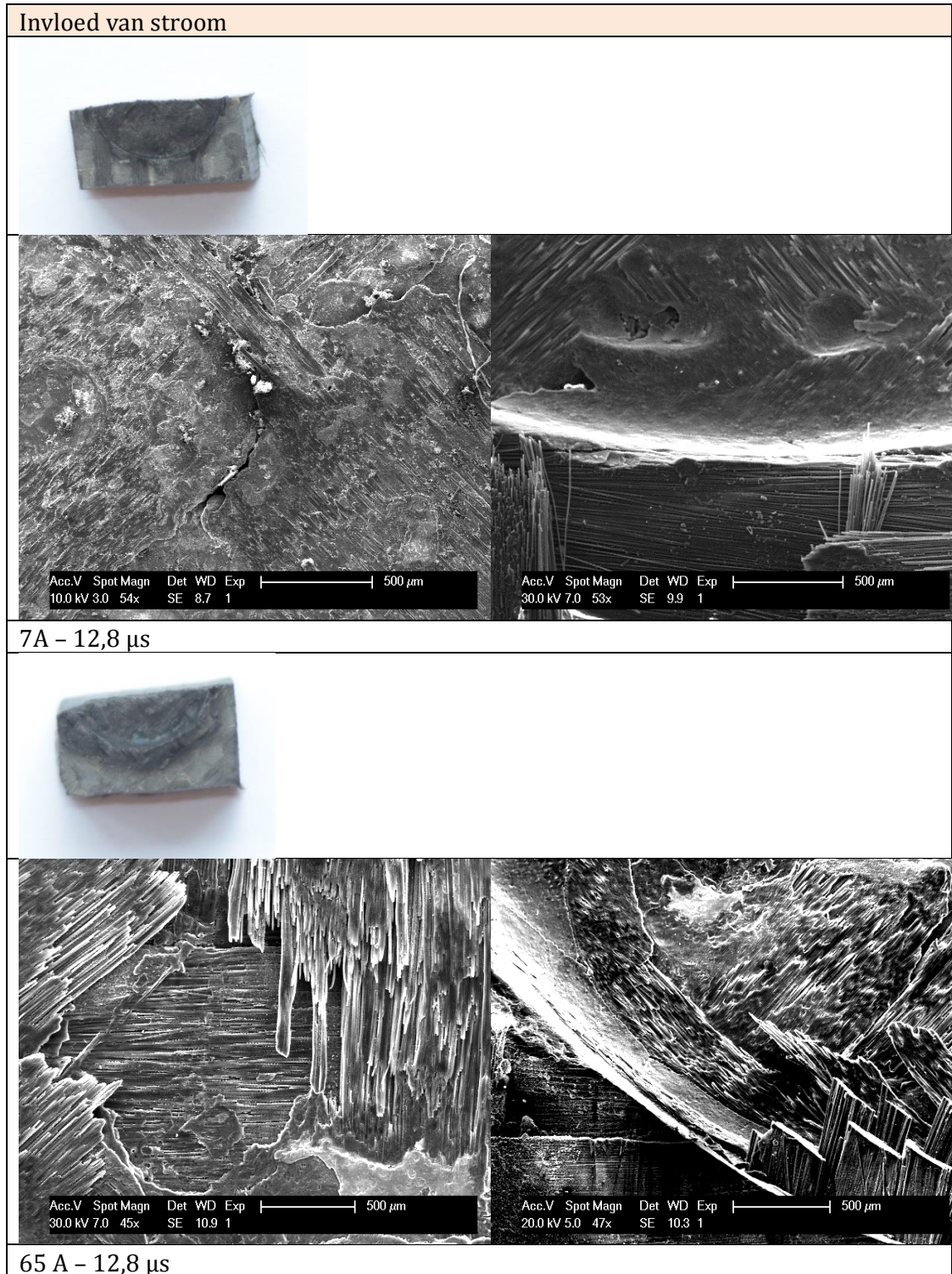
Bijlage QQ: SEM doorsnede evaluatie naar invloed van stroom



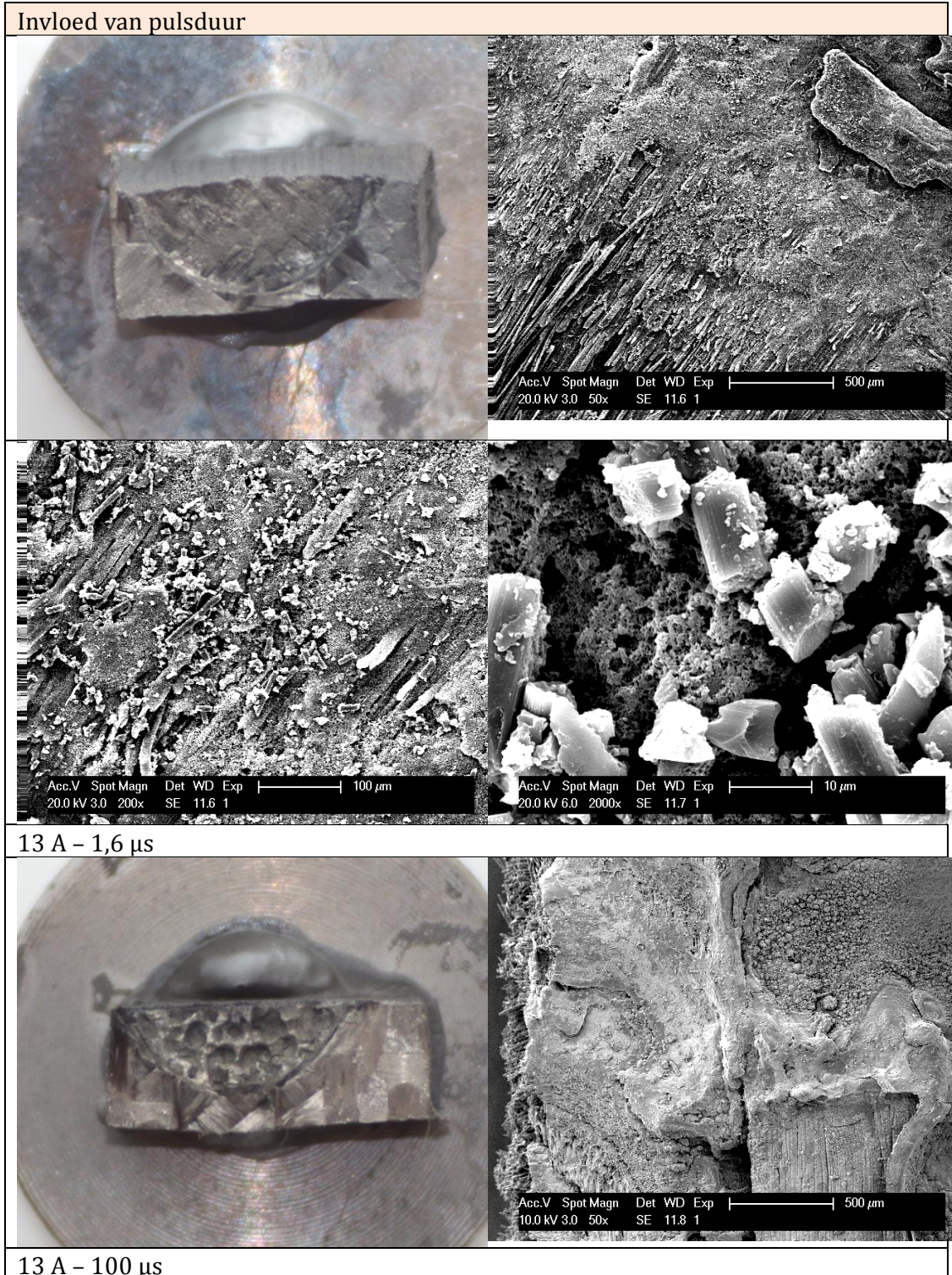
Bijlage RR: SEM doorsnede evaluatie naar invloed van pulsduur



