Lectoraat Kunststoftechnologie

AMBITION Deel 2: Optimaliseren van het printproces en de producten voor Laser Powder Bed Fusion













Colofon

Titel:	AMBITION deel 2: Optimaliseren van het printproces en de producten voor Laser Powder Bed Fusion
Publicatie nummer:	LKT-AM-108685-22-02
Publicatiedatum:	Mei 2022
Auteurs:	P. Dijkstra, T. Mateboer, T. Stobbe, E. Roetman, G. Heideman, R. van Abbema
Subsidieverstrekker:	GreenPAC en Provincie Overijssel
Fotografie:	Hogeschool Windesheim
Onderzoekslijnen:	Circulaire economie
	Hybride ontwerp

Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.





Samenvatting

De ontwikkelingen rondom Laser Powder Bed Fusion (LPBF) oftewel metaalprinten wordt vooral gedreven door (grote) internationale spelers. Door de snelle ontwikkelingen is het voor Nederlandse bedrijven, en zeker het MKB, soms lastig om deze technologie te leren benutten en toe te passen. Daarom doet het Lectoraat Kunststoftechnologie van Hogeschool Windesheim met een aantal partners onderzoek naar deze techniek. Deze publicatie is bedoeld voor engineers en managers van onderzoeks- en ontwikkelafdelingen die meer willen weten over het printproces, het ontwerpen voor LPBF en de materiaaleigenschappen van geprinte producten. In deze publicatie worden drie deelonderzoeken beschreven, die ingaan op de vraag hoe het LPBF proces en de daarmee geprinte producten geoptimaliseerd kunnen worden. De onderzoeken zijn uitgevoerd op de LPBF machine van Hogeschool Windesheim, de EOS M400. Op deze printer wordt de aluminiumlegering AlSi10Mg gebruikt.

1. Stroomlijnen van het LPBF printproces

Tijdens het LPBF proces kunnen door de temperatuurgradiënten krimpspanningen en deformaties (warpage) ontstaan. Als deze problemen middels simulatie goed voorspeld kunnen worden, kunnen de consequenties inzichtelijk worden gemaakt en eventueel bijgestuurd voordat er daadwerkelijk geprint wordt. Hiermee kunnen verkeerde prints worden voorkomen. In dit deelonderzoek is de deformatie van producten tijdens het printproces gesimuleerd. Hieruit blijkt dat thermische deformatie goed voorspeld kan worden met Ansys Mechanical. Bij de drie proeven geven de simulaties resultaten die, tot een deformatie van 0,8 mm, overeenkomen met de praktijk. Bij grotere deformaties is een afwijking geconstateerd tussen de simulatie en de werkelijk gemeten deformatie, maar omdat een dergelijk grote afwijking in de meeste gevallen zal leiden tot product afkeur, heeft dit geen invloed op de toepasbaarheid van deze simulaties. Simuleren is dus een waardevol en betrouwbaar gereedschap om deformaties bij het LPBF printproces te voorspellen

Ook is onderzocht hoe gebruik kan worden gemaakt van contactloze supportstructuren, wat kan leiden tot aanzienlijke reductie in de nabewerkingstijd. Op basis van de uitgevoerde experimenten kan gesteld worden dat het onder bepaalde voorwaarden mogelijk is om zogeheten prop supports toe te passen voor producten van AlSi10Mg. Een belangrijke voorwaarde is dat het product wordt opgebouwd vanuit een spitse lijn of punt. De experimenten hebben tevens richtlijnen opgeleverd over de minimale tussenafstand tussen product en ondersteuning voor verschillende hoeken.

2. Het beïnvloeden van materiaaleigenschappen van 3D-metaalgeprinte producten

Daarnaast is de invloed van verschillende procesparameters op de mechanische eigenschappen onderzocht. De vloeisterkte, maximale treksterkte en rek-bij-breuk blijken afhankelijk te zijn van de energiedichtheid. Welke procesparameters optimaal zijn, is afhankelijk van de toepassing en de benodigde mechanische eigenschappen. Ook de printoriëntatie heeft invloed op de mechanische eigenschappen, met name vanwege de verschillen in oppervlakteruwheid die hierdoor ontstaan. De positie van de proefstukken op het bouwplatform heeft geen significante invloed op de mechanische eigenschappen.

Om te voorkomen dat producten kromtrekken wanneer deze van het bouwplatform worden verwijderd, wordt vaak eerst een warmtebehandeling toegepast. In dit project is onderzocht wat de invloed van spanningsarm gloeien is op de mechanische eigenschappen van geprint AlSi10Mg bij verschillende printoriëntaties, energiedichtheden en posities op het bouwplatform. Uit de trekproeven blijkt dat spanningsarm gloeien de vloeisterkte en maximale treksterkte in alle gevallen doet dalen. De rek bij breuk en impactsterkte stijgen ten gevolge van spanningsarm gloeien, hoewel de spreiding ook stijgt. Het materiaal wordt dus taaier.

Tevens is onderzocht wat de vermoeiingseigenschappen van geprint aluminium zijn. De literatuur laat zien dat de vermoeiingseigenschappen van LPBF producten afhankelijk zijn van meerdere parameters, waaronder de printoriëntatie (en de resulterende verschillen in oppervlakteruwheid), thermische geschiedenis, poedergrootte en laagdikte. Dit praktijkonderzoek toont aan dat een hoge oppervlakteruwheid een negatieve invloed heeft op de vermoeiingseigenschappen. Indien een onderdeel wordt blootgesteld aan wisselende belastingen, wordt een nabehandeling geadviseerd die de oppervlakteruwheid verminderd.

3. De behandeling van oppervlaktes van geprinte producten

Anodiseren is een behandeling die veel wordt toegepast op aluminium producten, omdat dit resulteert in een verbeterde corrosiebestendigheid en de mogelijkheid tot het kleuren van het materiaaloppervlak. Tijdens het ontwikkelen van één van de demonstrators is onderzocht of geprint AlSi10Mg geanodiseerd kan worden. Zowel uit de literatuur als uit de uitgevoerde testen blijkt echter dat het lastig is een anodisatie laag van voldoende dikte te verkrijgen. De corrosiebestendigheid kan dan ook niet worden gegarandeerd en zal nader onderzocht moeten worden. Het laagdikteprobleem wordt veroorzaakt door de verdeling van het silicium dat in het aluminium aanwezig is, over het geprinte oppervlak. Ook blijkt het niet mogelijk te zijn om verschillende kleuren toe te passen in het anodisatieproces van geprint AlSi10Mg. Bij het oxideren van het materiaal ontstaat namelijk een donkergrijze kleur.

4. Demonstrators die nieuwe mogelijkheden van 3D-metaalprinten illustreren

Tenslotte zijn er verschillende demonstrators ter inspiratie ontwikkeld. Middels deze demonstrators is aangetoond dat lichtgewicht ontwerpen met AM uitstekend ingezet kan worden voor grippers. Het geïntegreerd printen van vacuüm-ejectoren vergt nog aanvullend onderzoek. Ook voor unieke ontwerpen is het gebruik van de technologie aangetoond met een demonstrator van een deurklink voor bijvoorbeeld superjachten. Tenslotte zijn ook de mogelijkheden voor massaproductie met LBPF middels een demonstrator aangetoond in het ontwerp van een ovenknop als spare-part onderdeel.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1. Doelstelling	2
1.2. Laser Powder Bed Fusion	2
1.3. Inventarisatie van praktijkvragen	3
1.4. Leeswijzer	4
2. Het voorspellen van deformatie tijdens het printproces	5
2.1. Simulatie van warmtehuishouding tijdens het printproces	5
2.2. LPBF simulatie technieken	б
2.2.1. Lumped Layer approach	7
2.2.2. Inherent Strain Method	7
2.2.3. Rekentijd	8
2.3. Vergelijking tussen LPBF simulaties en experimenten	9
2.4. Conclusie	11
3. Printen met contactloze support	
3.1. Vraagstelling	13
3.2. Experimenten	13
3.3. Oriëntatie en tussenafstand	14
3.4. Resultaten & Discussie	15
3.4.1. Beoordelen van de aanhechting tussen product en support	16
3.4.2. Kegels met prop supports	17
3.4.3. Proefstukken 0,09 mm en 0,18 mm tussenafstand	17
3.4.4. Proefstukken 0,27 mm en 0,36 mm tussenafstand	19
3.5. Conclusies en aanbevelingen	21
3.6. Toepassing van contactloos printen	
4. Invloed van procesparameters op mechanische eigenschappen	
4.1. Theoretische achtergrond	23
4.2. Experimentele opzet	24
4.3. Resultaten	27
4.4. Conclusies en aanbevelingen	
5. Invloed warmtebehandeling op mechanische eigenschappen	
5.1. Theoretische achtergrond	
5.2. Experimentele opzet	
5.3. Resultaten	
5.4. Conclusie	



6. Vermoeiingseigenschappen van aluminium LPBF producten	
6.1. 3D-metaalprinten en metaalmoeheid	
6.2. Vermoeiingsexperimenten	54
6.3. Conclusie	
7. Het anodiseren van geprint aluminium	
8. Demonstrator: Lichtgewicht grippers voor cobots	60
8.1. Uitgangspunten voor ontwerp	60
8.2. Selectie zuignappen en vacuüm-ejectoren	61
8.3. Gripper voor vlakke objecten	64
8.4. Gripper voor enkel gekromde objecten	69
8.5. Conclusies & leerpunten	74
9. Demonstrator: deurvergrendeling moffeloven	
9.1. Ontwerp	76
9.2. Productie & gebruik	77
9.3. Casus voor serieproductie	78
10. Demonstrator: deurklink superjacht	80
Referentielijst	83

1. Inleiding

Additive Manufacturing (AM) voor metalen onderdelen is sterk in opkomst in de wereldwijde industrie. Deze markt groeit ieder jaar met zo'n 25%. Ook in Nederland wordt deze technologie steeds vaker toegepast voor het produceren van hoogwaardige metalen componenten. 3D-metaalprinten is geen vervanging van de conventionele metaalbewerkingstechnieken, maar een belangrijke aanvulling; het is een technologie die diverse nieuwe mogelijkheden biedt aan de industrie. Het biedt ontwerpers bijvoorbeeld grote vormvrijheid, dus de mogelijkheid om complexe vormen te realiseren. Producenten biedt het de mogelijkheid om met een korte doorlooptijd, unieke en hoogwaardige producten te printen. Mede hierdoor is 3D-metaalprinten een leidende techniek geworden bij verschillende innovaties in de maakindustrie. Voorbeelden van dit soort innovaties zijn:

- Geoptimaliseerde producten en processen: verschillende industriële processen worden verbeterd met behulp van 3D-metaalprinten. Zo worden bijvoorbeeld geoptimaliseerde, lichtgewicht tools en grippers geprint voor robotarmen. Hiermee kan de verwerkingssnelheid van deze robotarmen worden verhoogd en verbruiken ze aanzienlijk minder energie.
- Doorlooptijden verkorten: producten worden snel geleverd, waardoor bijvoorbeeld reserveonderdelen pas geproduceerd hoeven te worden zodra deze nodig zijn. Dat is mogelijk doordat het een zeer flexibele productiemethode is, waarmee producten zelfs per stuk geprint kunnen worden binnen een korte doorlooptijd;
- Lichtgewicht ontwerpen: door 3D-metaalprinten kunnen geavanceerde ontwerpmethodes worden toegepast door steeds meer bedrijven. Producten kunnen complexe inwendige structuren bevatten dankzij de laagsgewijze opbouw. Hierdoor hebben producten zowel goede mechanische eigenschappen als een laag gewicht. Dit maakt 3D-printen zeer geschikt voor hightech industrieën, zoals de lucht- en ruimtevaart, maar de techniek wordt om die reden ook steeds meer toegepast in de brede maakindustrie.
- Maatwerk: onderdelen en producten die zijn ontworpen en geprint voor specifieke toepassingen. Een voorbeeld zijn medische implantaten die naadloos aansluiten op het lichaam.
- Serieproductie: Herontwerpen van producten zodat deze geschikt worden voor serieproductie met 3Dmetaalprinten. Zo kunnen producten met een complexe vormgeving toch seriematig, of zelfs in massa, worden geproduceerd. Hierbij wordt naast de printbaarheid van het product bijvoorbeeld ook nagedacht over de uitvoerbaarheid nabewerkingsstappen.

De laatste generaties van 3D-metaalprinters, materialen en software bieden tal van nieuwe mogelijkheden. Zo zijn er:

- Nieuwe typen en modellen industriële printers, vaak met grotere productiecapaciteit en/of gebruiksgemak;
- Verbeterde softwarepakketten om producten te ontwerpen en simuleren;
- Nieuwe technieken om geprinte producten te kunnen nabewerken.

Deze ontwikkelingen worden vooral gedreven door (grote) internationale spelers. Door de snelle introductie van technieken, software en materialen is het voor Nederlandse bedrijven, en zeker het MKB, soms lastig om deze technologie te leren benutten en toe te passen in productieprocessen.



1.1. Doelstelling

Het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van Hogeschool Windesheim heeft zich als doel gesteld om Laser Powderbed Fusion (LPBF) toepasbaar te maken voor midden- en kleinbedrijven. LBPF is de meest toegepaste 3D-metaalprintmethode op dit moment. De nieuwe mogelijkheden van deze technologie worden verkend samen met het bedrijfsleven en (andere) kennisinstellingen, door praktijkgericht onderzoek te doen en te experimenteren. Op deze wijze worden de mogelijkheden van AM verkend om innovaties binnen het Nederlandse midden- en kleinbedrijf te versnellen.

Binnen AMBITION, een driejarig GreenPAC onderzoeksproject (2019-2022), zijn vaardigheden opgebouwd en is inhoudelijke kennis en ervaring opgedaan door onderzoekers van Hogeschool Windesheim, waarbij nauw is samengewerkt met specialisten en ervaringsdeskundigen uit het bedrijfsleven. De kennisvraag die centraal stond in dit project, ging specifiek over de mogelijkheden die 3D-printen biedt voor het optimaliseren van productieprocessen.

Dit breed ingestoken onderzoek heeft geleid tot meerdere publicaties. De eerste publicatie gaat over de bedrijfskundige aspecten, de derde publicatie over lichtgewicht construeren. Deze tweede publicatie geeft een overzicht van de belangrijkste inzichten vanuit de onderzoeken rondom LPBF. De globale onderzoeksvraag is: hoe kan het LPBF-proces en de daarmee geprinte producten geoptimaliseerd worden? Deze publicatie is geschreven voor (technisch) leidinggevenden, ingenieurs, studenten en (begeleidende) docenten die zich verder willen verdiepen in 3D-metaalprinten en deze kennis willen toepassen in bedrijfsprocessen.

1.2. Laser Powder Bed Fusion

Er zijn verschillende metaalprinttechnieken op de markt. De techniek die veruit het meeste wordt ingezet is LPBF. Voor dezelfde techniek worden verschillende termen gebruikt. Een veelgebruikte naam voor deze techniek is Selective Laser Melting (SLM). Omdat SLM Solutions ook een fabrikant van LPBF machines is, mijden concurrenten deze term. Zo gebruikt elke leverancier zijn eigen term, ConceptLaser noemt de techniek LaserCusing en EOS noemt het Direct Metal Laser Sintering (DMLS). LPBF is inmiddels de algemeen geaccepteerde term.



Figuur 1.1 - Schematische weergave van het LPFB-printproces.

Bij LPBF worden producten doorgaans opgebouwd uit poederlagen van 30µm tot 90µm. Het poeder wordt met behulp van een geconcentreerde laserstraal binnen enkele milliseconden gesmolten. In Figuur 1.1 is het proces schematisch weergegeven. Een bouwplatform wordt voorzien van een laagje metaalpoeder. Het deel van de poederlaag dat uiteindelijk product wordt, wordt gesmolten. Het bouwplatform wordt na het smelten van het poeder één laagdikte naar beneden verplaatst en wordt vervolgens door de recoater voorzien van een nieuwe poederlaag. Vervolgens wordt ook deze laag weer deels gesmolten en begint de cyclus opnieuw. Dit proces wordt herhaald totdat alle onderdelen in de printjob zijn voltooid.

Hogeschool Windesheim beschikt sinds september 2020 over haar eigen LPBF machine, een EOS M400 (Figuur 1.2). De faciliteit is niet bedoeld voor productie, maar is beschikbaar voor onderzoeks- en onderwijsdoeleinden. Op deze machine wordt de aluminiumlegering AlSi10Mg verwerkt. De machine heeft een printvolume van 400*400*400 mm en een enkele laser met een vermogen van 1 kW. Dit vermogen wordt door middel van spiegels en lenzen geconcentreerd tot een laser spot van 90 micrometer, welke met een snelheid van maximaal 7 m/s over het poederbed bewogen kan worden.



Figuur 1.2 - De EOS M400 van Hogeschool Windesheim op locatie Perron038.

1.3. Inventarisatie van praktijkvragen

Tijdens het onderzoeksproject heeft het LKT samengewerkt met verschillende bedrijven die betrokkenheid of interesse hebben in het verder optimaliseren en toepassen van het LPBF-proces. In samenspraak met deze bedrijven, van beginners tot experts, zijn de onderzoeksgebieden verder gedefinieerd. Tijdens projectbijeenkomsten en bedrijfsbezoeken van onderzoekers aan de betrokken bedrijven zijn diverse vraagstukken over product- en procesoptimalisaties verder in kaart gebracht en samengevoegd tot een onderzoeksagenda met de volgende onderwerpen:

 De mechanische eigenschappen van producten die geprint worden met het LPBF-proces kunnen op verschillende manieren worden beïnvloed. Het in kaart brengen en beïnvloeden van de materiaaleigenschappen om de kwaliteit van producten te verbeteren is een belangrijk deel van dit project. Een warmtebehandeling (spanningsarm gloeien) van geprinte producten wordt voor veel producten toegepast, maar heeft invloed op de mechanische eigenschappen. Het is daarom belangrijk om meer inzicht te krijgen in de effecten van een dergelijke behandeling.





Daarnaast moet onderzocht worden welke invloed het manipuleren van de laserparameters en de positie van onderdelen in het bouwvolume heeft op de mechanische eigenschappen.