Bijlage SS: SEM oppervlakte evaluatie naar invloed van stroom



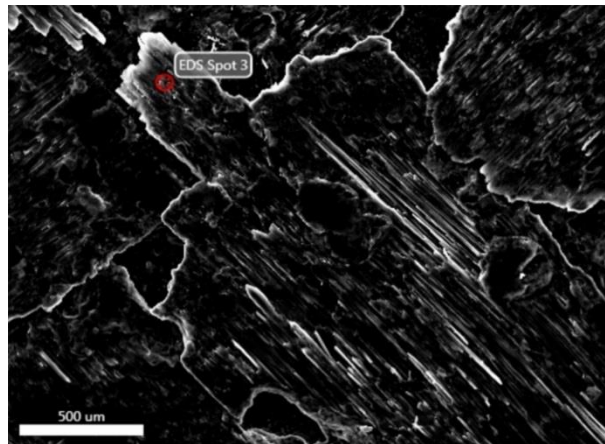
Bijlage TT: SEM oppervlakte evaluatie naar invloed van pulsduur



Bijlage UU: Opstelling met macrolens

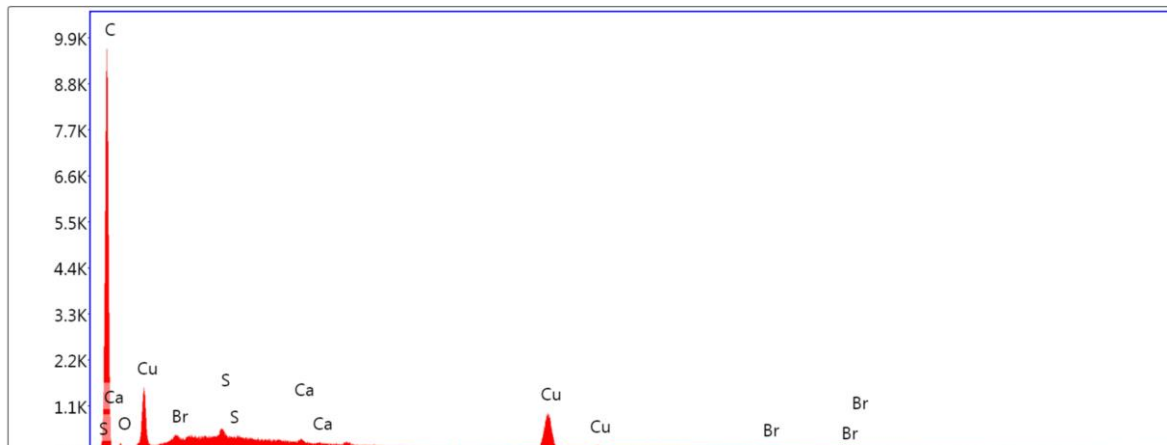


Bijlage VV: EDX analyse van het bewerkt oppervlak (7 A – 12,8 µs)



kV: 30 Mag: 48 Takeoff: 35.6 Live Time(s): 30 Amp Time(µs): 3.84 Resolution:(eV)130.8

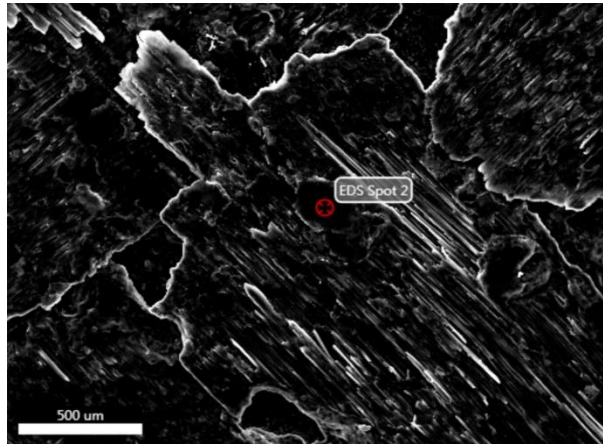
EDS Spot 3



eZAF Smart Quant Results

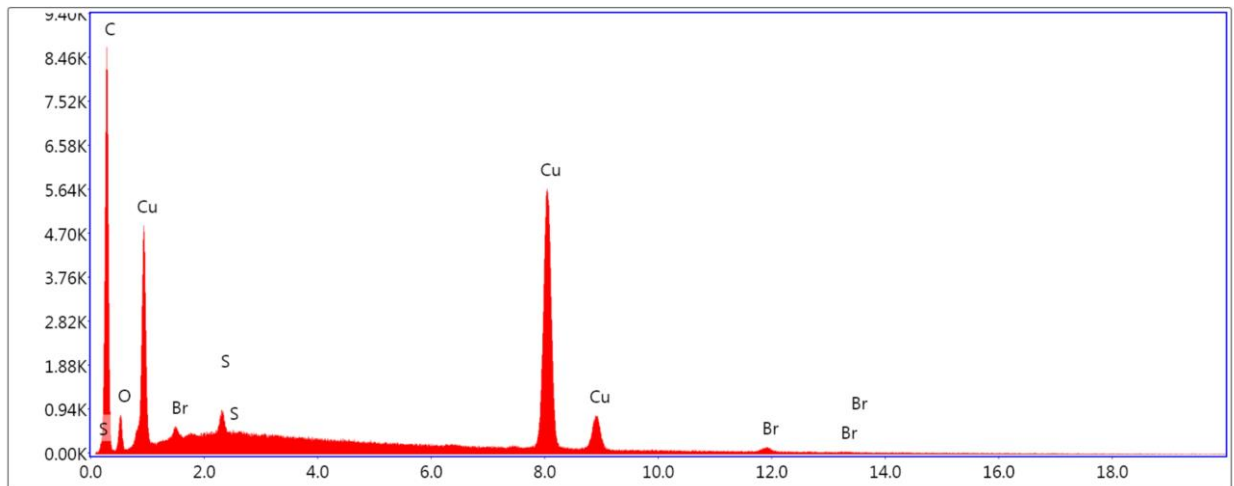
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	90.20	94.97	2216.32	3.95	0.6463	1.0106	0.9905	0.7090	1.0000
O K	5.17	4.09	56.18	13.92	0.0044	0.9727	1.0098	0.0865	1.0000
S K	0.23	0.09	77.82	12.69	0.0020	0.8789	1.0644	0.9704	1.0174
CaK	0.09	0.03	25.92	33.63	0.0009	0.8520	1.0843	1.0717	1.0726
CuK	3.62	0.72	468.28	4.03	0.0338	0.7406	1.1151	1.0416	1.2096
BrK	0.69	0.11	36.15	20.02	0.0075	0.6857	1.1158	1.0217	1.5388

Bijlage WW: EDX analyse van een smeltzone in het bewerkt oppervlak
(7 A – 12,8 μs)



kV: 30 Mag: 48 Takeoff: 35.6 Live Time(s): 30 Amp Time(μs): 3.84 Resolution:(eV)

EDS Spot 2

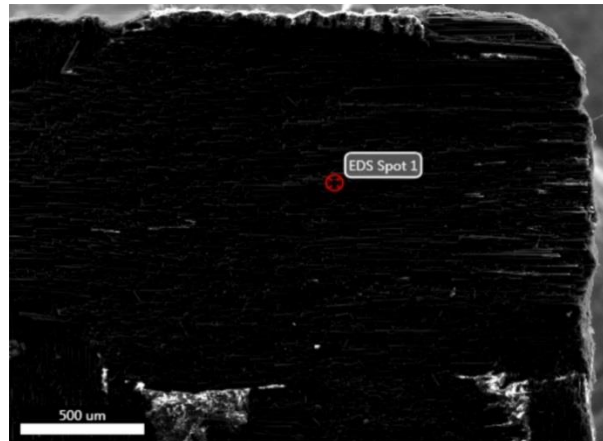


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Super Det

eZAF Smart Quant Results

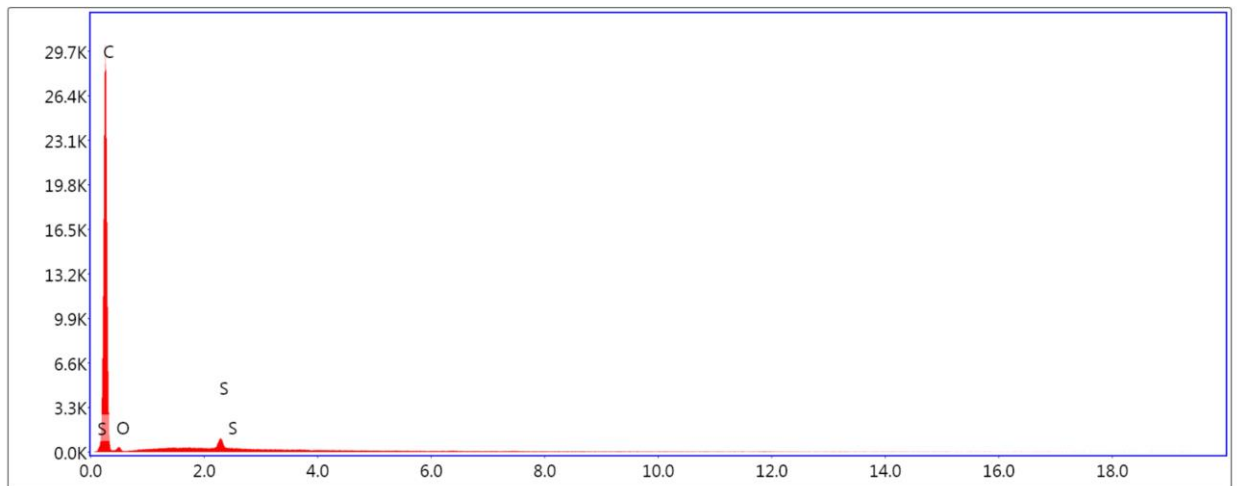
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	73.66	87.44	2028.15	6.28	0.3627	1.0367	0.9681	0.4749	1.0000
O K	9.87	8.79	212.52	11.31	0.0101	0.9997	0.9889	0.1023	1.0000
BrL	0.21	0.04	32.57	17.41	0.0011	0.7411	1.2119	0.7344	1.0069
S K	0.36	0.16	174.97	7.13	0.0027	0.9068	1.0484	0.8310	1.0166
CuK	15.90	3.57	3079.21	2.00	0.1361	0.7662	1.1051	1.0360	1.0784

Bijlage XX: EDX analyse van onbewerkt CFRP



kV: 30 Mag: 48 Takeoff: 34.7 Live Time(s): 30 Amp Time(μs): 3.84 Resolution:(eV)

EDS Spot 1

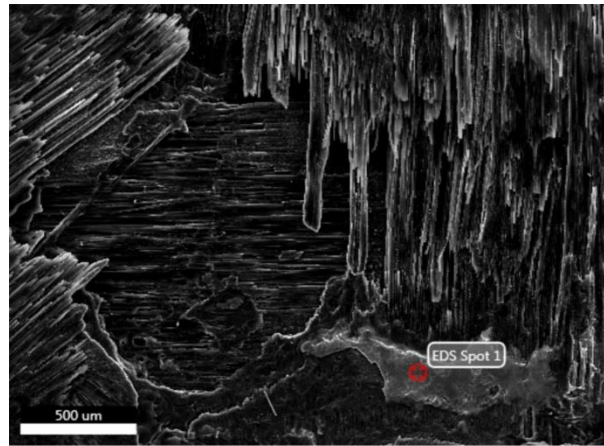


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Super Det

eZAF Smart Quant Results

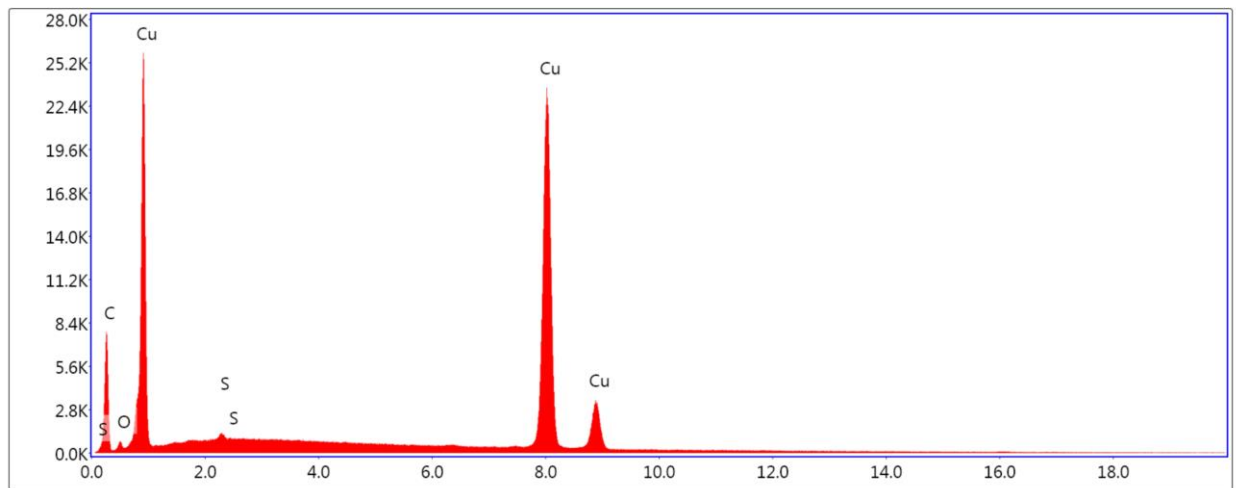
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	94.72	96.09	6920.84	1.98	0.8388	1.0021	0.9987	0.8838	1.0000
O K	4.99	3.80	125.29	12.03	0.0040	0.9639	1.0173	0.0837	1.0000
S K	0.29	0.11	257.57	3.02	0.0027	0.8696	1.0700	1.0359	1.0195