- Anodiseren is een welbekende nabehandelingstechniek voor aluminium, maar het is de vraag of die behandeling op geprinte producten kan worden toegepast en of dit vergelijkbare resultaten oplevert. Hierbij wordt gelet op de kleur van de anodisatielaag en de penetratiediepte van de behandeling, welke van invloed is op de corrosiebestendigheid.
- De ontwikkeling van verschillende demonstrators die de mogelijkheden van 3D-metaalprinten duidelijk zichtbaar maken en dienen ter inspiratie voor engineers. Hierbij ligt de focus op lichtgewicht grippers voor robots en cobots, maar ook andere toepassingen worden verkend.
- Het optimaal benutten van de vormvrijheid die AM biedt, is met conventionele CAD-software vaak slechts beperkt mogelijk. Een onderwerp binnen dit project is het verkennen van de mogelijkheden van moderne ontwerpsoftware voor AM, bijvoorbeeld nTopology (Topologie-optimalisatie, Generative Design), waarmee het eenvoudiger is om complexe geometrieën te creëren en valideren.
- Het mislukken van een print of afkeur van een onderdeel kan tot hoge (extra) kosten leiden. Door de warmtehuishouding binnen het printproces te simuleren kan voorspeld worden in hoeverre de te printen onderdelen de neiging hebben om te deformeren en of dit zal leiden tot problemen tijdens de printjob. De vraag is echter of dergelijke voorspellingen voldoende snel en nauwkeurig zijn om in de praktijk bruikbaar te zijn.
- Het in kaart brengen van de Business cases bij LPBF. Zie AMBITION publicatie deel 1: 'Business cases'.
- Het gebruik van Lattice-structuren voor lichtgewicht ontwerp. Zie AMBITION publicatie deel 3: 'Lichtgewicht ontwerpen met lattice-structuren'.

1.4. Leeswijzer

Op basis van deze kennisagenda zijn verschillende deelonderzoeken uitgevoerd tijdens het driejarige project. In dit rapport worden eerst de verschillende deelonderzoeken beschreven en daarna worden verschillende demonstrators getoond die laten zien wat mogelijk is met deze technologie. De volgende onderwerpen worden behandeld in dit rapport:

Stroomlijnen van het LPBF printproces

Hoofdstuk 2: simulatie van deformatie tijdens het printproces

Hoofdstuk 3: printen zonder gebruik te maken van support

Beïnvloeden materiaaleigenschappen van 3D-metaalgeprinte producten

Hoofdstuk 4: invloed van procesparameters op mechanische eigenschappen

Hoofdstuk 5: invloed van warmtebehandeling op mechanische eigenschappen

Hoofdstuk 6: vermoeiingseigenschappen van geprint aluminium (AlSi10Mg)

Behandeling van de oppervlakten van producten na het 3D-printen

Hoofdstuk 7: anodiseren van geprint aluminium

Demonstrators; producten die nieuwe mogelijkheden van 3D-metaalprinten demonsteren

Hoofdstuk 8: lichtgewicht grippers

Hoofdstuk 9: deurvergrendeling oven

Hoofdstuk 10: deurklink voor een superjacht

2. Het voorspellen van deformatie tijdens het printproces

Tijdens het LPBF-proces wordt metaalpoeder laag voor laag aangebracht en gesmolten met een laser. Gedurende het printproces koelen de onderste lagen al geleidelijk af, terwijl de nieuwe lagen nog worden aangebracht. Mede hierdoor ontstaat er tijdens het printproces een grote temperatuurgradiënt in het materiaal. Een temperatuurgradiënt is een temperatuurverschil per afstand-eenheid. Een direct gevolg van verschillende temperatuurgradiënten zijn krimpspanningen in het metaal. Als deze spanningen te hoog worden, kunnen producten kromtrekken of er kan scheurvorming ontstaan. Een printjob kan zelfs falen als het product in de zrichting (naar boven) kromtrekt. Op dat moment kan de recoater (het mechanisme dat de poederlagen aanbrengt) tegen het product aanstoten. Dit leidt in de meeste gevallen direct tot een storing en dus een onvoltooide print.



Figuur 2.1 - LPBF geprinte matrijs voor het extruderen van kunststoffen met een gedeformeerd uiteinde, zie de rode pijl.

Met behulp van thermische simulaties in specifieke software (bijvoorbeeld ANSYS) kan inzicht verkregen worden in de temperatuurgradiënten binnen een product tijdens het printproces. Aan de hand van deze temperatuurgradiënten wordt vervolgens voorspeld in hoeverre dit leidt tot krimpspanningen en de resulterende deformatie in het materiaal. Hierdoor kan de productkwaliteit worden verbeterd, doordat ongewenste kromtrekkingen en scheuren worden voorkomen. Ook kan op basis van deze berekeningen een nieuw 3D-model worden gegenereerd, waarin al gecompenseerd wordt voor deze deformaties. Het is echter nog niet bekend hoe nauwkeurig deze simulaties zijn in de praktijk.

Dit hoofdstuk beschrijft de uitkomsten van een praktijkonderzoek naar de nauwkeurigheid van thermische simulaties. Dit is uitgevoerd door de simulaties van de software Ansys Mechanical te vergelijken met fysiek geprinte proefstukken. In paragraaf 2.1 wordt deformatie tijdens het printproces verder toegelicht. In paragraaf 2.2 zijn verschillende simulatietechnieken beschreven die gebruikt zijn voor het simuleren van thermische deformatie. In paragraaf 2.3 worden de uitkomsten van de LPBF simulaties vergeleken met geprinte producten. Het hoofdstuk wordt afgesloten met aanbevelingen in paragraaf 2.4.

2.1. Simulatie van warmtehuishouding tijdens het printproces

Bij LPBF is de temperatuur in het materiaal onder andere afhankelijk van de hoeveelheid warmte die wordt ingebracht, maar ook hoe snel deze warmte daarna kan worden afgevoerd naar de omgeving. De ingebrachte warmte is afhankelijk van de massa metaalpoeder die per tijdseenheid wordt gesmolten door de laser. De snelheid waarmee de warmte daarna wordt afgevoerd is afhankelijk van de thermische weerstand van het materiaal. De thermische weerstand is afhankelijk van de dikte van het product en de thermische geleidbaarheid van het materiaal zelf. De thermische weerstand kan bijvoorbeeld verlaagd worden door extra supportmateriaal aan te brengen (tijdelijke ondersteuning van een product tijdens het printproces). Er zijn meerdere strategieën om thermische deformatie te beperken. Deze hebben concreet als doel om:

- 1. de warmte inbreng per laag te verminderen
- 2. de warmte afvoer te verbeteren
- 3. het product op specifieke plekken te verankeren aan het bouwplatform.

Soms kan een product ook zodanig worden ontworpen dat de warmte inbreng minimaal en/of de warmte afvoer optimaal is, bijvoorbeeld door gebruik te maken van de volgende printstrategieën:

- 1. het maximale oppervlak van een laag minimaliseren
- 2. de oriëntatie van een product in de printer veranderen
- 3. de supportstructuur aanpassen
- 4. een product niet massief printen, maar een inwendige roosterstructuur (lattice-structuur) toepassen.

Aan het toepassen van deze strategieën kunnen ook nadelen kleven: het productontwerp aanpassen kost bijvoorbeeld extra tijd, een printjob kan langer duren en soms is er meer nabewerking nodig voor het verwijderen van het supportmateriaal. Ook zijn de strategieën om thermische deformatie te voorkomen niet altijd succesvol, waardoor de producten alsnog kromtrekken, scheuren of leiden tot een mislukte printjob. Thermische simulaties zijn ontwikkeld om deze problemen te voorkomen, en succesvolle ontwerpstrategieën toe te passen. Uiteraard hoeft niet ieder product gesimuleerd te worden voordat het geprint wordt. Vaak kan een ervaren operator of ontwerper op basis van ervaring al inschatten of er een risico zal ontstaan. Risico's op falen of defecten doen zich overigens met name voor bij het printen van grotere producten.

2.2. LPBF simulatie technieken

Simulaties worden steeds vaker toegepast als onderdeel van ontwerpstrategieën. Een voorbeeld is de Finite Element Method (FEM) simulatie voor het bepalen van de sterkte en stijfheid van een product. Ansys Mechanical is software met een uitgebreid aanbod van verschillende numerieke technieken die toegepast kunnen worden voor het maken van ontwerpen en voor het doen van onderzoek. Recentelijk zijn daar meerdere tools aan toegevoegd voor het simuleren van het LPBF-proces. Een voordeel van dit soort software zijn de uitgebreide mogelijkheden in de simulatie setup, waaronder de materiaalparameters en de materialenbibliotheek. In dit onderzoek is daarom gebruik gemaakt van Ansys Mechanical om de thermische deformatie te simuleren.



Figuur 2.2 - LPBF product mesh opgebouwd in verticale lagen (niet het hele product is afgebeeld). De pijlen geven aan waar de laag overgangen zijn.

Voordat een simulatie wordt uitgevoerd, wordt eerst de productgeometrie gediscretiseerd door deze op te delen in een aantal elementen (nodes), zoals zichtbaar is in Figuur 2.2. De elementen worden gezamenlijk de mesh genoemd, welke de werkelijke vorm van het product benadert.



Over deze elementen wordt een set van mathematische vergelijkingen opgelost om thermische of mechanische processen te simuleren. Net als in de praktijk wordt de simulatie ook laagsgewijs opgebouwd. Daarom wordt de mesh opgedeeld in lagen maar de laagdikte in de mesh is dikker dan de werkelijke laagdikte die een printer in de praktijk aanbrengt, zoals getoond in Figuur 2.2.

Als de mesh uit een groot aantal elementen bestaat, kan dit resulteren in een meer nauwkeurige beschrijving van de deformatie. Een meer gedetailleerde mesh vraagt echter ook om aanzienlijk meer rekenkracht van een computer. Er zijn twee mesh methoden beschikbaar, waarbij iedere methode gebruik maakt van andere elementen: de cartesian mesh (met kubusvormige elementen) en de layered tetrahedral mesh (met tetraëdrische elementen). De cartesian mesh vereist minder simulatie tijd. De layered tetrahedral is meer geschikt om gekromde vlakken te modelleren, maar een simulatie met dit type mesh kan aanzienlijk meer tijd in beslag nemen.

LPBF is een tijdsafhankelijk proces, omdat het metaalpoeder wordt gesmolten door een laserspot die met een bepaald vermogen en een bepaalde snelheid over het printbed beweegt. Echter, het simuleren van elke positie van de laser zou te veel rekentijd kosten. Daarom wordt dit proces vereenvoudigd tijdens de simulatie. Hiervoor zijn twee veel gebruikte methoden om de thermische spanning en deformatie te simuleren: de Lumped Layer Approach en de Inherent Strain Method [1-4].

2.2.1. Lumped Layer approach

Met de Lumped Layer Approach wordt de simulatie opgedeeld in twee delen: een thermische simulatie en een mechanische simulatie. In de thermische simulatie worden meerdere print lagen (10-20) tegelijk gesimuleerd (en dus niet het pad dat de laser volgt). De thermische expansie, spanningen en deformatie worden gesimuleerd op basis van het thermische verloop na het smelten. Bij de Lumped Layer Approach wordt de simulatie uitgevoerd door het metaalpoeder en de support niet in detail te simuleren, zodat de setup minder complex is en de computer minder rekenkracht nodig heeft. In plaats hiervan wordt er gerekend met de warmte-convectie tussen het poeder en het product. Om de berekeningen verder te vereenvoudigen wordt voor de supportstructuren een gehomogeniseerd materiaal gebruikt. Hiermee worden de supportstructuren niet exact beschreven, maar krijgt de support wel thermische en mechanische eigenschappen in de simulatie. Met deze methode is het mogelijk om verschillende materiaaleigenschappen en machine-instellingen mee te nemen in de simulatie, waaronder het aantal lasers, de laagdikte, hatch-afstand, scan speed, laser power en de afkoeltijd tussen lagen. Daarnaast kan de temperatuur van het bouwplatform en de ruimte worden ingesteld tijdens het printen en het afkoelen.

2.2.2. Inherent Strain Method

De Inherent Strain Method is in de praktijk eenvoudiger dan de Lumped Layer Approach, omdat hierbij geen thermische simulatie wordt uitgevoerd. Een voordeel is dat de setup relatief eenvoudig en snel kan worden ingesteld. Daarnaast is deze methode sneller: een simulatie van een cantilever (figuur 2.3) met de Lumped Layer Approach duurde 82 minuten, tegenover een rekentijd van twee minuten met de Inherent Strain Method. Deze simulaties zijn uitgevoerd met 14 processor threads door een Intel Xeon E5-2680 CPU met 256 GB DDR3 RAM.

Het resultaat van de Inherent Strain Method is minder nauwkeurig dan de Lumped Layer Approach. Bij de Inherent Strain Method wordt een aanname gedaan van de thermische belasting van iedere laag in plaats van het nauwkeurig berekenen van de thermische simulatie. Vervolgens wordt rek berekend aan de hand van de Strain Scaling Factor (SSF), de treksterkte (σ_{vield}) en de elasticiteitsmodulus E van het gebruikte materiaal.

$$\varepsilon = SSF \cdot \frac{\sigma_{yield}}{E}$$

De SSF wordt gebruikt om de berekende rek die ontstaat door de krimpspanningen te corrigeren op basis van praktijkdata. De waarde van SSF kan bepaald worden middels een kalibratie-procedure [5].

Kalibratie-procedure

Middels het doorlopen van de kalibratie-procedure wordt de SSF bepaald voor de gebruikte machine, materiaal en printparameters. Voor deze procedure zijn meerdere cantilevers geprint van AlSI10Mg met een EOS M400. Nadat de support was verwijderd, is de mate van deformatie in verticale (z) richting bepaald (Schut DeMeet 404 Combi). De SSF = 0,12 is berekend door de deformatie van de LPBF print en de simulatie met elkaar te vergelijken.



Figuur 2.3 – Kalibratieprocedure voor LPBF simulaties met 50 mm lange LPBF cantilevers. Linksboven: schematische weergave, in oranje de supportstructuren, de blauwe pijl toont de positie waar de verticale deformatie gemeten was. Rechtsboven: de build plate met meerdere cantilevers. Onder: inherent strain simulatie van de cantilever.

2.2.3. Rekentijd

Voor beide methoden geldt dat met een fijnmazigere mesh niet in alle situaties een nauwkeurigere beschrijving wordt gegeven van de rek, maar het vraagt wél om aanzienlijk meer rekenkracht en tijd van een computer. Als voorbeeld een cantilever met een tetrahedral mesh van vier elementen over de dikte van het overhangende element, zoals te zien is in het gemarkeerde gebied met een rode stippellijn in figuur 2.3. Dit modelleren duurt twee minuten met de Inherent Strain Method. Zodra het formaat van de elementen wordt gehalveerd (dit gebeurt in x, y én z-richting, waardoor er 2³ = 8 keer zoveel elementen nodig zijn), duurt de simulatie op dezelfde computer zes minuten. Uit simulaties met de cantilever is gebleken dat meer dan vier elementen over de dikte van een product niet resulteert in een nauwkeurigere beschrijving van het kromtrekken door de thermische deformatie.



Samengevat zijn er in Ansys Mechanical dus twee technieken voor het simuleren van LPBF: de Lumped Layer Approach en de Inherent Strain Method. De Lumped Layer Approach maakt gebruik van een thermische simulatie die gekoppeld is aan een mechanische simulatie. Bij de Inherent Strain Method wordt geen thermische simulatie uitgevoerd, in plaats daarvan wordt een thermische belasting aangenomen. De Inherent Strain Method heeft een kortere rekentijd en heeft een minder complexe setup, maar kan minder nauwkeurig zijn in vergelijking met de Lumped Layer Approach. In de setup kan de tolerantie voor kromtrekken worden aangepast op specifieke machine- en materiaaleigenschappen, gebaseerd op een kalibratie-procedure. Voor beide technieken wordt de mesh laagsgewijs opgebouwd. Er zijn meerdere mesh technieken beschikbaar, waarbij de layered tetrahedral mesh het meest geschikt is om gekromde vlakken te beschrijven.

2.3. Vergelijking tussen LPBF simulaties en experimenten

Voor dit onderzoeksproject zijn drie producten gesimuleerd en geprint om te onderzoeken hoe goed de deformatie te voorspellen is met een simulatie van Ansys Mechanical. De simulaties zijn uitgevoerd met de Inherent Strain Method en een Layered Tetrahedral mesh. De producten zijn geprint met de aluminium legering AlSi10Mg met een EOS M400 printer.

Twee productgeometrieën zijn overgenomen uit het onderzoek van N. Peter et al. [4]. De locaties van krimp en deformatie in dat onderzoek komen overeen met de uitgevoerde simulaties. Dit is bijvoorbeeld te zien in het simulatie-resultaat van het kokervormige object (rechts) in figuur 2.4. De rode en groene horizontale zones in de figuur geven de krimp weer. Deze zones met veel en weinig deformatie zijn ook waargenomen door N. Peter et al. met een Nickel Alloy IN718. In dat onderzoek zijn door het ontwerp van de proefstukken significante deformaties meetbaar gemaakt. Bij beide geometrieën verschilt de doorsnede – en dus ook de warmte-inbreng – op verschillende hoogtes (z posities) door de uitsparingen in de producten. De verwachting was dat er een variatie zou zijn in de krimp van de proefstukken op de verschillende hoogtes.

De deformatie in de simulatie van de producten van AlSi10Mg is zeer gering (maximaal 0,013 mm), zeker in vergelijking tot de ruwheid en de laaghoogte (0,09 mm) van het product. Als hierdoor plaatselijk thermische deformatie zou optreden dan zou dit meetbaar moeten zijn, aangezien de buitenmaat van de producten overal gelijk zou zijn als er geen sprake is van deformatie. Het resultaat was echter dat de deformatie in dit geval zeer gering was, en te klein om waar te nemen in het geprinte product bij gebruik van een 3D scanner (Einscan SE) met een onzekerheid van ±0,2 mm. Hieruit valt op te maken dat het voor kleine objecten van AlSi10Mg in de meeste gevallen overbodig zal zijn. Daarom is vervolgens een simulatie opgezet van een groter product.





Figuur 2.4 - Linksboven: geometrie 1H in Ansys SpaceClaim (CAD-software), de dimensies zijn (x, y, z): 48, 2, 50 mm. Rechtsboven: geometrie 1I in Ansys SpaceClaim, de dimensies zijn (x, y, z): 25, 25, 49 mm. Midden: gesimuleerde deformatie tijdens LPBF van 1H (links) en 1I (rechts). De legenda's van deze figuren zijn niet gelijk. Onder: LPBF geprinte producten.