Bijlage YY: EDX analyse van een smeltzone in het bewerkt oppervlak
(65 A – 12,8 μ s)



kV: 30 Mag: 45 Takeoff: 35.8 Live Time(s): 30 Amp Time(μ s): 3.84 Resolution:(eV)

EDS Spot 1

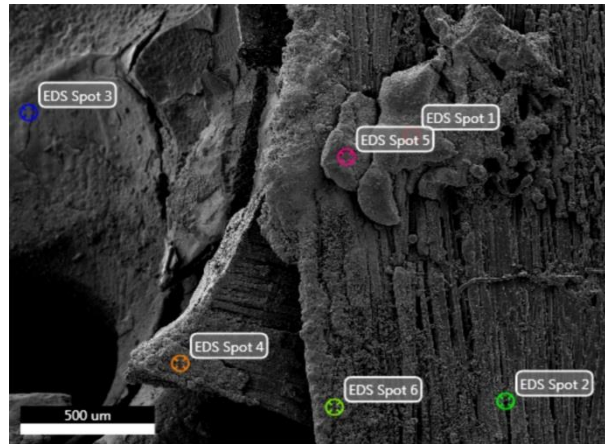


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Super Det

eZAF Smart Quant Results

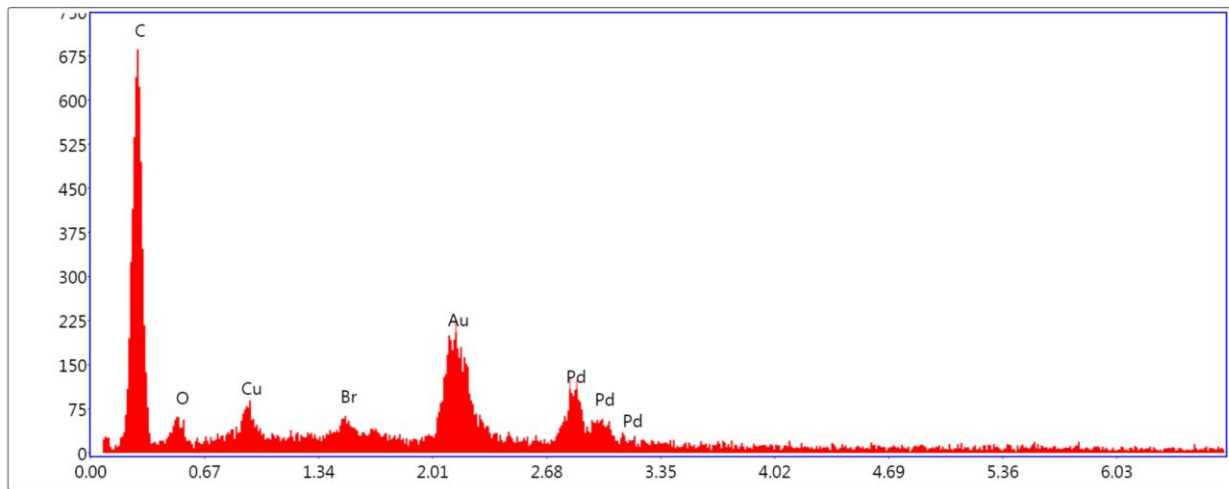
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	56.43	83.56	1859.74	7.85	0.1974	1.0881	0.9282	0.3215	1.0000
O K	5.04	5.60	232.13	11.08	0.0065	1.0519	0.9511	0.1232	1.0000
S K	0.21	0.12	145.39	15.80	0.0014	0.9598	1.0175	0.6628	1.0165
CuK	38.32	10.72	12833.27	1.54	0.3368	0.8151	1.0842	1.0262	1.0510

Bijlage ZZ: EDX analyse van het bewerkt oppervlak (13 A – 100 μs, spot 3)



kV: 10 Mag: 52 Takeoff: 35.6 Live Time(s): 30 Amp Time(μs): 3.84 Resolution:(eV)

EDS Spot 3

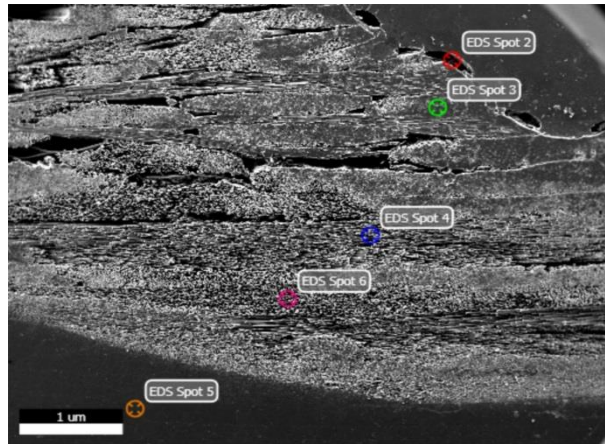


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Super Det

eZAF Smart Quant Results

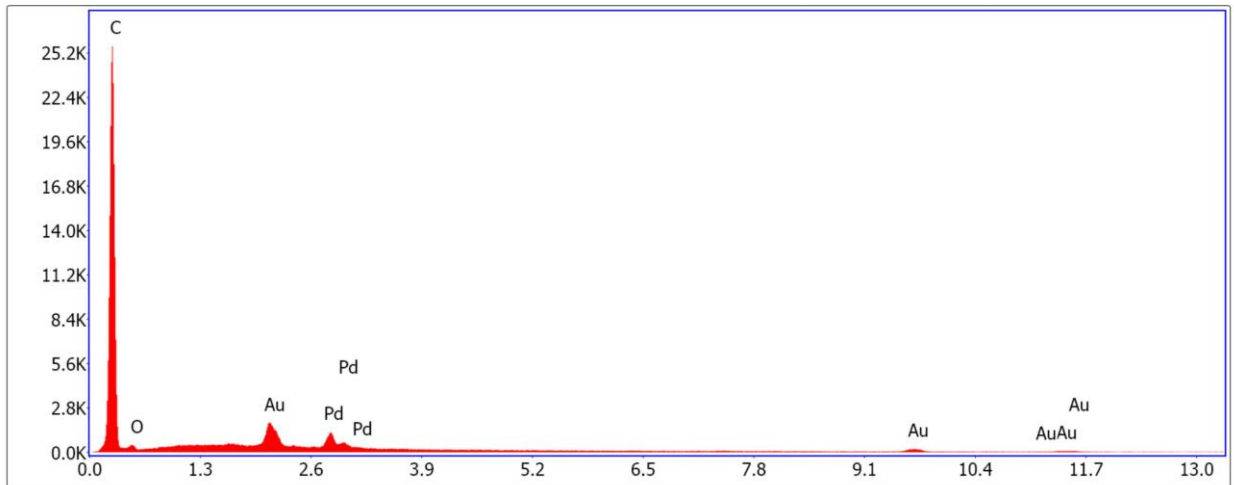
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	51.77	86.81	148.32	7.11	0.4118	1.2335	0.8877	0.6448	1.0000
O K	5.15	6.49	12.82	17.72	0.0186	1.1718	0.9125	0.3082	1.0000
CuL	3.12	0.99	10.02	21.04	0.0215	0.8433	1.0712	0.8194	0.9969
BrL	1.56	0.39	7.11	25.28	0.0118	0.7860	1.1049	0.9625	1.0037
AuM	22.39	2.29	56.00	9.59	0.1660	0.6224	1.2760	1.1526	1.0336
PdL	16.02	3.03	33.18	14.71	0.1170	0.7357	1.1400	0.9909	1.0020