De derde vorm die is geprint en gesimuleerd is een matrijs voor extrusie van kunststoffen. Een dergelijke matrijs moet functioneren bij hoge temperaturen (tot 300 °C) en druk (tot 250 Bar) en wordt daarom dikwandig ontworpen. Door de relatief grote afmetingen en wanddikte wordt veel warmte ingebracht tijdens het printproces, waardoor er een risico op deformatie aanwezig is. Daarom is besloten om een simulatie uit te voeren en de fysieke deformatie van het product te bepalen.



Figuur 2.5 - Boven: LPBF geprinte extrusie matrijs, met een grote deformatie bij de uitstroom opening (zie de rood gestreepte lijn). Links onder: LPBF simulatie van de extrusie matrijs. Rechts: een grafiek van deformatie in de simulatie bij de matrijs uiteinde (zie de rood gestippelde lijn in de bovenste foto).

De deformatie vond vooral plaats bij de uitstroom opening van de matrijs, wat overeenkomt met de simulatie (Figuur 2.5). De deformatie is in zowel het geprinte product als in de simulatie bepaald op meerdere punten over de lengte van de rode stippellijn (van 65 tot 110 millimeter vanaf het middelpunt van het onderdeel). De simulatie en de 3D scan komen goed met elkaar overeen tot een deformatie van circa 0,8 mm, maar bij grotere waarden voorspelt de simulatie een lagere deformatie dan in de praktijk wordt gemeten. Een deformatie van meer dan 0,8 mm is in de praktijk voor de meeste producten onacceptabel, dus wanneer een simulatie een dergelijk resultaat oplevert is dat alsnog een sterke indicatie dat er aanpassingen in het ontwerp of printproces nodig zijn.

2.4. Conclusie

Thermische deformatie in het LPBF proces kan gesimuleerd worden met Ansys Mechanical, en kan daarom een relevante tool zijn bij het voorbereiden van een printjob of het ontwerpen van een product. In Ansys Mechanical zijn meerdere mesh- en simulatietechnieken beschikbaar. De Inherent Strain Method in combinatie met een layered tetrahedral mesh heeft een relatief korte rekentijd en is gebruikt voor de simulaties voor dit onderzoek. Voor deze methodiek dient eerst een kalibratie-procedure doorlopen te worden om de simulatie (specifiek de SSF) af te stemmen op de LPBF machine en de verschillende parameters van het materiaal en de printer. Uit drie proeven blijkt dat de simulaties grotendeels overeenkomen met de praktijk, maar vanwege de geringe hoeveelheid data is nog niet met zekerheid te zeggen of dit universeel toepasbaar is. Kleine onderdelen van AlSi10Mg lijken nauwelijks te deformeren, waardoor een simulatie in de meeste gevallen overbodig zal zijn. Bij een vergelijking tussen een geprinte en gesimuleerde matrijs blijken deze op dezelfde locatie te deformeren. De simulatie lijkt de vervorming in dit geval tot 0,8 mm goed te voorspellen. Een dergelijke deformatie is meestal ongewenst, dus kan gesteld worden dat een simulatie in dit geval goed gebruikt worden om in te schatten of het LPBF-proces aangepast moet worden. Hierbij kan gedacht worden aan de oriëntatie van het product, de hoeveelheid en positionering van de support en het aanpassen van het productontwerp.

3. Printen met contactloze support

Bij het produceren van onderdelen door middel van LPBF is altijd een vorm van support oftewel ondersteuningsmateriaal nodig. De belangrijkste functies van deze supports zijn:

- Weerstand bieden tegen de krachten die de recoater op het product uitoefent;
- Afvoeren van warmte die de laser in het product inbrengt;
- Weerstand bieden tegen interne spanningen die voor deformatie van het product kunnen zorgen.

In de meeste gevallen betekent dit dat de producten door middel van het ondersteuningsmateriaal fysiek zijn verbonden met het bouwplatform. Vanaf het moment dat het bouwplatform met producten uit de machine komt, dienen nog meerdere handelingen te worden uitgevoerd om tot een eindproduct te komen (Figuur 3.1). Nadat de producten zijn losgezaagd van het bouwplatform, zijn de supportstructuren nog grotendeels verbonden met het product. Een kleiner deel van de supports zit nog op het bouwplatform vast. Waar het bouwplatform vrij eenvoudig (vaak CNC-verspanend) gevlakt kan worden, is het een grotere uitdaging om de supports van de producten te verwijderen. Vaak worden de supports verwijderd met eenvoudig handgereedschap (tang, hamer, beitel), maar in sommige gevallen is het zelfs noodzakelijk om hiervoor een 5-assige freesmachine of robotarm te gebruiken. Zeker wanneer het product een complexe geometrie heeft kunnen dit tijdrovende en kostbare handelingen zijn.



Figuur 3.1 - Diverse handelingen die na het LPBF-printproces worden verricht om tot een eindproduct te komen.

Het vinden van methoden om deze handelingen te minimaliseren zal leiden tot kortere doorlooptijden en met name ook kostenbesparingen. Om het proces van supports verwijderen zo efficiënt en snel mogelijk te kunnen doorlopen, wordt in de eerste plaats de benodigde hoeveelheid supportmateriaal zo veel mogelijk beperkt tijdens het ontwerpen van het product. Hiervoor wordt rekening gehouden met de oriëntatie en geometrie van het product, zodat een zo groot mogelijk deel van het product zelf ondersteunend, dus zonder gebruik van support, geproduceerd kan worden. Daarnaast heeft men tijdens het ontwerpen van de supports de mogelijkheid om het verwijderen ervan te vereenvoudigen. Door de geometrie aan te passen wordt een balans gezocht tussen de stevigheid van de structuur en de capaciteit voor warmteafvoer. Zo is een 'lichtere' supportstructuur eenvoudiger te verwijderen, maar dit zal het afvoeren van warmte verslechteren. Hoewel deze optimalisaties het verwijderen van supports aanzienlijk kunnen vereenvoudigen, zullen deze handelingen altijd noodzakelijk zijn. Een voorbeeld van een experimentele uitzondering, ontwikkeld door applicatie-ingenieurs bij 3D-printerfabrikant EOS, is het toepassen van een contactloze support [6]. Kegelvormige producten kunnen op deze manier geproduceerd worden in een houder die met de juiste tussenafstand de contour van het product volgt. Deze afstand tussen de kegel en de prop support wordt zo klein mogelijk gekozen, zonder de kegel en de support aan elkaar vast te smelten.



Figuur 3.2 - Een conisch product(deel) kan worden ondersteund door middel van een 'prop support'. [6]

Hoewel dit type ondersteuning dus geen vaste, fysieke verbinding vormt tussen het product en het bouwplatform, wordt toch aan alle belangrijke functie-eisen van een supportstructuur voldaan. Indien de ruimte tussen support en product voldoende klein is, kan de dunne laag poeder ertussen voldoende weerstand bieden tegen de krachten van de recoater en is de belemmering van warmte overdracht beperkt. De derde functie, het bieden van weerstand tegen deformatie, wordt afgevangen door de geometrie van het product. Een voorwaarde die hiervoor gesteld wordt voor het product is dat deze wordt opgebouwd vanuit een scherpe punt. Kegelvormige producten zijn, wanneer ze worden opgebouwd vanaf een punt, niet/nauwelijks gevoelig voor deformatie.

3.1. Vraagstelling

EOS heeft met bovenstaand voorbeeld aangetoond dat deze techniek kan werken voor titanium (Ti64). Voor de specifieke kegel en prop support in het voorbeeld werd een optimale tussenafstand van 0,2 mm gevonden. In het artikel wordt niet gesproken over het toepassen van deze techniek met andere materialen. Daarom is onderzocht onder welke voorwaarden deze techniek kan werken voor AlSi10Mg met de EOS M400, gebruikmakend van de standaard procesparameters voor een laagdikte van 90 µm.

De belangrijkste parameter die invloed heeft op het (wel of niet) aanhechten van het product aan de prop support is de afstand tussen de twee delen. Aangezien de ruwheid van de downskin van de kegel en de upskin van de prop support beïnvloed zullen worden door de hoek (of 'puntigheid') van de kegel, is de verwachting dat de benodigde tussenafstand hiervan afhankelijk zal zijn.

3.2. Experimenten

Om het aantal experimenten en de seriegrootte van kegels en prop supports zo veel mogelijk te beperken is het onderzoek opgedeeld in twee verschillende delen. In de eerste serie experimenten wordt bepaald welke tussenafstanden geschikt zijn voor verschillende hoeken van het product ten opzichte van het bouwplatform. Deze serie wordt gebruikt om een kansrijke selectie te kunnen maken voor een tweede serie experimenten met verschillend vormgegeven kegels met prop supports.

3.3. Oriëntatie en tussenafstand

Om te bepalen welke tussenafstanden geschikt zijn voor verschillende hoeken van het product is een proefstuk ontworpen (Figuur 3.3) waarin de oriëntatie van wanden wordt gevarieerd van verticaal (90°) tot volledig horizontaal (0°) in stappen van vijf graden. De gekozen tussenafstanden zijn een enkelvoud of veelvoud van de laagdikte waarmee de proefstukken geprint worden (90 µm), variërend tussen 0,09 mm en 0,45 mm. De voornaamste functie van deze supports zijn het afvoeren van warmte, vergelijkbaar met het principe van een heat support [7]. Hierbij zijn zowel het product als de support direct verbonden met het bouwplatform.



Figuur 3.3 - Proefstuk voor het bepalen van de juiste tussenafstanden voor de support (rood) voor verschillende hoeken van het product (blauw).

De producten worden in tweevoud geproduceerd in één printjob. Omdat de verwachting is dat het risico van een aanvaring met de recoater toeneemt naarmate de tussenafstand groter wordt, is de hoogte van het product trapsgewijs gevarieerd (

Figuur 3.4). Mocht het printproces dan falen op een bepaald proefstuk, dan zijn proefstukken met een kleinere tussenafstand waarschijnlijk al voltooid en gaat de informatie over het lossen van de producten niet verloren.



Figuur 3.4 - Indeling van de printjob. De proefstukken zijn in hoogte gevarieerd om de meest risicovolle delen van de samples pas te printen wanneer minder risicovolle delen al zijn geproduceerd.

Na het printen worden de proefstukken losgezaagd van het bouwplatform en wordt beoordeeld in hoeverre de producten te verwijderen zijn van de heat supports. Ook worden ter vergelijking twee extra proefstukken geproduceerd, één met een "conventionele" block support, de ander met niet-ondersteunde overhangen. De verwachting is dat proefstukken met een tussenafstand van 0,09 mm (deels) met elkaar zullen versmelten. Voor de grootste tussenafstanden bestaat het risico dat er onvoldoende warmteafvoer en aanhechting is, waardoor de proefstukken nabij de horizontale delen zullen deformeren. Deze deformatie zal naar verwachting leiden tot het vastlopen van de recoater op één van de proefstukken. Daarnaast is de verwachting dat vanwege de ruwheid van overhangende delen, de minimale toelaatbare tussenafstand toeneemt naarmate de hoek ten opzichte van het bouwplatform afneemt.

3.4. Resultaten & Discussie

De printjob verliep naar verwachting en vertoonde deformatie in de kritische productdelen met kleine hoeken en grote tussenafstand. Enkele lagen nadat werd begonnen met het printen van het vlak met een hoek van 0° en een tussenafstand van 0,45 mm is dit deel dusdanig gedeformeerd dat een aanvaring met de recoater heeft plaatsgevonden. Het andere, identieke proefstuk (3) vertoont gelijksoortige deformatie. De overhang zonder support (4) is zonder duidelijke deformaties tot en met 25° geprint. In Figuur 3.5 is zichtbaar dat al voor het ontpoederen te achterhalen is op welk onderdeel de recoater is vastgelopen. Pas na het ontpoederen van de gehele printjob kunnen de proefstukken gedetailleerder worden bestudeerd.



Figuur 3.5 - Enkele lagen nadat werd begonnen met printen van het horizontale deel (0°) ontstond een aanvaring met de recoater, veroorzaakt door deformatie. Ook proefstuk (3) vertoonde aanzienlijke deformatie. Proefstuk 4 (zonder support) is hierdoor niet voltooid vanaf een hoek van 25°.

Wanneer de proefstukken na het ontpoederen van de build job nader worden bekeken, wordt zichtbaar dat ook samples met een tussenruimte van 0,36 mm en 0,27 mm duidelijk zijn gedeformeerd (Figuur 3.6). De samples met tussenafstanden van 0,18 mm en 0,09 mm vertonen geen zichtbare deformatie.



Figuur 3.6 - Deformatie zichtbaar vanaf 5° op alle proefstukken met tussenafstanden 0,27 mm, 0,36 mm en 0,45 mm.

3.4.1. Beoordelen van de aanhechting tussen product en support

Na de visuele inspectie van de producten zijn de proefstukken losgezaagd van het bouwplatform. In dit geval is er geen warmtebehandeling toegepast. Vervolgens zijn de producten en supports van elkaar gescheiden, waar nodig met behulp van eenvoudige gereedschappen als een schroevendraaier of een beitel. In Tabel 3.1 wordt de mate van aanhechting voor de verschillende hoeken en tussenafstanden (S) weergegeven.

S (mm)	90°	85°	80°	75°	70 °	65°	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5 °	0°
0,09	В	В	В	В	В	В	/	/	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х
0,18							В	В	/	/	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	/	/
0,27									В	В	/	/	/	Х	Х	Х	Х	D	D
0,36											В	В	В	В	В	В	В	D	D
0,45															\checkmark		\	D	D
	Le	egend	a		Bes	Beschrijving													
B Bes	B Beste optie				Klei	nste ti	ussena	afstan	d waa	r geen	aanhe	echtin	g plaa	tsvind	t				
√ Gee	en aan	hecht	ing		Gee	en aan	hechti	ng, ma	aar tus	senaf	stand	kan kl	einer						
/ Geo	deeltel	lijke aa	anhech	nting	Geo	Gedeeltelijke aanhechting, lossen kan moeilijk zijn													
\ Tw	ijfelge	val De	forma	tie	Lijk	Lijkt of hier deformatie ontstaat, maar niet goed te beoordelen													
X Te	veel aa	anhec	hting		Nie	t goed	te los	sen											
D Def	D Deformatie			Pro	ducter	n defo	rmerei	n door	krimp	spann	ningen	en ge	brek a	an aar	hech	ting			

Tabel 3.1- Beoordeling van de mate van aanhechting tussen product en support.

Overeenkomstig met de verwachting is te zien dat de minimaal toelaatbare tussenafstand kleiner wordt naarmate de hoek van het vlak ten opzichte van het bouwplatform afneemt. Waar de proefstukken met een tussenafstand van 0,09 mm al vanaf een hoek van 60° verschijnselen van aanhechting vertonen, is dit bij de proefstukken met afstanden 0,36 mm en 0,45 mm geheel niet het geval. Bij tussenafstanden van 0,27 mm en groter is de afstand al dusdanig groot dat bij hoeken van 5° en 0° deformatie plaatsvindt in plaats van aanhechting. Opvallend is dat bij de combinatie van deze hoeken en een tussenafstand van 0,18 mm gedeeltelijke aanhechting heeft plaatsgevonden. Dit suggereert dat voor dergelijk kleine hoeken altijd een vorm van aanhechting nodig is om deformatie tegen te gaan. Wanneer bij deze tussenafstand de hoek ten opzichte van het bouwplatform toeneemt, vindt volledige aanhechting plaats, waarbij het niet mogelijk was om het product van de supports te scheiden. Dit is te verklaren door het staircase effect op de up- en downskins, die bij nagenoeg horizontale delen minder sterk aanwezig zijn.



3.4.2. Kegels met prop supports

Aan de hand van de eerste serie experimenten is een indruk verkregen van kansrijke combinaties van hoeken en tussenafstanden. Aan de hand van de resultaten in Tabel 3.2 is een selectie gemaakt, waarmee

proefstukken worden ontworpen voor kegels, die ondersteund worden door een prop support. Om de risico's op het falen van de print zoveel mogelijk te beperken, is hierin een voorzichtige selectie gemaakt. Het experiment is verdeeld over twee printjobs, waarbij de eerste print de proefstukken met tussenafstanden 0,09 mm en 0,18 mm bevat, de tweede print bevat proefstukken met tussenafstanden van 0,27 mm en 0,36 mm. Alle samples worden in tweevoud geproduceerd.

S (mm)	85°	80°	75°	70°	65°	60°	55°
0,09	В	В	В	В	В	/	/
0,18						В	В
0,27					\checkmark		
0,36					\checkmark		

Tabel 3.2 - Selectie van hoeken en tussenafstanden voor de experimenten met prop supports, op basis van het eerste experiment.

De verwachting is in eerste instantie dat er in vergelijking met het vorige experiment een soortgelijke mate van aanhechting zal plaatsvinden tussen de producten (kegels) en de prop supports. Afwijkingen zouden kunnen ontstaan vanwege verschillen in geometrie van het product (bijvoorbeeld: ronde dwarsdoorsnede in plaats van rechthoekig, grotere wanddikte). Daarnaast waren de producten in het eerste experiment fysiek verbonden met het bouwplatform, terwijl de producten in dit experiment volledig worden ondersteund door de dunne laag poeder tussen product en support. Dit kan gevolgen hebben voor de nauwkeurigheid van de positionering (weerstand tegen recoater krachten) en de warmtehuishouding (minder goede warmteafvoer).

3.4.3. Proefstukken 0,09 mm en 0,18 mm tussenafstand

De printjob met kegels met een prop support werd succesvol afgerond (Figuur 3.7). Opvallend was dat de producten niet zonder gereedschap te verwijderen waren van de supports. De kegels zaten in eerste instantie zodanig vast dat het gehele bouwplatform kon worden opgetild aan de handvatten van de kegels.

De kegels met hoeken van 55° - 70° ten opzichte van het bouwplatform konden met behulp van een platte schroevendraaier op eenvoudige wijze worden los gemaakt (Figuur 3.8). Hiervoor was weinig kracht nodig, zodat de producten hierdoor niet zijn beschadigd. De punten van de kegels bleken ook behoorlijk scherp te zijn. De oppervlakken van de producten waren qua ruwheid vergelijkbaar met overhangende wanden van reguliere producten.