Bijlage AAA: EDX analyse van de doorsnede onder het bewerkt oppervlak in de warmte beïnvloede zone (65 A – 12,8 μ s, spot 3)



kV: 20 Mag: 25 Takeoff: 35 Live Time(s): 30 Amp Time(μ s): 7.68 Resolution:(eV)

EDS Spot 3

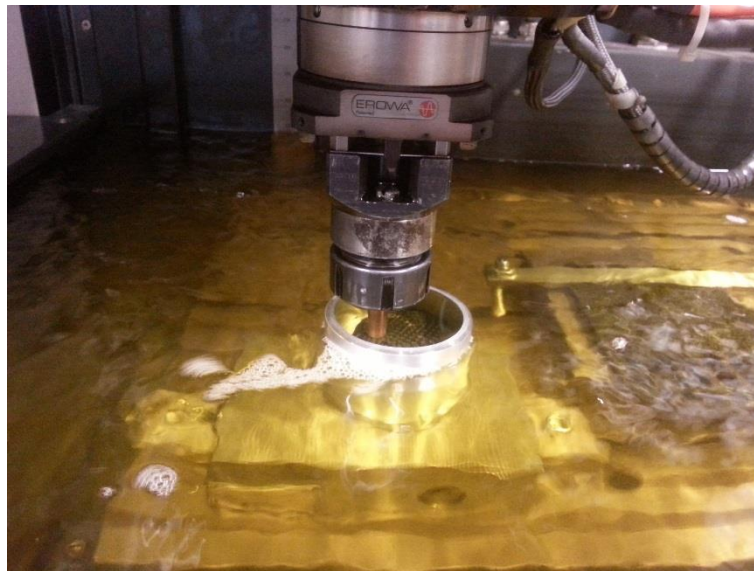


Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Super Det

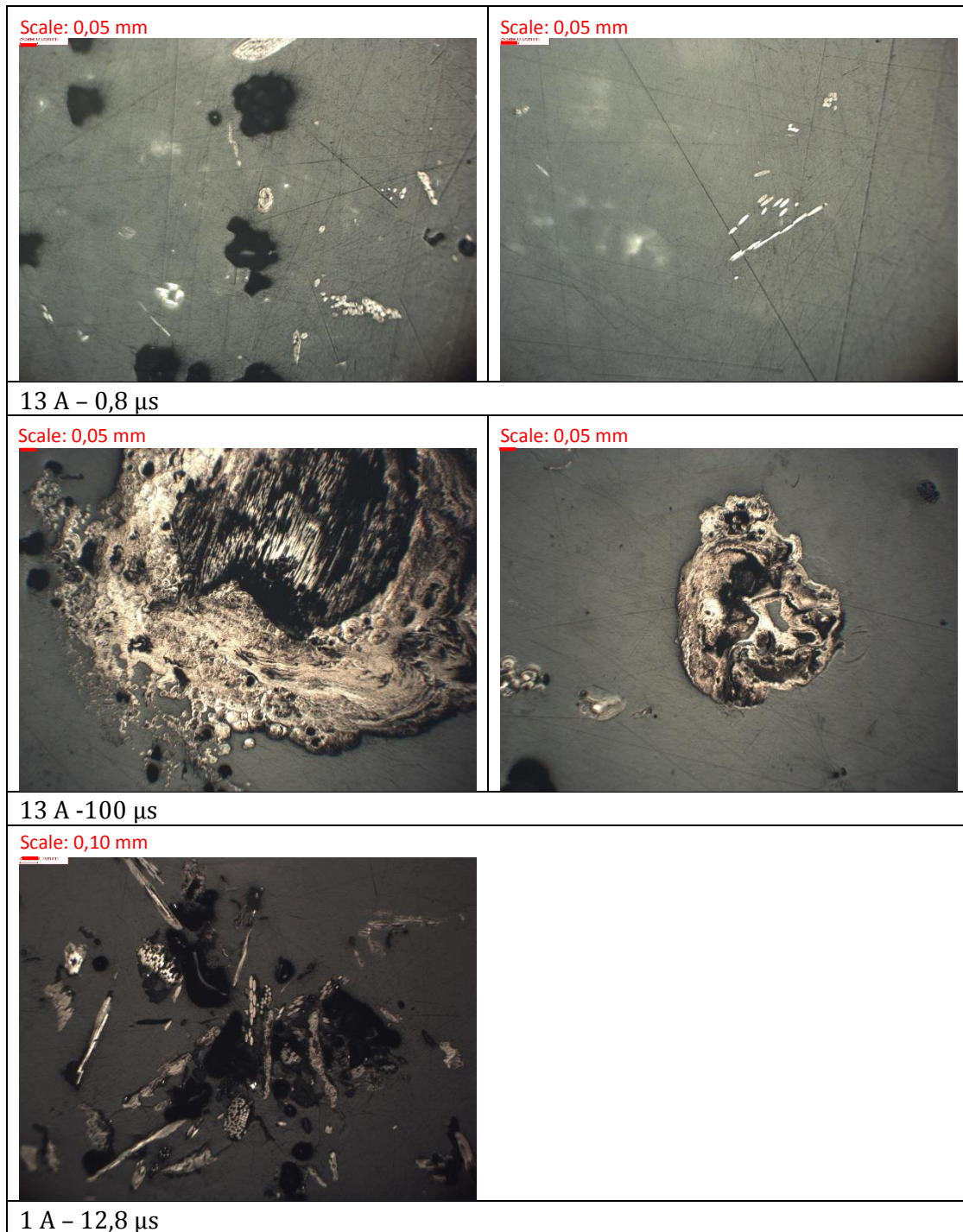
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	85.54	93.78	5835.18	3.22	0.6991	1.0290	0.9759	0.7943	1.0000
O K	6.79	5.59	184.05	11.55	0.0075	0.9845	0.9958	0.1125	1.0000
PdL	2.11	0.26	347.35	7.10	0.0170	0.6679	1.2545	1.1635	1.0344
AuL	5.55	0.37	99.51	16.16	0.0361	0.5036	1.1498	1.0480	1.2322

Bijlage BBB: Testopstelling spaananalyse



Bijlage CCC: Spaananalyse voor vier verschillende parametersets



Scale: 0,10 mm



Scale: 0,10 mm



65 A - 12,8 μ s

Bijlage DDD: Losse gesmolten laag gevormd aan hoge pulsduur (33 A – 200 μ s)

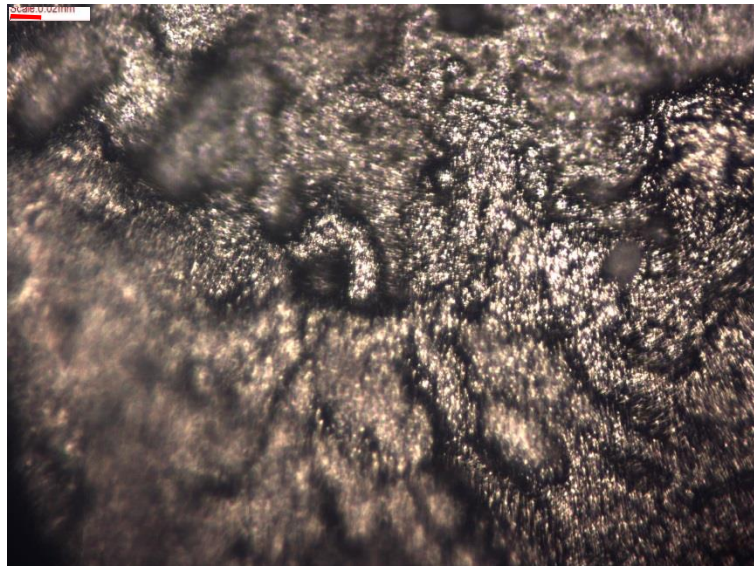


Macroscopisch zijaanzicht



Macroscopisch bovenaanzicht

Scale 0,02 mm

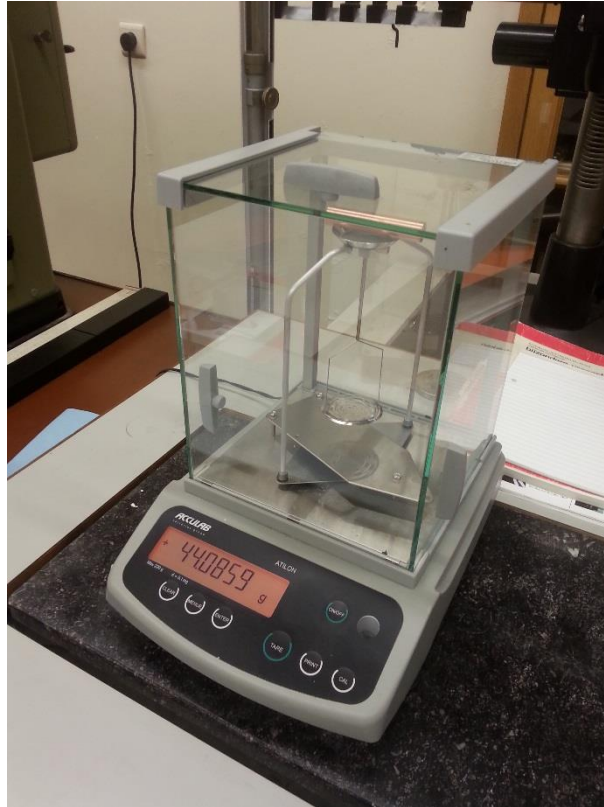


Microscopisch bovenaanzicht

Bijlage EEE: Resultaten van testen aan 80 V

Te gebruiken parameters		Technologie	MRR [mm ³ /min]	Ra [μm]	S	EWR [%]
I [A]	Ton [μs]					
1	3,2	Cu-Steel > Standard	0,66	8	0,991	0,00005
	12	Cu-Steel > Standard	0,48	12	0,984	0,00005
	50	Cu-Steel > Standard	0,96	7	0,997	0,00006
	100	Cu-Steel > Standard	0,65	9	0,993	0,00004
-						
4	6,4	Cu-Al	1,03	21	0,983	0,00018
	12,8	Cu-Al	1,33	9	0,984	0,00006
	50	Cu-Al	1,01	14	0,994	0,00004
	100	Cu-Al	0,29	31	0,979	0,00004
-						
7	6,4	Cu-Al	2,91	5	0,868	0,00021
	12,8	Cu-Al	1,43	6	0,947	0,00013
	50	Cu-Steel > Standard	1,51	5	0,877	0,00009
	100	Cu-Steel > Standard	1,54	9	0,954	0,00008
	200	Cu-Steel > Standard	1,11	12	0,883	0,00007
13	6,4	Cu-Cu	2,45	6	0,732	0,00030
	12,8	Cu-Al	2,45	6	0,768	0,00041
	50	Cu-Al	0,85	5	0,765	0,00023
	100	Cu-Al	0,98	9	0,777	0,00025
	200	Cu-Al	0,86	9	0,718	0,00024
33	6,4	Cu-Cu	2,18	12	0,682	0,00095
	12,8	Cu-Cu	1,79	7	0,692	0,00082
	50	Cu-Al	1,83	8	0,666	0,00063
	100	Cu-Al	1,67	7	0,668	0,00059
	200	Cu-Al	1,79	10	0,665	0,00069
65	6,4	Cu-Cu	2,62	7	0,610	0,00173
	12,8	Cu-Cu	2,53	12	0,634	0,00115
	50	Cu-Al	nvt			
	100	Cu-Al	nvt			
	200	Cu-Al	nvt			

Bijlage FFF: Meettoestel gebruikt voor opmeten elektrodeslijtage
(Acculab ATILON)