Figuur 3.7 - Kegels met prop supports, tussenafstanden 0,09 mm en 0,18 mm. De hoek van de kegels varieert van 85° tot 55° ten opzichte van het bouwplatform.



Figuur 3.8 - De kegels van de proefstukken met hoeken van 55° - 75° konden worden gescheiden door licht te wrikken met een platte schroevendraaier op de locatie van de pijl (rechts).

Voor de kegels met een hoek van 75° en een tussenafstand van 0,18 mm was voor het lossen meer kracht nodig, en niet mogelijk zonder beschadiging van het product. De kegels met dezelfde hoek en een tussenafstand van 0,09 mm waren op deze manier niet te lossen, hiervoor was inklemming van de propsupport in een bankschroef nodig (Figuur 3.9) waarna de producten met behulp van een waterpomptang konden worden losgemaakt. Via deze methode werd het product van de support gescheiden zonder aanzienlijke beschadigingen (Figuur 3.10). De proefstukken met een hoek van 80° lieten zich ook op deze manier verwijderen, zowel met een tussenafstand van 0,09 mm als een tussenafstand van 0,18 mm. Het is in geen van de gevallen gelukt om kegels met een hoek van 85 graden te lossen zonder het afbreken of aanzienlijk beschadigen van de handvatten of de onderste punt van de kegels (Figuur 3.11).





Figuur 3.9 - Samples met hoeken van 75° en meer dienden te worden ingeklemd alvorens ze met behulp van een waterpomptang gelost konden worden.



Figuur 3.10 - Samples tot en met een hoek van 80° zijn te lossen zonder duidelijke beschadigingen aan het product.

1957 1 D. (4 m)	- Containing

Figuur 3.11 - Resultaat kegels 85° - een tussenafstand van 0,18 mm resulteerde in een afgebroken punt en een beschadigd product (links). Bij tussenafstand 0,09 mm zat het product zodanig vast dat het handvat is afgebroken (rechts).

3.4.4. Proefstukken 0,27 mm en 0,36 mm tussenafstand

Vanwege de grotere tussenafstanden tussen de kegels en supports is de verwachting van dit experiment dat de producten gemakkelijker gescheiden kunnen worden van de prop supports dan de proefstukken met een kleinere tussenafstand. Voor het experiment met deze tussenafstanden is besloten om het ontwerp van de prop supports te optimaliseren. Om het materiaalverbruik te verminderen is besloten om de prop supports te voorzien van ribben, in plaats van een massief cilindrisch volume (Figuur 3.12). Aangezien nog niet met zekerheid te zeggen is dat deze proefstukken succesvol geprint kunnen worden is gekozen om de proefstukken met een tussenafstand van 0,36 mm op een hogere prop support te zetten, om in geval van problemen in het printproces toch zo veel mogelijk bruikbare proefstukken over te houden.



Figuur 3.12 - Optimalisatie van de prop supports. Door het toepassen van ribben en een constante wanddikte van 4 mm wordt aanzienlijk bespaard op materiaalverbruik en de printduur.

Bij het uitvoeren van deze printjob zijn naast de proefstukken ook andere onderdelen geproduceerd in de overgebleven ruimte (Figuur 3.13). Eén van deze andere producten heeft geresulteerd in een aanvaring met de recoater, waardoor de printjob enkele uren stil heeft gestaan. Na een correctie is de printjob hervat en verder afgerond. Hierbij ontstond echter een probleem met het recoaten. Omdat er kleine, losse metaaldeeltjes (afkomstig van het gefaalde product) in het poederbed aanwezig waren is de afwerking van de buitenwanden in sommige gevallen slecht (

Figuur 3.14). De twee samples met hoek van 65° en een tussenafstand van 0,36 mm vertonen een inconsistent resultaat als gevolg van de aanvaring met de recoater. Dit geldt ook voor samples met een hoek van 85° en een tussenafstand van 0,27 mm en 0,36 mm. Uit deze drie proeven kunnen dan ook geen harde conclusies worden getrokken. Door de opbouw met verschillende hoogtes van de propsupports, vergelijkbaar met het voorgaande experiment met de heat supports, resulteren de overige proefstukken wel in duidelijke conclusies.







Figuur 3.13 - Printjob met prop support samples met tussenafstanden 0,27 mm en 0,36 mm. Naast deze samples zijn ook andere onderdelen geproduceerd.

Figuur 3.14 - Na de aanvaring met de recoater zijn problemen ontstaan, resulterend in een slechte oppervlakteafwerking na het hervatten van de print.

Samples met een hoek van 55° moesten allen met een mechanisch hulpmiddel (bijvoorbeeld een schroevendraaier) worden verwijderd. De samples met een tussenafstand van 0,36 mm vertonen een aanzienlijke hoeveelheid imperfecties, wat mogelijk de oorzaak zou kunnen zijn voor de sterkere aanhechting. Echter, gezien de correct geproduceerde samples met een hoek van 60° ook gelost moeten worden met een mechanisch hulpmiddel is het aannemelijk dat de aanvaring met de recoater in dit geval geen significante invloed heeft gehad op het eindresultaat. Samples met een hoek van 60° en 70° zijn niet zichtbaar beïnvloed. Bij een tussenafstand van 0,36 mm kunnen de samples met een hoek van 70° met de hand worden verwijderd, terwijl voor de samples met een hoek van 60° een mechanisch hulpmiddel nodig is. Bij een tussenafstand van 0,27 mm was voor alle samples een mechanisch hulpmiddel nodig. Ook de samples met een hoek van 65° en een tussenafstand van 0,27 mm moesten met een mechanisch hulpmiddel gelost worden. Vervolgens zijn de samples met een hoek van 75° beoordeeld. Bij een tussenafstand van 0,27 mm zijn de kegels met de hand te lossen. Tegen de verwachting in, is bij een tussenafstand van 0,36 mm een mechanisch hulpmiddel nodig voor het lossen. Samples met hoeken van 80° kunnen met beide tussenafstanden met de hand gelost worden. In tabel 3.3 wordt een overzicht van de resultaten weergegeven.

Legenda				Beschrijving					
В	Beste	e optie		Goed lossend, met de hand					
	Goed	e optie		Goed los	send me	t een sch	roevend	raaier	
Х	Niet g	geschikt		Zeer ster	ke bindin	ıg. Moeili	jk tot nie	t lossend.	
?	Moge	elijk beste o	optie	Resultaat sterk beïnvloed door aanvaring met recoater, geen duidelijke conclusie					
\checkmark	Goed	e optie		Lossend met de hand, maar niet de kleinst mogelijke tussenafstand					
S (mm)		85°	80°	75°	70°	65°	60°	55°	
0,09	X X		Х	Х	\checkmark	\checkmark	\checkmark		
0,18	XX			\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark		
0,27	? B			В	\checkmark	\checkmark	\checkmark		
0,36		?	\checkmark	\checkmark	В	?	\checkmark		

Tabel 3.3 - Beoordeling van de onderzochte prop supports.

3.5. Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde experimenten kan gesteld worden dat het onder bepaalde voorwaarden mogelijk is om prop supports toe te passen voor producten van AlSi10Mg. Een belangrijke voorwaarde aan het product is dat deze wordt opgebouwd vanuit een spitse lijn of punt. De resultaten van de experimenten met prop supports geven geen volledig uitsluitsel over de ideale afstand voor iedere hoek, maar wel is duidelijk dat voor kegels met een hoek van 75° en 80° een tussenafstand van 0,27 mm het beste resultaat heeft opgeleverd, terwijl een tussenafstand van 0,36 mm het best heeft gewerkt voor een kegel met een hoek van 70°. Voor kegels met een hoek van 85° en 65° kan nu geen conclusie worden getrokken. De set met experimenten kan nog worden uitgebreid met kegels met kleinere hoeken en grotere tussenafstanden om een completer beeld te verkrijgen van de toepasbaarheid van contactloze supports. Ook andere geometrieën, bijvoorbeeld pyramide-vormige of tetrahedron-vormige proefstukken zouden nog nieuwe inzichten kunnen opleveren. Verdere optimalisatie van prop supports kan bijvoorbeeld middels onderzoek naar de positie van het product in de prop support.

Wanneer de resultaten van het experiment met de heat supports en de prop supports met elkaar worden vergeleken, wordt duidelijk dat er verschillen zijn tussen de data van de heat supports en de prop supports. Mogelijk hebben het verloop van de boog (waarbij de verschillende delen van het proefstuk elkaar mogelijk beïnvloeden) of de rechthoekige dwarsdoorsnede (ten opzichte van de kegels met een cirkelvormige dwarsdoorsnede) van de proefstukken invloed op de mate van aanhechting. De geometrieën zullen dus altijd in hun specifieke omgeving beoordeeld moeten worden.



Figuur 3.15 - Voor kegels met een hoek van 70 graden (links) blijkt een tussenafstand van 0,36 mm het best te werken. Voor hoeken van 75 en 80 graden (midden en rechts) blijkt een tussenafstand van 0,27 mm ideaal.



3.6. Toepassing van contactloos printen

Om aan te tonen dat het principe van contactloze supports niet alleen werkt voor proefstukken in de vorm van een kegel is een demonstrator ontworpen in de vorm van een flessenopener. De flessenopener is in eerste instantie ontworpen in SolidWorks, daarna is met behulp van nTopology een gyroid structuur aan het ontwerp toegevoegd om de opener zo licht mogelijk te maken. Om het ontwerp geschikt te maken voor productie met behulp van een prop support, loopt het uiteinde van de flessenopener toe in een scherpe punt. Vanwege de hoek die deze punt maakt is, op basis van de uitgevoerde experimenten, gekozen voor een tussenafstand van 0,27 mm (Figuur 3.16). De opener heeft een lengte van 83 mm en steekt 40 mm diep in de prop support. nTopology kan, met behulp van kleine aanpassingen aan de standaard ingebouwde Fixture Generator, ook worden ingezet voor het (deels) geautomatiseerd genereren van prop supports. Na het kiezen van de juiste oriëntatie kan de gebruiker eenvoudig de wanddikte en tussenruimte van de prop support instellen. In dit geval zijn voor esthetische doeleinden een complexe structuur en een Windesheim-logo toegevoegd aan de prop support, welke voor dit product tevens kan dienen als houder/standaard.



Figuur 3.16 - Het ontwerp van de flessenopener (links) en een dwarsdoorsnede met de prop support (rechts) met een tussenafstand van 0,27 mm.

De producten konden eenvoudig gelost worden met wat mechanische hulp. Het vergroten van de tussenafstand zou deze handeling kunnen elimineren. Na het printen zijn de prop supports losgezaagd en ontbraamd, vervolgens zijn de producten gestraald met glasparels.



Figuur 3.17 – Het digitale ontwerp (links) en de geproduceerde flessenopener (midden). Op het product (rechts) zijn geen effecten van de prop support zichtbaar.

4. Invloed van procesparameters op mechanische eigenschappen

Voor een optimaal ontwerp moet de engineer inzicht hebben in de materiaaleigenschappen die ontstaan door de combinatie van een materiaal (grondstof) en een productietechniek. De praktijk is vaak complexer dan een materiaal datasheet doet vermoeden. Mechanische eigenschappen van een product zijn namelijk afhankelijk van allerlei parameters in het productieproces. Dit geldt des te meer voor additive manufacturing, waarbij de laagsgewijze opbouw vaak een vorm van anisotropie veroorzaakt. Bij een anisotroop product verschillen de mechanische eigenschappen in de verschillende richtingen (assen). Bij LPBF komt dit doordat producten laagvoor-laag worden opgebouwd tijdens het printproces. Een belangrijke vraag is dan ook: wat is de invloed van procesparameters op de mechanische eigenschappen van LPBF-geprint AlSi10Mg?

4.1. Theoretische achtergrond

Om de invloed van het printproces te begrijpen, is het belangrijk om de parameters van het printproces te kennen. In essentie is het proces afhankelijk van drie aspecten:

- de kwaliteit van het uitgangsmateriaal;
- de depositie van lagen met een uniforme dikte en dichtheid;
- het opwarmen en versmelten van materiaal;

De materiaalkwaliteit en laagdepositie (de wijze waarop het metaalpoeder laag-voor-laag wordt neergelegd) zijn van invloed op de mechanische eigenschappen van het geprinte product. Daarnaast heeft ook het smeltproces een direct effect op de mechanische eigenschappen. Als de temperatuur te laag is dan resulteert dit in onvolledige versmelting en hechting tussen poederdeeltjes en een hoge porositeit. Lopen de temperaturen te hoog op, dan treedt er verdamping van materiaal op waardoor het materiaal poreus wordt [8].



Figuur 4.1 - Schematische weergave van de sequentiële belichting door de laser en de formule van de volumetrische energiedichtheid (Ed) tijdens het printproces. De parameters zijn de laserintensiteit (laser power), bewegingssnelheid van de laser (scan speed), afstand tussen de paden van de laser (hatch distance) en laagdikte (layer thickness).

Het metaal wordt gesmolten door belichting met een bewegende laserstraal. In figuur 4.1 is het smeltproces schematisch weergegeven met de formule van de energiedichtheid en de vier parameters waar deze formule uit bestaat. De energiedichtheid (ED) is een veelgebruikte maat voor de met laser ingebrachte energie per volume. In een ideale situatie wordt geprint met een energiedichtheid waarbij de poederdeeltjes volledig versmelten, maar zonder dat het materiaal verdampt.

In het printproces wordt het metaal laag-voor-laag aangebracht en belicht met een laser. Doordat deze lagen sequentieel worden aangebracht, zijn de uiteindelijke materiaaleigenschappen niet geheel homogeen. Dit kan resulteren in anisotropie van de mechanische eigenschappen. Als dit het geval is, zijn de mechanische eigenschappen afhankelijk van printoriëntatie en moet hiermee rekening worden gehouden bij het ontwerpen van producten.

In een voorgaand onderzoek door het Lectoraat Kunststoftechnologie 'Kunststoffen in de Machinebouw 2' (Selective Laser Sintering met PA12) is onder andere geconstateerd dat voor poederbed printen met kunststoffen de mechanische eigenschappen afhankelijk zijn van de positie op het bouwoppervlak (X- en Yrichtingen) in de printer [9]. Er is geen literatuur gevonden die rapporteert of dit effect ook optreedt voor LPBFprinten, maar vanwege de overeenkomsten in de printprocessen van SLS en LPBF is het mogelijk dat dit effect ook optreedt bij LPBF.

4.2. Experimentele opzet

De verwachting is dat de mechanische eigenschappen afhankelijk zijn van de:

- energiedichtheid
- printoriëntatie
- positie (X en Y) op het bouwoppervlak.

Deze drie parameters zijn door middel van experimenten onderzocht. De gebruikte instellingen van de 3Dprinter en de opzet van deze verschillende experimenten staan in de volgende alinea's beschreven.

Algemeen gebruikte instellingen

Alle proefstukken in dit hoofdstuk zijn geprint op een EOS M400 uit EOS Aluminium AlSi10Mg. Het bouwplatform is voorverwarmd tot 165°C en de bouwruimte is gevuld met argon(gas) gedurende het bouwproces. Er is geprint met een laagdikte van 90μm waarbij gebruik is gemaakt van een 'double recoating' met een hard(staal) recoater blad. Hierbij wordt zowel op de heen- als terugweg metaal(poeder) op het bouwplatform gelegd door de recoater. Na verwijdering van eventueel aanwezig supportmateriaal zijn alle proefstukken gereinigd door middel van glasparelstralen (Potters Ballotini, 70-110μm) bij een druk van 4 bar.

Invloed energiedichtheid & positie op het bouwplatform

De invloeden van positie op het bouwplatform en energiedichtheid op de mechanische eigenschappen zijn bepaald door middel van trekproeven. De proefstukken zijn geproduceerd op één bouwplatform samen met andere proefstukken die gebruikt zijn voor andere doeleinden.

De indeling van het bouwplatform is in figuur 4.3 weergegeven. Het bouwplatform is in 15 verschillende zones opgedeeld. Elke zone bevat 10 trekstaven (geometrie volgens ISO 527 Type 1A, zie Figuur 4.2) georiënteerd in de Z-richting met een massieve verbinding aan het bouwplatform.



Figuur 4.2 - Geometrie van de trekstaven.

In negen zones zijn de proefstukken geprint met een standaard aanbevolen energiedichtheid van 21,5 J/mm³ om zo te onderzoeken wat de invloed is van de locatie op het bouwplatform. Bij de overige zes zones is voor iedere zone een andere energiedichtheid ingesteld in het bereik van 17,5–23,5 J/mm³. Alleen het laserwattage van de hatching is gewijzigd om de energiedichtheid te wijzigen; de andere laserparameters zijn voor alle proefstukken identiek.



Figuur 4.3 - Indeling van het bouwplatform. Linksonder: 3D weergave. Rechtsboven: Bovenaanzicht, met weergave van de richting van recoaten en de stromingsrichting van het argon over het bouwplatform. De rood omkaderde proefstukken zijn gebruikt voor de proeven in dit hoofdstuk, de overige proefstukken zijn gebruikt voor andere onderzoeken. Het bouwplatform is opgedeeld in 15 zones. De 9 zones met blauwe proefstukken zijn geprint met 21,5 J/mm3 om de invloed van locatie op het bouwplatform op de mechanische eigenschappen te testen. De oranje proefstukken omvatten 6 zones, elk geprint met verschillende energiedichtheden in het bereik van 17,5-23,5 J/mm3, om de invloed hiervan op de mechanische eigenschappen te testen.

Na het printen zijn van elke zone vijf trekstaven verwijderd¹ voor de proeven (deze zijn rood omkaderd in figuur 4.3). De trekproeven zijn uitgevoerd op een Zwick Z050 met testXpert II software met een 50kN load cell (HBM) en een contact-type extensometer (Zwick). Er is gebruik gemaakt van een pre-load van 25N en een treksnelheid van 9,6 mm/minuut (reksnelheid van 0,002 s-1 over de initiële parallelle lengte van het proefstuk).

Invloed printoriëntatie

De invloed van printoriëntatie op de mechanische eigenschappen is getest door middel van trek- en impactproeven. De proefstukken zijn geprint op één bouwplatform en gecombineerd met proefstukken voor gelijktijdig lopend onderzoek op andere onderwerpen. De indeling van het bouwplatform is in figuur 4.4 weergegeven. Proefstukken zijn geplaatst in drie oriëntaties: in de Z-richting (staand, verticaal), in de XY-richting (vlak, horizontaal) en onder 45° ten opzichte van de bouwrichting. Van elke oriëntatie zijn op het bouwplatform 10 trekstaven en 10 impactstaven geplaatst; de geometrie van de proefstukken is weergegeven in figuur 4.5. Alle proefstukken zijn geprint met een energiedichtheid van 21,5 J/mm³.