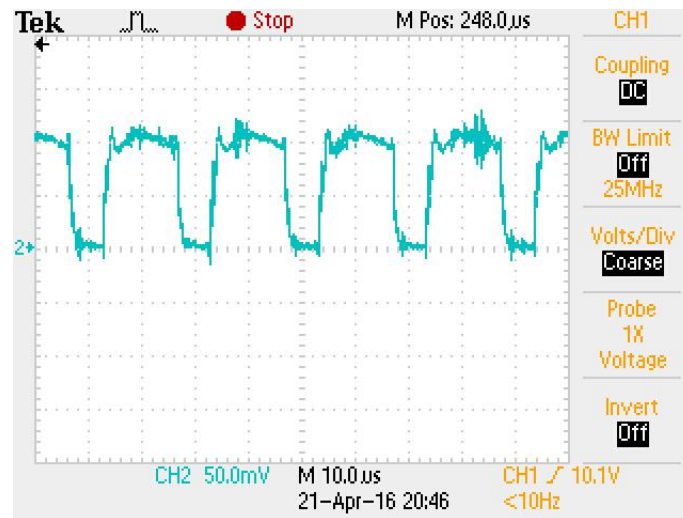


Bijlage GGG: Experimenten bij gebruik grafietelektrode

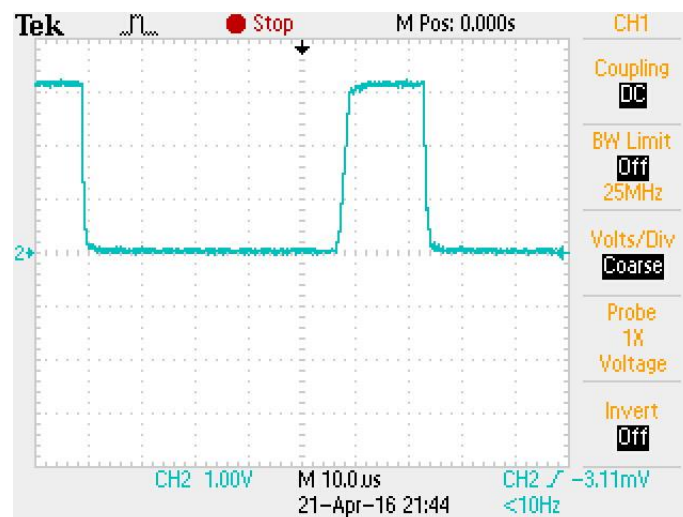
Te gebruiken parameters -80 V		MRR	MRR Grafiet	Ra	Ra Grafiet	S	S Grafiet
I [A]	Ton [μ s]	[mm ³ /min]	[mm ³ /min]	[μ m]	[μ m]		
7	12,8	1,35	0,75	12	27	0,988	0,802
33	12,8	4,36	1,06	31	28	0,928	0,619
13	3,2	2,98	0,43	8	13	0,921	0,702
13	100	2,07	1,14	57	62	0,914	0,670

legende: witte arcering = resultaten koperelektrode
 grijze arcering = resultaten grafietelektrode

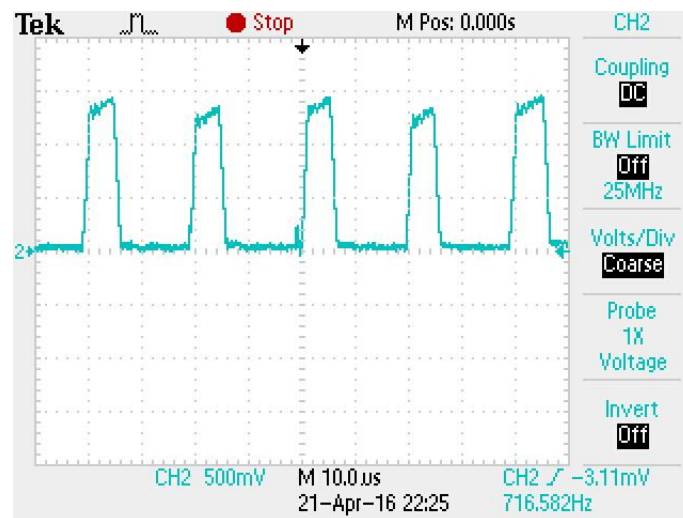
Bijlage HHH: Pulsmonitoring



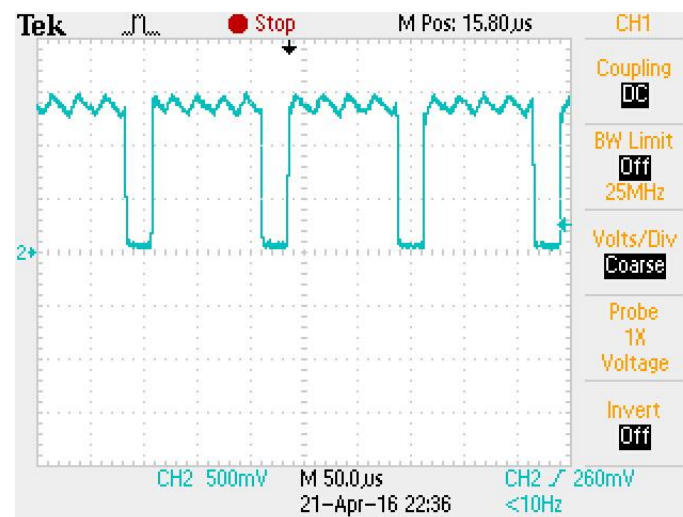
Figuur a: Stroompulsen aan 1 A – 12,8 μs



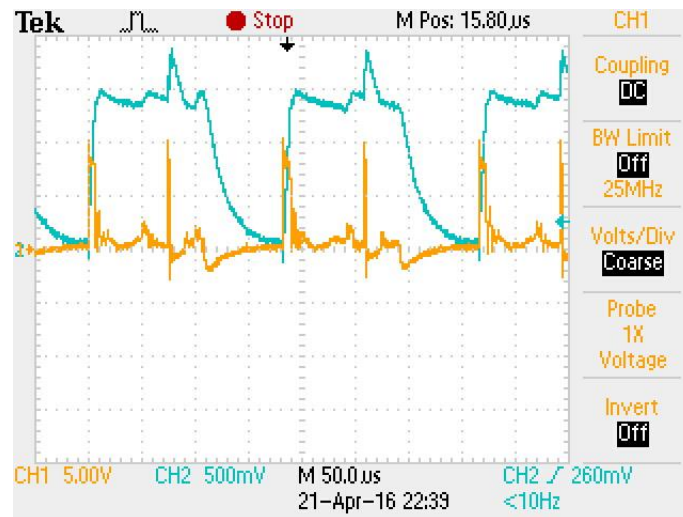
Figuur b: Stroompulsen aan 33 A – 12,8 μs



Figuur c: Stroompulsen aan 13 A – 3,2 μs



Figuur d: Stroompulsen aan 13 A – 100 μs



Figuur e: Stroompulsen aan 13 A – 100 μs (blauw),
spanningspulsen aan 13 A – 100 μs (-80 V) (oranje)

Bibliografie

- [1] S. Lopez-Esteban, C. Guttierrez-Gonzalez, G. Mata-Osoro, C. Pecharroman, L. Diaz, R. Torrecillas en J. Maya, ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF CERAMIC/SEMICONDUCTOR/METAL NANOCOMPOSITES, Spain: Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid.
- [2] W. König, D. Dauw, G. Levy en U. Panten, EDM-Future Steps towards the Machining of Ceramics, Annals of the CIRP, 1988.
- [3] S. Abrate en D. Walton, Composite Manufacturing, 1992.
- [4] J. Kruth, Niet-conventionele bewerkingsmethoden, Leuven: Acco, 2002.
- [5] Wikipedia, „Messing (legering),” [Online]. Available: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Messing_\(legering\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Messing_(legering)). [Geopend 3 maart 2016].
- [6] J. La Heij, L. de Bruijn, J. Veerman en R. Plas, Werktuigbouwkundig tekenen, Groningen: Noordhoff, 2009.
- [7] J. Ivens, Materialen en productietechnieken, Leuven: Acco, 2002.
- [8] T. Badeghar, „Advanced composites market projected to reach USD 24.9 billion by 2020,” *JEC Composites Magazine*, vol. March, nr. 103, p. 106, 2016.
- [9] R. Komanduri, Machining fiber-reinforced composites, U.S. Oklahoma: Department of Mechanical and Aerospace Engineering Oklahoma State University Stillwater, Okla, 1993.
- [10] U. Teicher, S. Muller, J. Münzner en A. Nestler, Micro-EDM of carbon fibre-reinforced plastics, Dresden, Germany: Elsevier, 2013.

- [11] W. Lau, M. Wang en W. Lee, Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials, Greta Britain: Int. J. Mach. Tools Manufact., 1989.
- [12] H. Hocheng, Y. H. Guu en N. H. Tai, The Feasibility Analysis of Electrical-Discharge Machining of Carbon - Carbon Composites, China: Taylor & Francis Group, 1998.
- [13] G. Semon, A Practical Guide to Electro-Discharge Machining, France: Ateliers Des Charmilles S.A., 1975.
- [14] F. Roethel, L. Kosec en V. Garbajs, Anals of the CIRP, Vol.25, pp. 135-140, 1976.
- [15] Y. Guu, H. Hocheng en S. L. N.H. Tai, Effect of electrical discharge machining on the charas-cteristics of carbon fiber reinforced carbon composites, China: Journal of materials science, 2001.
- [16] P. George, B. Raghunath, L. M. Manocha en A. M. Warriar, EDM machining of carbon-carbon - a Taguchi approach, India: Journal of Materials Processing Technology, 2004.
- [17] Solutions en G. Machining, „History of GF,” [Online]. Available: http://www.gfms.com/content/gfac/country_US/en/about-gf-machining-solutions/profile/history-.html. [Geopend 8 april 2016].
- [18] G. AgieCharmilles, User Manual C, Losone, 2011.
- [19] L. J. Pauw. [Online]. Available: <https://www.qdusa.com/sitedocs/appNotes/ppms/1076-304.pdf>. [Geopend 25 april 2016].
- [20] D. A. KHAN en M. HAMEEDULLAH, EFFECT OF TOOL POLARITY ON THE MACHINING CHARACTERISTICS IN ELECTRIC DISCHARGE MACHINING OF SILVER STEEL AND STATISTICAL MODELLING OF THE PROCESS, India: International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2011.
- [21] „EDM Tips - How to use electrical discharge machining,” [Online]. Available: http://www.edm.kd-solution.com/en_edm16.html. [Geopend 30 april 2016].
- [22] [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Calcium>. [Geopend 16 mei 2016].
- [23] [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Zwavel>. [Geopend 8 mei 2016].
- [24] [Online]. Available: <https://www.quora.com/Why-is-bromine-such-a-commonly-used-component-in-fire-retardants>. [Geopend 8 mei 2016].

- [25] F. L. Amorim en L. Weingaertner, The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel, Brasil: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2007.
- [26] Junkmail, „SPARK ERODING MACHINE FOR TOOL MAKING,” [Online]. Available: <http://www.junkmail.co.za/business/industrial-machinery/gauteng/johannesburg/brakpan/spark-eroding-machine-for-tool-making/60859178>. [Geopend 2 april 2016].
- [27] Total. [Online]. Available: <http://www4.total.fr/asia-oceania/malaysia/ProductData/B2B/Industry%20Lub/Metal%20Working%20Fluids/Diel%207000/DIEL%20MS%207000%20-%20product%20spec.pdf>. [Geopend 16 april 2016].
- [28] E. Tools, „Product Engineering & Industrial Design,” [Online]. Available: <http://www.formlovesfunction.com/2009/08/edm-tolerances/>. [Geopend 28 februari 2016].
- [29] B. Engineering, „Wire Electrical Discharge Machining,” [Online]. Available: <http://wedm.pl/>. [Geopend 28 februari 2016].
- [30] C. Tsai, „Carbon fiber valley in Taiwan,” [Online]. Available: http://www.sports.org.tw/e/report/2010yearbook_subject/01carbon.html. [Geopend maart 17 2016].
- [31] A. Bunsell, Fibre Reinforcements for composites, Elsevier Science Publishers B.V., 1988.
- [32] P. Pattinson, „Industrial & Commercial Auctioneers,” [Online]. Available: http://www.ppauctions.com/archived/archived_lot.php?arc_id=16366. [Geopend 20 maart 2016].
- [33] [Online]. Available: http://pop.h-cdn.co/assets/cm/15/05/54cb189b7e8f2_-_carbon-revolution-0813-ixvsy1-mdn.jpg. [Geopend 18 april 2016].
- [34] „Molding,” [Online]. Available: <http://www.fudow.co.jp/assets/images/molding/cfrp1.jpg>. [Geopend 18 april 2016].
- [35] [Online]. Available: <https://www.qdusa.com/sitedocs/appNotes/ppms/1076-304.pdf>. [Geopend 25 april 2016].
- [36] [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur>. [Geopend 16 mei 2016].

Fiche masterproef

Student: Joris Claes

Titel: Vonkerosie van koolstofvezel versterkte kunststof

Engelse titel: Electro discharge machining of carbon fiber reinforced polymer

UDC: 621

Korte inhoud:

Deze masterproef gaat na of het mogelijk is om zinkvonken (EDM) toe te passen op koolstofcomposiet (CFRP). Er is over dit onderwerp weinig literatuur beschikbaar. Daarom wordt gestart met enkele experimenten. Deze tonen aan dat industrieel CFRP ($\rho = 0,01\Omega\text{cm}$) bewerkbaar is met vonkerosie. Een ruimer opgezet experimenteel onderzoek, bestudeert in tweede instantie de optredende materiaalafnamemechanismen en de invloed van het vonkproces op het materiaal. De volgende experimentele randvoorwaarden zijn daarbij van toepassing: een koperelektrode ($\emptyset = 10\text{mm}$) met negatieve polarisatie die 1mm diep vonkt. Een parameterbereik met stroom van 1 tot 65A en pulsduur van 0,8 tot 200 μs . Verder wordt een machinefunctionaliteit gebruikt waardoor overige parameters automatisch optimaal worden geregeld. Het resultaat wordt onderzocht via een spaananalyse en microscopie, en SEM en EDX analyses toegepast op bewerkte doorsneden en oppervlakken. Dit laat toe om vier mogelijke optredende materiaalafnamemechanismen te verklaren. De verschillende experimenten resulteren ook in twee optimale vonktechnologieën. Met een statistische analyse wordt de relatie tussen de procesparameters en een aantal uitgangsgrootheden (MRR, Ra en randkwaliteit) onderzocht. De studie wordt afgerond met het onderzoeken van het effect van polarisatie; de invloed van een grafietelektrode; en een analyse van stroom en spanningspulsen via pulsmonitoring.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de ingenieurswetenschappen: Werktuigkunde

Promotor(en): Prof. Dr. Ir. B. Lauwers
Prof. Dr. Ir. D. Reynaerts

Assessoren: Dr. Ir. J. Qian
Drs. Ir. J. Bouquet

Begeleiders: Drs. Ing. F. Vogeler