Figuur 4.4 - Indeling van het bouwplatform, met weergave van de richting van recoaten en de stromingsrichting van het argon over het bouwplatform. De blauwe proefstukken links van de rode lijn zijn gebruikt in dit onderzoek. De blauwe proefstukken rechts van de rode lijn hebben een warmtebehandeling ondergaan en is over gerapporteerd in hoofdstuk 5. De witte proefstukken zijn gebruikt in een ander onderzoek.

¹ De resterende proefstukken hebben een warmtebehandeling gekregen; dit is beschreven in hoofdstuk 5.



Figuur 4.5 - Geometrie van de impactstaven. De impactstaven zijn geprint met een kerf. De kerf is na het printen niet verder bewerkt.

Na het printen zijn de trek- en impactstaven links van de rode lijn in figuur 4.4 verwijderd voor de proeven. De trekproeven zijn uitgevoerd op een Zwick Z050 met testXpert II software met een 50kN load cell (HBM) en een contact-type extensometer (Zwick). Hierbij is gebruik gemaakt van een pre-load van 25N en een treksnelheid van 3,6 mm/minuut. De impactproeven zijn uitgevoerd op een Charpy impact testmachine (Happé & van Rijn) met een hamer van 50J.

4.3. Resultaten

In deze paragraaf zijn resultaten van dit onderzoek in afzonderlijke sub-paragrafen beschreven. Als eerste is een vergelijking gemaakt tussen de datasheet van EOS voor de M400 en de experimentele resultaten met dezelfde 3D-metaalprinter.

Vergelijking van resultaten met datasheet

In figuur 4.6 worden de mechanische eigenschappen van proeven uit paragraaf 4.2 vergeleken met gegevens uit de datasheet van EOS [10]. Er is gebruik gemaakt van hetzelfde model machine en er zijn nagenoeg dezelfde procesparameters gebruikt, zoals beschreven bij figuur 4.6. De geometrie en afwerking van de proefstukken tussen de datasheet en eigen proeven verschilt: de proefstukken uit de datasheet zijn bewerkt op een draaibank (afdraaien) en de proefstukken in deze experimenten zijn alleen gestraald met glasparels.

Tensile properties - AlSi10	0Mg_09	0_FlexN	1400 1.01 - \	Without heat trea	tment
			LKT	Datasheet '21	∆%
Viold strongth 0.2% Offect	MDo	XY	205	260	-21%
field strength, 0.2 % Onset	wra	Z	226	240	-6%
Illtimate Tanaila Strangth	MDo	XY	274	400	-32%
olumate rensile strength	IVIFa	Z	337	380	-11%
Strain at brook	0/	XY	2.0	3	-
Suamatpreak	/0	Z	2.5	2	-

Figuur 4.6 - Vergelijking tussen eigen resultaten (LKT) en datasheet [10] zoals beschreven in paragraaf 4.2. De gehanteerde procesparameters bij het printen zijn identiek (EOS ParameterSet 'AlSi10Mg_090_FlexM400 1.01) met uitzondering van het inerte gas (Datasheet: stikstof. Eigen proeven: argon). Tevens verschilt de geometrie en afwerking van de proefstukken (Datasheet: ISO 6892-1 B10, proefstukken zijn afgedraaid. Eigen proeven: Nominale geometrie zoals in figuur 4.2, gereinigd dmv. glasparelstralen).

Zowel de vloeisterkte als maximale treksterkte van de eigen proeven zijn lager dan de datasheet van EOS. De eigenschappen in de Z-oriëntatie bij de eigen proeven zijn hoger dan in de XY-oriëntatie, waar dit bij de datasheet andersom is.

Het afdraaien van proefstukken verlaagt de oppervlakteruwheid. Het is aannemelijk dat deze nabewerking het verschil veroorzaakt tussen de datasheet en de LKT proeven. De oppervlakteruwheid veroorzaakt namelijk spanningsconcentraties, daarnaast is de effectieve dwarsdoorsnede meestal kleiner dan wat men meet met een schuif- of schroefmaat. Omdat de onder- en bovenzijde in het printproces in de regel ruwer zijn dan het zijvlak [11], is het ook waarschijnlijk dat de mechanische eigenschappen in de horizontale (XY-) oriëntatie hierdoor sterker worden beïnvloed dan de verticale (Z-) oriëntatie. Er wordt daarom verondersteld: de mechanische eigenschappen van de eigen proeven zijn representatief voor printstukken van dit materiaal die niet zijn nabewerkt.

Reproduceerbaarheid mechanische eigenschappen op dezelfde machine

Voor dit onderzoek zijn meerdere printjobs geprint om verschillende effecten te bestuderen. Het is daardoor mogelijk om een indicatie te krijgen van de reproduceerbaarheid van de mechanische eigenschappen. De mechanische eigenschappen in de Z-oriëntatie van twee printjobs (genaamd Orientation en XY-Position) zijn vergeleken en weergegeven in figuur 4.7. De proefstukken zijn niet nabewerkt.

Comparison of tensile properties in Z-direction between print jobs									
Specimens from dataset \rightarrow Orientation XY-Position Δ %									
Young's Modulus	MPa	61	71	-14%					
Yield strength, 0.2% Offset	MPa	226	231	-2%					
Ultimate Tensile Strength	MPa	337	332	2%					
Strain at break	%	2.5	2	23%					

Figuur 4.7 - Vergelijking van mechanische eigenschappen in de Z-oriëntatie zoals gevonden in de onderzoeken naar de invloed van printoriëntatie resp. positie op het bouwplatform. Let op: In de onderzoeken zijn verschillende geometrie proefstukken gebruikt!

De metingen zijn met dezelfde trekbank en extensometer uitgevoerd. Bij de twee printjobs zijn proefstukken met een verschillende geometrie geprint, zowel de dwarsdoorsnede als parallelle lengte waren verschillend. De vloeisterkte (bij 0.2% rekgrens) en maximale treksterkte komen overeen bij de printjobs, terwijl de rek bij breuk en met name de Youngs Modulus verschillen. Bij het bepalen van de vloeisterkte en treksterkte speelt de geometrie van de proefstukken geen rol. Bij de Young's modulus en rek bij breuk speelt de doorsnede van het proefstuk een rol. De proefstukken met een kleinere dwarsdoorsnede bevatten (ten opzichte van de massieve kern) relatief gezien een groter gebied waar de oppervlakteruwheid een rol speelt. Het is daarom waarschijnlijk dat de gemeten verschillen in de Young's Modulus en rek bij breuk het gevolg zijn van dit verschil in de geometrie.

De overeenkomst tussen de vloeisterkte en maximale treksterkte van de twee printjobs geeft een sterke indicatie van een goede reproduceerbaarheid van sterkte tussen de verschillende printjobs. Om conclusies te kunnen trekken over de reproduceerbaarheid van de Youngs Modulus en rek bij breuk moeten jobs met dezelfde geometrie proefstukken worden vergeleken.

Invloed van de positie op het bouwplatform

In figuur 4.8 t/m 4.11 zijn verschillende diagrammen weergegeven van de mechanische eigenschappen van de proefstukken die geplaatst waren in de negen verschillende zones op het bouwplatform.



Aan de linkerzijde van ieder figuur is een 3D weergave van de zones, waarbij zone A1 het dichtst bij de oorsprong van het bouwplatform ligt en zone C3 het verst bij deze oorsprong vandaan. Aan de rechterzijde van ieder figuur zijn dezelfde meetwaarden als lijndiagram weergegeven om de spreiding inzichtelijk te maken.

In figuur 4.8 is de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) weergegeven. De gemiddelde sterkte van de zones met de laagste en hoogste vloeisterkte verschillen minder dan 10MPa. Daarom kan gesteld worden dat de vloeisterkte onafhankelijk is van de positie op het bouwplatform.



Figuur 4.8 - Vloeisterkte bij 0,2% rek in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: 3D weergave. Rechts: Lijndiagram met weergave van spreiding; n=5).

In figuur 4.9 is de maximale treksterkte weergegeven. De gemiddelden van de zones met de hoogste en laagste sterkte verschillen slechts 10MPa, en zijn kleiner dan de spreiding. Op basis van deze informatie wordt gesteld dat de maximale treksterkte van de proefstukken in de verschillende zones vergelijkbaar is.



Figuur 4.9 - Maximale treksterkte in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: 3D weergave. Rechts: Lijndiagram met weergave van spreiding; n=5.



De uitkomsten van de rek bij breuk zijn weergegeven in figuur 4.10. Hier zijn verschillen in de uitkomsten maar er is ook meer spreiding in de grafiek. Ook in de rek-bij-breuk zijn hierdoor geen significante verschillen waar te nemen tussen de proefstukken in de verschillende zones op het bouwplatform.



Figuur 4.10 - Rek bij breuk in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: 3D weergave. Rechts: Lijndiagram met weergave van ; n=5.

In figuur 4.11 is de Young's Modulus van de verschillende proefstukken weergegeven. Er zijn verschillen meetbaar in de gemiddelde Young's Modulus tussen verschillende zones, maar ook hier vallen deze in het niet door de spreiding van de metingen. Uit de metingen blijkt dan ook geen duidelijke relatie tussen de Young's Modulus van de proefstukken en de locatie op het bouwplatform.



Figuur 4.11 - Young's Modulus in de Z-richting, berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: 3D weergave. Rechts: Lijndiagram met weergave van spreiding; n=5.

Uit de resultaten blijkt dat in tegenstelling tot SLS-printen van kunststoffen, de positie op het bouwplatform bij LPBF-printen van AlSi10Mg geen significante invloed heeft op de vloeisterkte, maximale sterkte, rek bij breuk of Young's modulus. De verklaring hiervoor is dat de warmte bij SLS printen voor het grootste gedeelte wordt ingebracht door een keramische heater van bovenaf en verwarmingselementen links en rechts van de bak
waarin het product gevormd wordt. Door de specifieke positie van de warmtebronnen ontstaat een temperatuurgradiënt. Bij LPBF wordt nagenoeg alle warmte door de laser ingebracht en deze input is onafhankelijk van de positie.

Invloed energiedichtheid

In figuur 4.12 t/m 4.15 zijn grafieken weergegeven van mechanische eigenschappen inclusief spreiding (Y-as) bij verschillende waarden van energiedichtheid tijdens het smeltproces (X-as).

In figuur 4.12 is de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) weergegeven en in figuur 4.13 de maximale treksterkte. De vloeisterkte lijkt een iets dalende trend te hebben bij toenemende energiedichtheid, waar de maximale treksterkte stijgt met toenemende energiedichtheid tot ca. 20 J/mm³. Boven deze energiedichtheid lijkt een plafond op te treden in de maximale treksterkte, hoewel er onvoldoende datapunten zijn om dit met zekerheid te kunnen stellen.



0.2% Offset Yield Strength (MPa)

Figuur 4.12 - Vloeisterkte bij 0,2% rek in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding is bij de meeste punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.



Figuur 4.13 - Maximale treksterkte in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding van sommige punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.



In figuur 4.14 en 4.15 zijn respectievelijk de rek bij breuk en Young's Modulus weergegeven. Uit de grafiek blijkt duidelijk dat de rek bij breuk stijgt met toenemende energiedichtheid. Uit de data van de Young's Modulus blijkt echter geen duidelijke relatie tussen de Young's modulus en de energiedichtheid.



Figuur 4.14 - Rek bij breuk in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding van sommige punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.



Figuur 4.15 - Young's Modulus in de Z-richting, berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%, geprint bij verschillende energiedichtheden.

Uiteindelijk is alleen de Young's Modulus vergelijkbaar in het geteste bereik van energiedichtheid. De rek bij breuk, en in mindere mate de maximale treksterkte en vloeisterkte, tonen wél een relatie aan met de energiedichtheid in het geteste bereik. De respons verschilt echter per eigenschap, waardoor er niet voor alle eigenschappen één set optimale procesparameters is.

Invloed printoriëntatie

In figuur 4.16 t/m 4.20 zijn grafieken weergegeven met mechanische eigenschappen van het materiaal in verschillende printoriëntaties.

In figuur 4.16 is de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) weergegeven. De 45°- en Z- (verticale) oriëntatie vertonen een min of meer gelijkwaardige vloeisterkte; van de XY- (horizontale) oriëntatie is de vloeisterkte lager.



Figuur 4.16 - Vloeisterkte bij 0,2% rek bij verschillende printoriëntaties. De weergave van spreiding is 1x standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde; n=5.

In figuur 4.17 wordt de maximale treksterkte weergegeven. Voor de maximale treksterkte geldt dat de Zoriëntatie de grootste sterkte heeft. De 45°-oriëntatie heeft een iets lagere sterkte. In de XY-richting is de sterkte beduidend lager en heeft deze tevens een grotere spreiding. Dit kan worden verklaard doordat de samples geprint in XY richting en onder 45 graden een hogere ruwheid hebben, dan de samples geprint in Z-oriëntatie. Deze ruwheid leidt vermoedelijk tot spanningsconcentraties en scheurvorming, waardoor de samples eerder bezwijken. Deze verklaring wordt onderschreven door het feit dat de gemeten verschillen in de Z-oriëntatie met de datasheet van EOS, klein zijn. De verschillen met de (bewerkte) samples van EOS in XY richting en in 45 graden oriëntatie is beduidend groter.



Figuur 4.17 - Maximale treksterkte bij verschillende printoriëntaties. De weergave van spreiding is 1x standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde: n=5.



In figuur 4.18 is de rek bij breuk weergegeven. De gemiddelde rek bij breuk van de proefstukken blijkt iets hoger te zijn in de Z-oriëntatie dan in de andere oriëntaties en de spreiding in de XY-oriëntatie is hoger dan in de andere oriëntaties.



Figuur 4.18 - Rek bij breuk bij verschillende printoriëntaties. De weergave van spreiding is 1x standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde; n=5.

In figuur 4.19 is de Young's Modulus weergegeven. De Youngs' Modulus van de proefstukken toont geen duidelijke afhankelijkheid van de printoriëntatie.



Figuur 4.19 - Young's Modulus in de Z-richting, berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%, bij verschillende printoriëntaties. De weergave van spreiding is 1x standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde; n=5.

In figuur 4.20 is de impactsterkte weergegeven. Er is een noemenswaardig verschil in impactsterkte tussen de geteste oriëntaties. In tegenstelling tot de maximale treksterkte is de impactsterkte het hoogst in de XY-oriëntatie en het laagst in de Z-oriëntatie.



Figuur 4.20 - Charpy notched impactsterkte (meegeprinte kerf, 50J hamer) bij verschillende printoriëntaties, inclusief de spreiding; n=5.

Uit deze resultaten wordt duidelijk dat de impactsterkte, (in mindere mate) de maximale treksterkte en de vloeisterkte afhankelijk zijn van printoriëntatie. De rek bij breuk en de Young's Modulus worden hier niet door beïnvloed. Op basis van de bestudeerde literatuur kan geen verklaring voor de deze resultaten worden gevonden. Een mogelijke verklaring voor de relatie tussen deze mechanische eigenschappen en de printoriëntatie is de inhomogeniteit die ontstaat in het materiaal tijdens het printproces. Daar komt bij dat de oppervlakteruwheid afhankelijk is van de printoriëntatie [11], waarbij verticale wanden de laagste ruwheid hebben. Ook verschillen in de effectieve dwarsdoorsnede tijdens het printproces (als gevolg van oriëntatie en de aanwezigheid van supportmateriaal voor de XY-oriëntatie) zouden een invloed kunnen hebben op de afvoer van warmte, de microstructuur, en de opbouw van interne spanningen in de proefstukken. Tot slot verschilt de afstand in de Z-richting tussen de locatie van de kerf in de proefstukken tot het bouwplatform. Mogelijk heeft dit, in combinatie met de verwarming van het bouwplatform (165°C), invloed gehad op de mechanische eigenschappen (impactsterkte en eigenschappen bij trekbelasting).



4.4. Conclusies en aanbevelingen

De effecten van verschillende procesparameters van het printproces zijn onderzocht. Daarnaast is een datasheet van fabrikant EOS vergeleken met proefstukken die zijn geprint op een identieke machine, om zo een indicatie te krijgen van de reproduceerbaarheid.

Een vergelijking tussen de waarden op de datasheet en het eigen onderzoek liet een duidelijk verschil zien, waarschijnlijk veroorzaakt door de verschillende nabewerkingstechnieken die voor de proefstukken zijn gebruikt. Voor een beter vergelijk zouden de proefstukken op dezelfde wijze moeten worden afgewerkt als de proefstukken op de datasheet, waarmee direct ook aanvullend inzicht in de reproduceerbaarheid verkregen kan worden. Ook kan hiermee de invloed van de oppervlakteruwheid op de mechanische eigenschappen beter in kaart worden gebracht.

De experimenten geven de indicatie dat zowel vloeisterkte als de treksterkte goed reproduceerbaar zijn bij verschillende printjobs. Het blijft echter bij een indicatie doordat de geometrie van de proefstukken niet overeen kwam bij de twee printjobs. Vloei- en treksterkte zijn niet afhankelijk van de geometrie van het proefstuk. Het verschil in geometrie veroorzaakt mogelijk wel het gemeten verschil in de Young's Modulus en de rek bij breuk. Bij vervolgonderzoek is het noodzakelijk de reproduceerbaarheid te testen met proefstukken met een identieke geometrie, printoriëntatie, energiedichtheid en nabewerking.

De vloeisterkte, maximale treksterkte en rek bij breuk blijken afhankelijk te zijn van de energiedichtheid. Welke procesparameters optimaal zijn, is afhankelijk van de toepassing en de benodigde mechanische eigenschappen. Voor een consistente productkwaliteit wordt daarom geadviseerd de procesparameters en/of vereiste mechanische eigenschappen vast te leggen als onderdeel van een ontwerpspecificatie. Ook de printoriëntatie heeft invloed op de mechanische eigenschappen, waarbij de Z-oriëntatie in de trekproeven de hoogste sterkte en in de XY-oriëntatie de laagste sterkte behaalt. Het valt op dat de invloed van printoriëntatie op de impactsterkte juist de tegenovergestelde resultaten laat zien. Er zijn verschillende verklaringen en verder onderzoek rondom dit onderwerp is noodzakelijk.

De energiedichtheid en printoriëntatie hebben een significante invloed op de mechanische eigenschappen. De positie van de proefstukken op het bouwplatform heeft bij LPBF-printen van AlSi10Mg daarentegen geen significante invloed op de mechanische eigenschappen bij een trekbelasting in de Z-richting. Dit is anders dan bij het SLS-printen van kunststoffen, waar de locatie in het bouwvolume wél een significante invloed heeft op deze eigenschappen. Deze uitkomst is gunstig voor een consistente productkwaliteit bij serieproductie. Daarnaast mag worden verondersteld dat de locatie van de proefstukken op het bouwplatform ook geen invloed heeft op de (andere) mechanische eigenschappen. Dit is van belang voor mogelijk vervolgonderzoek naar de invloed van andere procesparameters op de mechanische eigenschappen.

5. Invloed warmtebehandeling op mechanische eigenschappen

De productie van maatnauwkeurige onderdelen is belangrijk voor industriële toepassingen. Tijdens het LPBFprintproces ontstaan interne spanningen in de geprinte onderdelen. Vervorming door deze spanningen worden (gedeeltelijk) tegengehouden door de verbinding van deze onderdelen met het bouwplatform. Vervorming kan echter alsnog plaatsvinden bij het verwijderen van de onderdelen van het bouwplatform. Hierdoor kunnen onderdelen alsnog kromtrekken en wordt de gewenste maatnauwkeurigheid niet gehaald. Om dit probleem op te lossen kunnen onderdelen spanningsarm worden gegloeid voordat deze van het bouwplatform worden verwijderd. Een dergelijke warmtebehandeling kan echter ook de mechanische eigenschappen beïnvloeden. De vraag is dan ook: welk effect heeft spanningsarm gloeien op de mechanische eigenschappen van LPBF-geprint AlSi10Mg?

5.1. Theoretische achtergrond

Allereerst is het belangrijk te begrijpen waarom interne spanningen ontstaan in het materiaal. Zoals schematisch is weergegeven in Figuur 5.1 introduceert het laagsgewijze smeltproces een thermische gradiënt in het materiaal: de hoogste temperaturen zijn boven in het geprinte object omdat het materiaal aan de onderzijde al (gedeeltelijk) is afgekoeld. Dat betekent dat het materiaal onderin eerder krimpt dan het materiaal bovenin.

Deze ongelijke krimp veroorzaakt interne spanningen in het materiaal waardoor het object op kan krullen of krom kan trekken. Het kromtrekken kan worden onderdrukt door de geometrie van het onderdeel te optimaliseren of de verbindingen met het bouwplatform te verstevigen (door middel van supports). De interne spanningen blijven echter bestaan, waardoor onderdelen bij verwijdering van het bouwplatform alsnog krom kunnen trekken.



Figuur 5.1 - Het optreden van thermische gradiënten, uitzettings- en krimpeffecten en resulterende interne spanningen bij LPBF-printen [12].

Interne spanningen kunnen worden verminderd door het verwarmen van het bouwplatform, het toepassen van een tweede laserbelichting of het uitvoeren van een warmtebehandeling na het printproces [13]. De standaard procesparameters van AlSi10Mg op de EOS M400 gaan reeds uit van een verwarmd bouwplatform van 165°C. Hoewel een tweede laserbelichting technisch mogelijk is, verlaagt dit de snelheid van het printproces en zorgt dit nog steeds niet voor een homogene temperatuur voor het gehele onderdeel.



Weliswaar is een warmtenabehandeling een extra processtap, maar dit gaat niet ten koste van de snelheid en productiecapaciteit van het printproces. Het gehele onderdeel wordt in een oven geleidelijk tot één homogeen verdeelde temperatuur opgewarmd, waarbij het metaal opnieuw kristalliseert en interne spanningen worden gedissipeerd.

EOS adviseert voor hun AlSi10Mg een warmtenabehandeling van 2 uur bij 300°C. Dit leidt tot een daling van de vloeisterkte en maximale treksterkte en een stijging van de rek bij breuk [14]. Voor LPBF-geprinte aluminiumlegeringen is bekend dat de daling in sterkte en stijging in rek bij breuk toeneemt met de temperatuur van de nabehandeling [15-17]. Of de invloed van spanningsarmgloeien op de mechanische eigenschappen ook afhankelijk is van printparameters zoals de energiedichtheid, is niet in de literatuur gevonden.

5.2. Experimentele opzet

Om de mechanische eigenschappen van LPBF-geprint AlSi10Mg zonder warmtebehandeling (as-printed) te vergelijken met die na spanningsarm gloeien bij 300°C voor 2 uur is een reeks experimenten uitgevoerd. De printjobs met proefstukken voor deze warmtebehandeling zijn gecombineerd met de printjobs voor het onderzoek naar de invloed naar energiedichtheid, printoriëntatie en positie (X- en Y) op het bouwplatform. De opzet van de experimenten voor de vergelijking van as-printed versus spanningsarm gegloeid AlSi10Mg staat hieronder beschreven. De verwachting is dat de sterkte van het materiaal zal dalen en de taaiheid (onder andere rek bij breuk, kerfslagwaarde) zal stijgen, onafhankelijk van printoriëntatie, energiedichtheid en positie op het bouwplatform.

Parameters printproces en warmtenabehandeling

Alle proefstukken in dit hoofdstuk zijn geprint op een EOS M400 uit EOS Aluminium AlSi10Mg. Het bouwplatform is voorverwarmd tot 165°C en de bouwruimte is gevuld met argon gedurende het gehele bouwproces. Er is geprint met een laagdikte van 90µm, gebruikmakend van 'double recoating' met een hard (stalen) recoater blad. Alle proefstukken zijn gereinigd door middel van glasparelstralen (Potters Ballotini, 70-110µm) bij een druk van 4 bar. De 'as-printed' proefstukken zijn verwijderd van het bouwplatform en zijn vervolgens ontdaan van eventueel aanwezig supportmateriaal. De andere proefstukken zijn spanningsarm gegloeid terwijl deze nog aan het bouwplatform waren verbonden.

Het spanningsarm gloeien is uitgevoerd met een Nabertherm LH 216/12 moffeloven. Het bouwplatform met proefstukken is daarbij geplaatst in een afgesloten container, welke eerst onder vacuüm is gebracht (≤0.05 bar) en daarna is gevuld met argon, zodat het spanningsarm gloeien wordt uitgevoerd onder een inerte atmosfeer. De container is in de oven geplaatst en de oven is in 30 minuten naar een temperatuur van 300°C gebracht. Deze temperatuur wordt voor een periode van 2 uur vastgehouden. Hierna is de verwarming uitgezet waardoor de proefstukken langzaam zijn afgekoeld naar kamertemperatuur. Hierna zijn de proefstukken losgezaagd van het bouwplatform en zijn eventuele supports verwijderd. De opgelegde temperatuur wordt gemeten in de oven; de temperaturen die zijn bereikt in de container zijn bijgehouden met een afzonderlijke datalogger en thermokoppel.

Invloed spanningsarm gloeien + printoriëntatie

De invloed van printoriëntatie op de mechanische eigenschappen is getest door middel van trek- en kerfslagproeven. De proefstukken zijn geproduceerd op één bouwplatform, gecombineerd met proefstukken voor gelijktijdig lopend onderzoek op andere onderwerpen. Voor elke oriëntatie zijn op het bouwplatform 10 trekstaven en 10 impactstaven geplaatst, waarvan de geometrie is weergegeven in figuur 5.2. Alle proefstukken zijn geprint met een energiedichtheid van 21,5 J/mm³.



De indeling van het bouwplatform is in figuur 5.3 weergegeven. Proefstukken zijn geplaatst in 3 oriëntaties: In de Z-richting (staand, verticaal), in de XY-richting (vlak, horizontaal) en onder een hoek van 45° ten opzichte van de bouwrichting.



Figuur 5.2 - Geometrie van de gebruikte proefstukken. Boven: Trekstaven. Onder: Impactstaven. De impactstaven zijn geprint met een kerf. De kerf is na het printen niet verder bewerkt.



Figuur 5.3 - Indeling van het bouwplatform, met weergave van de richting van recoaten en de stromingsrichting van het argon over het bouwplatform. De blauwe proefstukken rechts van de rode lijn zijn spanningsarm gegloeid, die links van de rode lijn hebben geen warmtenabehandeling gehad. De witte proefstukken zijn gebruikt in een ander onderzoek.

De proefstukken links van de rode lijn in figuur 5.3 hebben geen warmtebehandeling ondergaan; de proefstukken rechts van de rode lijn zijn spanningsarm gegloeid. De trekproeven zijn uitgevoerd op een Zwick Z050 met testXpert II software met een 50kN load cell (HBM) en een contact-type extensometer (Zwick). Er is gebruik gemaakt van een pre-load van 25N en een treksnelheid van 3,6 mm/minuut. De kerfslagproeven zijn uitgevoerd op een Charpy impact testmachine (Happé & van Rijn) met een hamer van 50J.

Invloed spanningsarm gloeien, energiedichtheid & positie op het bouwplatform

De invloeden van de positie op het bouwplatform en de energiedichtheid zijn bepaald door middel van trekproeven. De proefstukken zijn geproduceerd op één bouwplatform, gecombineerd met proefstukken voor gelijktijdig lopend onderzoek op andere onderwerpen.



Figuur 5.4 - Indeling van het bouwplatform. Linksonder: 3D weergave. Rechtsboven: Bovenaanzicht, met weergave van de richting van recoaten en de stromingsrichting van het argon over het bouwplatform. De wit omkaderde proefstukken zijn de proefstukken zonder warmtenabehandeling, de rood omkaderde proefstukken zijn spanningsarm gegloeid. Het bouwplatform is opgedeeld in 15 zones. De 9 zones met blauwe proefstukken zijn geprint met 21,5 J/mm³ om de invloed van locatie op het bouwplatform op de mechanische eigenschappen te bepalen. De oranje proefstukken omvatten 6 zones, elk geprint met verschillende energiedichtheden in het bereik van 17,5-23,5 J/mm³, om de invloed hiervan op de mechanische eigenschappen te bepalen.

De indeling van het bouwplatform is in figuur 5.4 weergegeven. Het bouwplatform is in 15 verschillende zones opgedeeld. Elke zone bevat 10 trekstaven (geometrie volgens ISO 527 Type 1A), georiënteerd in de Z-richting met een massieve verbinding aan het bouwplatform. Om de invloed van de locatie op het bouwplatform te bepalen is het bouwplatform met proefstukken in 9 zones verdeeld. De samples zijn geprint met een energiedichtheid van 21,5 J/mm³. In de overige 6 zones is gevarieerd met de energiedichtheid in het bereik van 17,5–23,5 J/mm³. Alleen het laserwattage van de hatching is aangepast om de energiedichtheid te wijzigen; de andere laserparameters zijn voor alle proefstukken identiek.

Na het printen zijn van elke zone 5 trekstaven verwijderd (wit omkaderd in figuur 5.4). De andere 5 trekstaven van elke zone (rood omkaderd in figuur 5.4) zijn spanningsarm gegloeid. De trekproeven zijn uitgevoerd op een Zwick Z050 met testXpert II software met een 50kN load cell (HBM) en een contact-type extensometer (Zwick). Er is gebruik gemaakt van een pre-load van 25N en een treksnelheid van 9,6 mm/minuut.



5.3. Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten vergeleken van LPBF-geprint AlSi10Mg zonder warmtebehandeling (Asprinted) en na spanningsarm gloeien (Annealed, 300°C/2h) bij verschillende printoriëntaties, energiedichtheden en posities op het bouwplatform. In deze paragraaf wordt alleen gelet op de invloed van de warmtebehandeling.

Procescontrole warmtenabehandelingsproces

De datalogging van de temperatuur in de gesloten container geeft de mogelijkheid het temperatuurverloop van de warmtenabehandelingen te controleren. In figuur 5.5 zijn de temperaturen weergegeven van warmtenabehandelingscycli van de twee verschillende bouwplaten ('Print orientation' en 'ED') die in dit onderzoek zijn gebruikt.

Waar het gemeten temperatuurverloop van het 'printoriëntatie' bouwplatform het ingestelde verloop benadert, kent het temperatuurverloop van het 'ED' bouwplatform een grote afwijking. Zo is de temperatuur van de proefstukken aan het begin van de hold fase veel te laag en wordt de ingestelde 300°C gedurende de warmtebehandeling niet bereikt.



Figuur 5.5 - Datalogging van temperatuur (Y-as) over tijd (X-as) van de warmtenabehandelingscycli ten opzichte van de ingestelde waarde.

De controller van de oven lijkt de oorzaak van dit probleem. Met het doel een meer representatieve hold fase van 300°C voor 2 uur te verkrijgen voor de 'ED' bouwplatform, is op deze bouwplatform een tweede warmtenabehandelingscyclus uitgevoerd met dezelfde hold fase, maar met een opwarmcyclus van 180 minuten in plaats van 30 minuten. In figuur 5.6 zijn de gelogde temperaturen weergegeven ten opzichte van de eerder uitgevoerde warmtenabehandelingen.







Figuur 5.6 - Datalogging van temperatuur (Y-as) over tijd (X-as) van de warmtebehandelingscycli, inclusief een 2^e cyclus bij een lagere opwarmsnelheid voor het bouwplatform met de proefstukken geprint bij verschillende energiedichtheden. Ten behoeve van datavergelijking zijn enkele proeven op de X-as (tijd) verschoven zodat van alle proeven de hold fase begint vanaf 180 minuten.

Hoewel het temperatuurverloop tijdens de hold fase verschilt tussen de twee bouwplatforms, is het temperatuurverschil tussen de twee bouwplatforms aan het begin en einde van de hold fase respectievelijk 3°C en 1°C. Voor toekomstig onderzoek en industriële toepasbaarheid is duidelijk een verbetering nodig aan de procescontrole en reproduceerbaarheid van de warmtenabehandeling. Echter, door de tweede verwarmingscyclus zijn de warmtenabehandelingen van beide bouwplatforms wél van voldoende nauwkeurigheid bevonden om een vergelijking in mechanische eigenschappen te maken van onbehandeld versus spanningsarm gegloeid materiaal.

Invloed spanningsarm gloeien gecombineerd met de printoriëntatie

In figuur 5.7 en 5.8 zijn respectievelijk de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) en maximale treksterkte weergegeven. Met uitzondering van de maximale treksterkte in de XY-oriëntatie zijn de vloeisterkte en maximale treksterkte significant lager na spanningsarm gloeien. Ook is de spreiding van deze eigenschappen lager na spanningsarm gloeien. Onderlinge verschillen tussen printoriëntaties nemen af maar blijven aanwezig.



Figuur 5.7 - Vloeisterkte bij 0,2% rek voor en na spanningsarm gloeien (300°C/2 uur) bij verschillende printoriëntaties inclusief de spreiding; n=5.



Figuur 5.8 - Maximale treksterkte voor en na spanningsarm gloeien (300°C/2 uur) bij verschillende printoriëntaties, inclusief de spreiding; n=5.

In figuur 5.9 is de rek bij breuk weergegeven. In alle printoriëntaties is sprake van een duidelijke stijging van de gemiddelde rek bij breuk. Door de spreiding is deze niet significant in de XY-oriëntatie, voor de 45°- en Z-oriëntaties is de stijging wel significant.





Figuur 5.9 - Rek bij breuk voor en na spanningsarm gloeien (300°C/2 uur) bij verschillende printoriëntaties, inclusief de spreiding; n=5.

In figuur 5.10 is de Young's Modulus weergegeven. Hoewel voor de XY- en Z-oriëntaties de gemiddelde modulus daalt, is er de nodige spreiding aanwezig en is er in geen van de oriëntaties een significante verandering in modulus tussen de onbehandelde en spanningsarm gegloeide proefstukken.



Figuur 5.10 - Young's Modulus voor en na spanningsarm gloeien (300°C/2 uur), berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%, bij verschillende printoriëntaties, inclusief de spreiding; n=5.

In figuur 5.11 is de impactsterkte weergegeven. Voor alle drie printoriëntaties is de impactsterkte aanzienlijk hoger voor de spanningsarm gegloeide proefstukken vergeleken met de onbehandelde proefstukken.



Figuur 5.11 - Charpy notched impactsterkte (meegeprinte kerf, 50J hamer) voor en na spanningsarm gloeien (300°C/2 uur) bij verschillende printoriëntaties, inclusief de spreiding; n=5.

Uit de resultaten blijkt dat door spanningsarm gloeien zowel de vloeisterkte als maximale treksterkte dalen, met uitzondering van de maximale treksterkte in de XY-oriëntatie. De spreiding in de sterkte is ook lager. De impactsterkte is aanzienlijk hoger na spanningsarm gloeien evenals de rek bij breuk; de taaiheid van het materiaal is dus hoger na spanningsarm gloeien. De modulus is de enige gemeten eigenschap welke geen significante verandering kent.

Invloed spanningsarm gloeien gecombineerd met de energiedichtheid

In figuur 5.12 t/m 5.15 zijn grafieken weergegeven van mechanische eigenschappen inclusief spreiding (Y-as) bij verschillende waarden van energiedichtheid tijdens het smeltproces (X-as). Let op: Zoals beschreven in paragraaf 5.2 zijn de warmtenabehandelde proefstukken in deze paragraaf een tweede keer nabehandeld. Hoewel dit invloed zou kunnen hebben op de mechanische eigenschappen, hebben alle datapunten in deze paragraaf dezelfde warmtenabehandeling gehad en kan de invloed van energiedichtheid ná warmtenabehandeling nog steeds worden bestudeerd.

In figuur 5.12 is de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) weergegeven en in figuur 5.13 de maximale treksterkte. De gemiddelde vloeisterkte en maximale treksterkte zijn lager na spanningsarm gloeien over het gehele bereik van beproefde energiedichtheden. Tevens is de spreiding lager na spanningsarm gloeien. Ook zijn de vloeisterkte en maximale treksterkte na spanningsarm gloeien minder afhankelijk zijn van de gebruikte energiedichtheid in het printproces.



Figuur 5.12 - Vloeisterkte bij 0,2% rek in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding is bij de meeste punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.



Figuur 5.13 - Maximale treksterkte in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding is bij een aantal punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.

In figuur 5.14 is de rek bij breuk weergegeven. In tegenstelling tot de sterkte lijkt de rek bij breuk na spanningsarm gloeien in het bereik van 17.5 - 21.5 J/mm³ sterker afhankelijk van de energiedichtheid. Boven 21.5 J/mm³ lijkt min of meer een plafond in de rek bij breuk op te treden, hoewel het door de toename in spreiding na spanningsarm gloeien niet mogelijk is hier harde conclusies aan te verbinden.



Figuur 5.14 - Rek bij breuk in de Z-richting, geprint bij verschillende energiedichtheden. De spreiding is bij de enkele punten niet of nauwelijks te zien, omdat deze zo klein is; n=5.

In figuur 5.15 is de Young's Modulus weergegeven. Waar eerder geen sprake was van een significante daling in modulus na spanningsarm gloeien (figuur 5.10), is dat in deze dataset wél het geval. Ook is er na spanningsarm gloeien tussen de uiterste waarden van energiedichtheid sprake van een significant lagere modulus bij de hogere energiedichtheid. Desondanks is geen eenduidige invloed van energiedichtheid op de modulus na spanningsarm gloeien herkend door de fluctuaties in het bestudeerde bereik van energiedichtheid.



Figuur 5.15 - Young's Modulus in de Z-richting, berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%, geprint bij verschillende energiedichtheden. De weergave van spreiding is 1x standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde.

Samengevat blijkt uit de metingen over het bereik van 17.5 - 23.5 J/mm³, dat de invloed van spanningsarm gloeien ruwweg hetzelfde is: de vloeisterkte en maximale treksterkte dalen en de rek bij breuk stijgt. Wel lijkt spanningsarm gloeien de invloed van energiedichtheid op de vloeisterkte en maximale treksterkte te verminderen en de invloed op rek bij breuk te verhogen. Tot slot daalt de Young's modulus ten gevolge van spanningsarm gloeien. Mogelijk spelen verschillen in thermische historie (de 2^e warmtebehandelingscyclus) hierin een rol.

Invloed spanningsarm gloeien gecombineerd met de positie op bouwplatform

In deze paragraaf worden de verschillen in mechanische eigenschappen tussen de zones vóór en na spanningsarm gloeien beschreven. Let op: om de verschillen tussen zones en de spreiding duidelijk zichtbaar te maken in de grafieken zijn de schaalverdelingen van de grafieken aangepast en zijn dus niet altijd gelijk voor de onbehandelde en spanningsarm gegloeide materialen. Ter ondersteuning van de data is in figuur 5.16 de verdeling van het bouwplatform in zones afgebeeld.



Figuur 5.16 - Codering van de zones over het X- en Y-vlak, waarbij zone A1 het dichtst bij het nulpunt van de printjob is en C3 het verst daarbij vandaan.

In figuur 5.17 is de vloeisterkte (bij 0,2% plastische rek) weergegeven. Na spanningsarm gloeien zijn de verschillen in de gemiddelde sterkte tussen de zones kleiner. Ook is de spreiding van de sterkte per zone kleiner geworden.



Figuur 5.17 - Vloeisterkte bij 0,2% rek in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: Materiaal zonder warmtenabehandeling. Rechts: Spanningsarm gegloeid materiaal. De weergegeven spreiding is 1x standaarddeviatie.

In figuur 5.18 is de maximale treksterkte weergegeven. Ook hier zijn de verschillen in gemiddelde sterkte tussen zones en de spreiding van de sterkte per zone kleiner na spanningsarm gloeien.



Figuur 5.18 - Maximale treksterkte in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: Materiaal zonder warmtenabehandeling. Rechts: Spanningsarm gegloeid materiaal. De weergegeven spreiding is 1x standaarddeviatie.

Van de rek bij breuk, weergegeven in figuur 5.19, zijn de verschillen in gemiddelde rek bij breuk tussen zones na spanningsarm gloeien weergegeven. De verschillen tussen de zones in rek bij breuk na spanningsarm gloeien zijn niet significant omdat de spreiding in de rek bij breuk per zone ook is toegenomen.



Figuur 5.19 - Rek bij breuk in de Z-richting, in verschillende zones op het bouwplatform. Links: Materiaal zonder warmtenabehandeling. Rechts: Spanningsarm gegloeid materiaal. De weergegeven spreiding is 1x standaarddeviatie.

In figuur 5.20 is tot slot ook de Young's Modulus weergegeven. Hoewel het spanningsarm gloeien de modulus heeft verlaagd, zijn de onderlinge verschillen tussen de zones en de spreiding per zone soortgelijk voor en na spanningsarm gloeien.



Figuur 5.20 - Young's Modulus in de Z-richting, berekend over een rekbereik van 0,05-0,15%. Links: Materiaal zonder warmtenabehandeling. Rechts: Spanningsarm gegloeid materiaal. De weergegeven spreiding is 1x standaarddeviatie.

Uit de resultaten blijkt dat na spanningsarm gloeien de vloeisterkte en maximale treksterkte een lagere spreiding hebben per zone en over het gehele bouwplatform. De verschillen tussen zones en de spreiding per zone is voor de rek bij breuk na spanningsarm gloeien echter hoger. De modulus kent ongeveer dezelfde verschillen tussen zones en spreiding per zone voor en na spanningsarm gloeien.

5.4. Conclusie

In het onderzoek is bestudeerd wat de invloed van spanningsarm gloeien is op de mechanische eigenschappen van LPBF-geprint AlSi10Mg bij verschillende printoriëntaties, energiedichtheden en posities op het bouwplatform. Hierbij is gebruik gemaakt van samples waarvan het oppervlakte niet nabehandeld is en dus nog ruw is.

Allereerst is geconstateerd dat de procescontrole van het spanningsarm gloeien niet goed functioneert. Om te voorkomen dat de reproduceerbaarheid van de warmtenabehandeling in het geding komt, moet de temperatuurbeheersing verbeterd worden. Met een lagere opwarmsnelheid zijn bij deze test toch bruikbare proefstukken gemaakt. Omdat in dit onderzoek alleen proefstukken zijn vergeleken die van hetzelfde bouwplatform en dezelfde warmtenabehandeling afkomstig zijn, heeft dit geen negatieve invloed op de betrouwbaarheid van de gevonden resultaten.

Uit de trekproeven blijkt dat spanningsarm gloeien de vloeisterkte en maximale treksterkte doet dalen. Verder valt de sterkte na spanningsarm gloeien in een nauwere bandbreedte en neemt de invloed van energiedichtheid op de sterkte in het bereik van 17.5 - 23.5 J/mm³ ook af. Daarentegen is de afhankelijkheid van sterkte van printoriëntatie min of meer hetzelfde voor onbehandeld en spanningsarm gegloeid materiaal.

De rek bij breuk en impactsterkte stijgen ten gevolge van spanningsarm gloeien. Daarbij neemt de spreiding van de resultaten ook toe, met name van de rek bij breuk. Tevens neemt de invloed van de energiedichtheid op de rek bij breuk toe na spanningsarmen gloeien. Het materiaal wordt dus taaier, hoewel de weerstand tegen breuk minder reproduceerbaar wordt en sterker afhankelijk is van de in het printproces gebruikte energiedichtheid.

De Young's modulus blijkt lager te zijn na spanningsarm gloeien, hoewel dit verschil alleen significant was bij het bouwplatform dat een 2^e keer is nabehandeld. Mogelijk is dit verschil dan ook een gevolg van het verschil in thermische historie van de twee proefreeksen.



Op basis van de gevonden resultaten kan de engineer de materiaaleigenschappen sturen in de door hem gewenste richting, door wel of geen gebruik te maken van een warmtenabehandeling. Hierbij moet men zich realiseren dat een nabehandeling relatief goedkoop is ten opzichte van het printproces. De taaiheid kan, indien noodzakelijk, dus verhoogd worden met een warmtenabehandeling. Is er vooral behoefte aan een consistente in plaats van een hoge treksterkte, dan wordt op basis van dit onderzoek aanbevolen ook een warmtebehandeling toe te passen.

Verder wordt aanbevolen om onderzoek te verrichten naar de invloed van temperatuur, tijd, opwarm- en afkoelsnelheden op de mechanische eigenschappen van LPBF-geprint AlSi10Mg.



6. Vermoeiingseigenschappen van aluminium LPBF producten

Metaalmoeheid is het bezwijken van het materiaal doordat het veelvuldig wisselend of dynamisch wordt belast. Metaalmoeheid kan leiden tot breuk, ook wanneer de spanningen (in theorie) nooit groter zijn geweest dan de rekgrens. Dit wordt veroorzaakt doordat de spanning op specifieke plekken in het materiaal heel hoog kunnen oplopen door onder andere een ruw oppervlak, kerven of holtes (porositeit). Als de vermoeiingseigenschappen van metaal niet goed worden ingeschat dan kan dit enerzijds leiden tot het voortijdig falen van het product of anderzijds tot te zware dimensionering van producten.

LPBF geprinte producten hebben andere vermoeiingseigenschappen dan producten die zijn vervaardigd met conventionele maaktechnieken. Het printproces resulteert namelijk in producten met andere eigenschappen die direct invloed hebben op de vermoeiingseigenschappen van het materiaal, zoals de ruwheid van het oppervlak, de porositeit en de thermische spanningen. Voor een optimaal ontwerp is het belangrijk om relevante kennis te hebben van vermoeiingseigenschappen van geprinte producten. Om deze reden is een praktijkonderzoek uitgevoerd dat is gericht op de vermoeiing van met LPBF geprinte producten.

6.1. 3D-metaalprinten en metaalmoeheid

In deze paragraaf wordt informatie gepresenteerd over de wijze waarop metaalmoeheid optreedt, de aandachtspunten bij 3D-metaalprinten en eerder uitgevoerd onderzoek naar metaalmoeheid bij 3Dmetaalprinten. Vermoeiing van metalen verloopt in drie fasen:

- 1. Scheurinitiatie: de vorming van een scheur in het materiaal door een spanning die op het materiaal werkt. Dit begint op plekken waar een verhoogde spanning optreedt in een product, bijvoorbeeld door kerfwerking (imperfecties in het materiaal), holtes of porositeit.
- 2. Stabiele scheurgroei: door de spanningen in het materiaal verandert de kristalstructuur van het metaal, wat leidt tot kleine scheuren in het materiaal. De scheuren worden steeds groter en vormen zo het begin van een breuk.
- 3. Falen (terminatie): doordat de scheurgroei toeneemt, wordt het oppervlak dat de spanning kan opnemen steeds kleiner. Zo komt er een steeds groter wordende brosse breuk in het metaal.



Figuur 6.1 - Links: schematische weergave van vermoeiing [18]. Scheurinitiatie is bij zone 1, de stabiele scheurgroei bij zones 2, 3 en 4, en falen bij zone 5. Rechts een voorbeeld van een gefaald product, met gemarkeerd 1. de scheurinitiatie, 2. scheurgroeizone en 3. breukzone (falen) [18].



Figuur 6.2 - Links: defecten in een LPBF product, a en b tonen porositeit (gas insluiting), c en d tonen niet volledige samensmelting van het metaalpoeder [19]. Rechts een schematische weergave van het staircase effect, de rode lijn toont de beoogde geometrie, maar de werkelijke geometrie is getrapt door het LPBF-proces [20].

Scheuren in het materiaal beginnen meestal op plekken waar een verhoogde spanning, veroorzaakt door defecten, aanwezig is. In figuur 6.1 is zichtbaar hoe deze scheuren ontstaan en in figuur 6.2 zijn verschillende defecten zichtbaar. Bij LPBF ontstaan veel van deze lokaal verhoogde spanningen, door verschillende oorzaken: de eerste oorzaak is het ruwe oppervlak van geprinte producten [21, 22]. Deze producten hebben een ruw oppervlak omdat het product is gevormd door poeder; de korrelvormige structuur van het gesmolten poeder vormt het oppervlak. Een tweede oorzaak waardoor scheuren kunnen ontstaan: geprinte producten hebben vaak scherpe hoeken op schuine vlakken door het 'staircase effect' van de na elkaar geprinte lagen, zoals zichtbaar is in figuur 6.2 [21]. Een derde reden waardoor scheuren ontstaan zijn de holtes of poriën in het materiaal door gasinsluiting of het niet volledig samensmelten van het metaalpoeder. Dit is zichtbaar in figuur 6.2 [19, 23]. Producten gemaakt met kleine metaalpoeder deeltjes (20 μ m) vertonen vaker en grotere defecten dan grotere poederdeeltjes (50 μ m), en daarom neemt de vermoeiing toe met afname van de deeltjesgrootte [24]. Een verklaring voor het feit dat kleine poederdeeltjes meer defecten veroorzaken dan grote geeft de literatuur niet.

Scheurvorming ontstaat meestal op de locatie van een piekspanning. Zodra het materiaal begint te scheuren, neemt deze spanning verder toe. Deze toename in spanning zorgt ervoor dat de scheurgroei versnelt. Scheurgroei van LPFB producten vindt vaak plaats langs de smeltpaden [25-28]. De elasticiteitsmodulus en de hardheid zijn lager op de grens tussen de LPBF lagen, bovendien bevatten deze grenzen meer holtes en smeltfouten. LPBF producten hebben daarom vaak betere vermoeiingseigenschappen in de printrichting dan haaks op de print richting.

In de praktijk krijgt een geprint product meestal eerst een warmtebehandeling om de krimpspanningen in het materiaal te verminderen. Deze warmtebehandeling heeft echter ook een effect op de vermoeiingseigenschappen [23, 28]. Over de consequenties van deze warmtebehandeling is de literatuur niet eenduidig. Zhang. AlSi10Mg is een aluminium legering die silicium bevat; dit materiaal zorgt er onder andere voor dat de smelttemperatuur van het aluminium wordt verlaagd en de vloeibaarheid van het gesmolten metaal wordt verbeterd. Tijdens het printproces er door dit silicium een netwerk gevormd in het metaal dat scheurgroei tegengaat. Maar tijdens een warmtebehandeling (2 uur bij 300 °C) wordt dit netwerk op meerdere plekken verbroken. Zhang et al. vinden in hun onderzoek naar de vermoeiing van AlSi10Mg geprinte samples [23] dat daarmee ook de vermoeiingsterkte van het product afneemt. Brandl et al. hebben ook metaalvermoeiing onderzocht van AlSi10Mg producten die waren geprint met een bouwplatform temperatuur van 30 °C en 300 °C. Daarna kreeg een deel van de proefstukken een warmtebehandeling, zodat het effect van deze behandeling kon worden onderzocht [28]. Bij deze experimenten was er juist een toename van de vermoeiingssterkte door de warmtebehandeling. Deze uitkomst kwam dus niet overeen met de uitkomsten van het onderzoek van





Zhang et al., De auteurs Zhang et al. verklaren deze uitkomsten door een verschil in de spanningsratio R (R = $\sigma_{min}/\sigma_{max}$) bij de proefstukken in de twee experimenten: R = 0.1 bij Brandl et al. en R = -1 bij Zhang et al. Echter, de LPBF proefstukken die eerder zijn onderzocht op vermoeiing hadden allemaal een bewerkt oppervlak [23, 28]. Dit heeft invloed op de uitkomsten, omdat dit een effect heeft op het oppervlak en dus ook op de vermoeiingseigenschappen van het materiaal. Daar komt bij dat veel geprinte producten niet, of niet geheel op deze wijze worden bewerkt na het printen.



Figuur 6.3 - Microscoop afbeeldingen van AlSi10Mg geprinte samples [23]. Links (a): een sample zonder warmtebehandeling, de structuur ten gevolge van het smeltbad is te zien. Rechts (b): een sample na een warmtebehandeling, er is niet langer een duidelijke structuur van het smeltbad zichtbaar.

Samengevat: de vermoeiing verloopt in 3 fasen, scheurinitiatie, scheurgroei en falen. Bij LPBF verhogen een ruw oppervlak, het staircase effect en de poriën mogelijk de kans op scheurvorming. Een scheur groeit sneller haaks op de printrichting dan in de printrichting door de laagopbouw van geprinte producten. Er zijn twee belangrijke onderzoeken uitgevoerd naar het effect van een warmtebehandeling: bij één onderzoek was de vermoeiingsterkte van geprinte producten duidelijk verminderd door de warmtebehandeling. De verklaring was dat het silicium netwerk in de aluminium legering AlSi10Mg werd verbroken door de warmtebehandeling. In het tweede onderzoek nam de vermoeiingsterkte juist toe door de warmtebehandeling. In beide onderzoeken was het oppervlak nabewerkt, wat een directe invloed heeft op de vermoeiingseigenschappen. In de praktijk wordt het oppervlak vaak niet (intensief) bewerkt.

In het onderzoek van het LKT zijn de vermoeiingseigenschappen onderzocht van AlSi10Mg geprint met de EOS M400. Het oppervlak van de samples is niet nabewerkt, dit in tegenstelling tot de in de literatuur gevonden onderzoeken. Bij deze onderzoeken zijn de samples allemaal nagedraaid, zodat ze een glad oppervlak hebben. Bij het onderzoek is een onderscheid gemaakt in de oriëntatie van de producten in de printer en is het effect van een warmtebehandeling onderzocht. Nieuw praktijkgericht onderzoek naar deze effecten kan gebruikt worden om de vermoeiingseigenschappen van geprinte AlSi10Mg producten te verbeteren.

6.2. Vermoeiingsexperimenten

Voor de experimenten is een testmachine (Terco MT205) met een roterende balk gebruikt voor het bepalen van de vermoeiingsterkte. Deze machine is te zien in figuur 6.4. In dit apparaat is een teststaaf (aan de rechterzijde van figuur 6.3) geklemd en met 300 rotaties per minuut geroteerd. Het uiteinde van de staaf wordt op spanning gezet met een veer. Hiermee wordt een wisselende spanning gecreëerd (R = -1). De veerspanning kan worden ingesteld en het aantal rotaties (cycli) tot falen wordt geteld. Deze opstelling is op dezelfde wijze toegepast als bij proeven die worden uitgevoerd conform de ISO-1143:2021 standaard [28, 29].



Figuur 6.4 - Links: Terco MT205 roterende balk vermoeiingstestmachine. Rechts: tekening van het cirkelsymmetrische proefstuk.

Met de EOS M400 zijn proefstukken geprint met een staaf in de print richting (90° hoek met het bouwplatform) en onder een hoek van 45° (Figuur 6.5). Een deel van deze proefstukken heeft een warmtebehandeling van 2 uur bij 300 °C ondergaan. De ruwheid (Rv) van de teststukken is gemeten met een TESA-Rugosurf 10-G, met een bereik van 300 μ m.



Figuur 6.5 - Links: bouwplatform met proefstukken (binnen de rode vierkanten). Rechts: oven voor de warmtenabehandeling.

De spanning bij falen als een functie van het aantal cycli tot breuk staan in figuur 6.6.





Figuur 6.6 - Vermoeiing van LPBF proefstukken. De verticale as is op een lineaire schaal en de horizontale as is op een logaritmische schaal.

Bij alle series is er een logaritmisch verband gemeten tussen de opgelegde spanning en het aantal cycli tot breuk. De 45° proefstukken zonder warmtebehandeling tonen een lagere vermoeiingsterkte dan de overige proefstukken. Dit is niet in overeenstemming met experimenten van Zhang et al. [23]. Mogelijk komt dit verschil in uitkomsten door een verschil in de oppervlakteruwheid van de proefstukken. Bij de experimenten van Zhang et al. was er waarschijnlijk geen verschil in oppervlakteruwheid omdat alle proefstukken na het printen zijn bewerkt (waarschijnlijk met behulp van een draaibank).

	Rv [µm]	Rv [µm]	Rv [µm]
	bovenkant	zijkant	onderkant
45°, zonder warmtebe- handeling	97 ± 7	54 ± 6	Buiten bereik
45°, met warmtebeh andeling	82 ± 7	48 ± 6	109 ± 10
90°, zonder warmtebeh andeling		64 ± 7	
90°, met warmtebeh andeling		63 ± 12	

Figuur 6.7 - Tabel met de gemiddelde ruwheid van de proefstukken.

De tabel in figuur 6.7 toont aan dat er wel degelijk een verschil is in de ruwheid tussen de proefstukken die geprint zijn voor dit onderzoek. Bij alle 45° proefstukken is er een scheurinitiatie aan de ruwste zijde waargenomen. De ruwheid aan de onderkant van de 45° samples is hoog, maar bij deze proefstukken neemt de ruwheid iets af door de warmtebehandeling. De lagere oppervlakteruwheid is een mogelijke verklaring voor een verhoging van de vermoeiingsterkte van de 45° proefstukken. Dit wordt bevestigd door de metingen met de 90° proefstukken. Bij de 90° proefstukken is er geen verschil in vermoeiingsterkte en ook niet in de ruwheid van de proefstukken die wel of niet een warmtebehandeling hebben gekregen. Er zijn nagenoeg geen effecten meetbaar die veroorzaakt zijn door orientatie van de printstukken in de printer; de oppervlakteruwheid en de spreiding hebben een meer significant effect op de uitkomsten.

6.3. Conclusie

Vermoeiing verloopt in 3 fasen: scheurinitiatie, scheurgroei en falen. De literatuur laat zien dat de vermoeiingseigenschappen van LPBF producten afhankelijk zijn van meerdere parameters, waaronder de printoriëntatie, warmtebehandeling, poedergrootte en laagdikte. Dit praktijkonderzoek toont vooral het negatieve effect aan van een hoge oppervlak ruwheid (Rv) op de vermoeiingsterkte. Het effect van de ruwheid is mogelijk zo groot, dat een eventuele invloed van andere factoren niet is waargenomen. Als de oppervlakteruwheid wordt verlaagd heeft dit een positief effect op de vermoeiingssterkte.



7. Het anodiseren van geprint aluminium

Anodiseren is de benaming voor een nabehandeling van aluminium waarbij een elektrochemisch proces wordt gebruikt om een oxidelaag te vormen op het materiaal. De oxidehuid vormt een harde, slijtvaste laag, die het onderliggende aluminium goed beschermt, waardoor het materiaal langer mooi blijft. Het anodiseren kan in verschillende (oxide)laagdiktes. Voor toepassing op binnenlocaties volstaat een laagdikte van 5 - 10 µm. Voor buitenlocaties wordt doorgaans diktes van 15 tot 20 µm aangebracht. Het uiterste, 25 µm, wordt toegepast voor bewerkingen die veel te verduren krijgen van de omgeving. Denk hierbij aan gebruik langs de kust of in industriële omgevingen waar zware chemicaliën gebruikt worden. Bij het anodisatieproces is het mogelijk om het aluminium diverse kleuren mee te geven. De oxidelaag kan dus ook een decoratieve waarde hebben.

Niet geprinte aluminiumlegeringen zijn over het algemeen goed te anodiseren. Voor AM-toepassingen wordt er vooral gebruik gemaakt van de legering AlSi10Mg. Er is een experiment gedaan om te bekijken of deze legering van een anodisatielaag kan worden voorzien. Om de mogelijkheden te onderzoeken, is eerst een literatuurstudie gedaan en vervolgens is een geprint testproduct geanodiseerd.

Literatuurstudie

In twee bestudeerde bronnen is het anodiseren van geprint en gegoten aluminium vergeleken. Het wordt duidelijk dat het kristalrooster van LPBF geprint materiaal anders is dan van gegoten of gewalst aluminium. Dit heeft een significant effect op het anodisatieproces. In het onderzoek van Revilla [30], wordt geconcludeerd dat er in de AM-monsters een dunnere oxidefilm wordt gevormd dan bij gegoten aluminium. De oxidegroeisnelheid in de AM-monsters was veel lager dan in de gegoten legering met ongeveer dezelfde chemische samenstelling. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat in de AM-monsters een groter deel van de anodische lading verbruikt wordt voor de oxidatie van het silicium. In de gegoten legering zijn grote vertakte siliciumstructuren aanwezig, terwijl in het AM-monster het silicium fijner verdeeld is. Door de fijnere verdeling wordt het oxidefront tijdens het anodiseren meer belemmerd door het silicium netwerk.

In een ander onderzoek van Revilla [31], wordt geconcludeerd dat in de smeltbadranden van de AM-monsters een relatief dunne oxidelaag wordt gevormd. Dit wordt veroorzaakt doordat aan de randen het siliciumgehalte iets hoger en de aluminiumconcentratie iets lager is, dan gemiddeld in het AM-monster. Wel blijkt dat in het AM-monster een gladdere oxidelaag met een fijnere celstructuur gerealiseerd wordt t.o.v. het gegoten sample. Röntgen-analyse toont aan dat, in tegenstelling tot de gegoten legering, het meeste silicium in de anodische oxidefilm van de AM-monsters wordt geoxideerd. In de gegoten legering wordt alleen het oppervlakkige silicium geoxideerd. De grote oxidatie van silicium in de AM-materialen resulteert in een verminderde anodisatie-laagdikte in vergelijking met de gegoten legering.

In deze literatuur wordt bevestigd dat het mogelijk is om de AlSi10Mg legering te anodiseren, maar door de beperkte laagdikte kan geen zekerheid gegeven worden dat het product overal corrosiebestendig is.

Experiment

In het kader van dit onderzoek is een experiment uitgevoerd, door een geprint product te anodiseren. Het anodiseren is uitgevoerd door de regionale specialist Hegin metalfinishing in Heerde. Voor het onderzoek is het object blank geanodiseerd, tevens wordt gekeken of het object bij het anodiseren in te kleuren is, zoals ook met veel bestaande aluminiumlegeringen kan.

Resultaat

De legering AlSi10Mg heeft bij het anodiseren een eigen kleur aangenomen, zie figuur 7.1. Deze kleur is te vergelijken met gietijzer. Het aannemen van deze kleur is een bekend fenomeen bij aluminiumgietlegeringen. De legering is bij het anodiseren dus ook niet naar keuze in te kleuren.



Figuur 7.1 Boven, het product zoals deze uit de printer komt. Onder, het resultaat van het (blank) anodiseren van geprint AlSi10Mg.

Hegin Metalfinish geeft aan dat de dikte van de oxidelaag beperkt is en over het oppervlak varieert. Ze kan dan ook niet garanderen dat de aangebrachte laag overal dik genoeg is om het product corrosiebestendig te maken.

Conclusie

Uit het experiment is naar voren gekomen, dat de legering AlSi10Mg geanodiseerd kan worden. Zowel uit de literatuur als uit de uitgevoerde test blijkt echter dat het lastig is een voldoende dikke anodiseerlaag te krijgen. De corrosiebestendigheid kan dan ook niet worden gegarandeerd. Het laagdikteprobleem wordt veroorzaakt door de verdeling van het silicium over het geprinte oppervlak. Verder onderzoek is nodig om te bekijken of het anodiseren van geprint aluminium verbeterd kan worden, in de literatuur zijn daar vooralsnog geen suggesties voor gevonden.



8. Demonstrator: Lichtgewicht grippers voor cobots

Automatisering en robotica krijgen een steeds belangrijkere rol in de Nederlandse maakindustrie. Bijzonder interessant hierbij zijn cobots (colloborative robots), welke dankzij sensoren en beveiligingen niet in een afgesloten kooi hoeven te opereren, maar naast of zelfs samen met mensen taken kunnen uitvoeren. Dit maakt cobots dan ook erg geschikt voor 'pick & place' taken in productie en assemblage.

Helaas kent de veiligheid van cobots ook een keerzijde: de payload (draagcapaciteit) van de meeste cobots is beperkt tot 10 á 15kg, inclusief de End Of Arm Tool (EOAT) of gripper aan de pols van de cobot. Cobots met een grotere payload zijn aanzienlijk duurder dan een kleiner model. Het optimaliseren van het gewicht van de EOAT zou dus tot aanzienlijke kostenbesparingen kunnen leiden, wanneer hiermee wordt voorkomen dat een sterker model cobot vereist is voor de toepassing.

Mogelijk biedt LPBF-printen van aluminium (AlSi10Mg) hier uitkomst vanwege de grote ontwerpvrijheid die de techniek biedt. Hoe zou een lichtgewicht LPBF-geprinte gripper er dan uit kunnen zien? In dit hoofdstuk worden ter inspiratie twee concepten voor EOAT's uitgewerkt aan de hand van verschillende ontwerpmethodieken.

8.1. Uitgangspunten voor ontwerp

Uit gesprekken met projectpartners is gebleken dat toepassingen voor dergelijke EOAT's zeer uiteenlopend kunnen zijn. Daarom is besloten een generiek ontwerp te realiseren dat kennis en inspiratie biedt om een gripper te kunnen ontwerpen voor een specifieke toepassing. Er zijn enkele belangrijke uitgangspunten gedefinieerd:

- Alle producten kunnen van bovenaf opgepakt worden met vacuümzuignappen, mits:
 - Zuignappen worden geselecteerd die geschikt zijn voor zowel harde oppervlakken als in folie verpakte goederen;
 - De onderdruk wordt gegenereerd met gebruik van een hoog debiet zodat ook poreuze materialen kunnen worden opgepakt;
- Niet ieder bedrijf heeft een vacuümpomp, maar hoogstwaarschijnlijk wél persluchtfaciliteiten die gebruik van vacuüm-ejectoren mogelijk maakt. De werking van vacuüm-ejectoren is geïllustreerd in figuur 8.1;
- Alle producten zijn vlak (platen, dozen, behuizingen) óf enkel gekromd (behuizing, buizen) met een diameter van 120 mm of groter;



Figuur 8.1 - Schematische weergave van een vacuüm-ejector. Het blazen van perslucht door een vernauwing (nozzle) naar een uitstroom creëert nabij de vernauwing een lage druk (venturi-effect). Deze onderdruk zorgt voor een aanzuigende werking in de zuignappen (instroom).

Op basis van deze punten zijn de volgende randvoorwaarden opgesteld:

- De gripper gebruikt zuignappen en vacuüm-ejectoren;
- De gripper gebruikt een primair persluchtkanaal voor het genereren van een onderdruk (ejector) en een secundair persluchtkanaal voor het opheffen van de onderdruk (afblazen) ten behoeve van het snel kunnen loslaten van producten;
- Het frame wordt uitgevoerd in LPBF-geprint AlSi10Mg;
- De gripper wordt ontworpen voor montage op de UR5 en UR10e cobot;
- De gripper blijft te allen tijde boven het object en hoeft dus niet het product te kantelen;
- De gripper grijpt aan op een (vanaf bovenaf geprojecteerd) oppervlak dat kleiner is dan 240x160 mm;
- De gripper moet bij hard, niet-poreus materiaal de volgende massa kunnen vasthouden:
 - Vlakke objecten minimaal 3,5kg;
 - Enkel gekromde objecten minimaal 2kg;
- De gripper moet de bovenstaande massa kunnen vasthouden bij acceleraties tot 0,25m/s²;
- De gripper moet zo licht mogelijk zijn en de assemblage aan de pols van de cobot moet in ieder geval minder wegen dan 1kg;
- In het ontwerpproces wordt zo goed mogelijk rekening gehouden om naast hard, niet-poreus materiaal ook in folie verpakte en poreuze materialen vast te kunnen houden;
- De vacuüm-ejectoren worden zo dicht mogelijk bij de zuignappen geplaatst zodat de onderdruk bij de zuignap zich zo snel mogelijk opbouwt.

Verder is gestreefd naar het integreren van verschillende functies in het geprinte frame, te weten:

- Transport van perslucht in het frame, in plaats van externe persluchtleidingen en koppelingen;
- Genereren van onderdruk in het frame, in plaats van externe vacuüm-ejector modules;
- Conformeren naar oppervlak door het frame, in plaats van level compensators of grote balgen aan de zuignappen.

Enkele van de ideeën voor functie-integratie zijn complex. Er is daarom gekozen om niet één, maar twee grippers te ontwerpen: één voor oppakken van vlakke objecten, en één voor het oppakken van zowel vlakke als cilindervormige objecten. Om met de demonstrators zoveel mogelijk kennis op te doen, is tevens gekozen beide grippers te ontwerpen met twee zeer uiteenlopende ontwerproutes:

- Ontwerpen in 'standaard' CAD-software zonder gebruik van simulatiepakketten, door de computer berekende of gegenereerde structuren en verwisselbare vacuüm ejectoren. Deze route wordt toegepast voor de gripper voor vlakke objecten;
- Ontwerpen met Generative Design van hoofdcomponenten, integratie van vacuüm-ejectoren in het frame en gebruik van lattice structuren voor verdere gewichtsbesparing. Deze route wordt toegepast voor de gripper voor enkel gekromde objecten;

8.2. Selectie zuignappen en vacuüm-ejectoren

Omdat het ontwerpen voor LPBF centraal staat, is ervoor gekozen om voor beide ontwerpen uit te gaan van hetzelfde type en aantal zuignappen en dezelfde vacuüm-ejectoren. Het frameontwerp zal worden aangepast aan de beste combinatie van zuignappen en vacuüm-ejectoren.

Aan de hand van het pakket van eisen is als eerst gezocht naar een geschikt type en aantal zuignappen. Daarbij is geschat hoeveel vacuüm de zuignap of zuignappen moeten genereren. Dit is gedaan aan de hand van een theoretisch model van Schmalz [32], een fabrikant van producten voor vacuümautomatisering. De formule en berekening zijn weergegeven in tabel 8.1.

Calculation of theoretical required holding force					
Applied formula: FH = $m \times (g + a/\mu) \times S$					
Cobot movement direction	Vertical	Horizontal	Unit		
Payload mass (m)	3.50		kg		
Gravity (g)	9.81		m/s^2		
Acceleration (a)	0.25		m/s^2		
Friction coefficient (µ)	-	0.5			
Safety factor (S)	2	.00			
Theoretical holding force (FH)	70.4	72.2	N		

Tabel 8.1: Formule voor en berekening van theoretisch vereiste houdkracht van de zuignappen. De formule is afkomstig van een theoretisch model van Schmalz [32] waarin ook informatie te vinden is, die is gebruikt voor de keuze van de frictie-coëfficiënt en safety factor.

Met de diverse toepassingen in gedachten is gekozen voor zuignappen met een modulaire opbouw van het merk PIAB uit de 'piGRIP' serie (figuur 8.2).



Figuur 8-2 - Opbouw PIAB zuignap uit de piGRIP serie

Voor het ontwerp en testen binnen het project is gebruik gemaakt van de volgende configuratie:

- Een lip van het type 'BGI,' welke geschikt is voor harde objecten en zakken;
- Balgen met 1 vouw, welke onregelmatigheden tot enkele millimeters in hoogte kan opvangen;
- Een fitting met uitwendige M10 draad.

In deze configuratie zijn verschillende diameters van de zuignap verkrijgbaar. Aan de hand van het vacuüm volgens datasheets van PIAB [33-38] en de theoretische houdkracht, is berekend hoeveel zuignappen er van elk formaat nodig zijn als alle zuignappen hun gespecificeerde houdkracht halen. Deze gegevens zijn weergegeven in tabel 8.2.

	Vacuum Suction cup diameter						
	pressure	25	34	41	48	63	80
Lifting force (N),	40kPa	5.1	10.3	16.1	22.2	39.9	66.2
Vertical orientation	60kPa	7.4	15.0	23.5	32.4	58.2	96.6
Required number of	40kPa	15	8	5	4	2	2
suction cups*	60kPa	10	5	4	3	2	1

Tabel 8.2: Houdkracht van de PIAB zuignappen (BGI lip, balg met 1 vouw, fitting met M10 uitwendigedraad) volgens datasheets [33-38] en het aantal benodigde zuignappen aan de hand van de houdkrachtuit de datasheets en de geschatte benodigde houdkracht volgens de berekening in tabel 8.1.

Bij de keuze voor zuignappen met kleinere diameters zijn relatief veel zuignappen nodig. Bij grote diameters wordt het voor de draagkracht van de gripper erg belangrijk dat de weinige zuignappen die er zijn, goed aansluiten om hun vacuüm te behalen. De Ø48 mm zuignap blijkt per eenheid opgewekt vacuüm de laagste massa te hebben. Omdat er poreuze materialen opgetild gaan worden of zuignappen mogelijk niet altijd perfect aansluiten, is er uitgegaan van het aantal zuignappen bij 40kPa en is besloten niet de minimale vier, maar zes zuignappen met een diameter van 48 mm te gebruiken.

Vervolgens zijn bijpassende vacuüm-ejectoren geselecteerd. Er is gekozen per zuignap één ejector te gebruiken zodat de ejector en zuignap zo dicht mogelijk bij elkaar gepositioneerd kunnen worden. Er is gekozen om te werken met ejector 'cartridges' zoals weergegeven in figuur 8.3, welke zijn gemaakt voor integratie in een constructie. Dit biedt de mogelijkheid de holte voor de cartridge en eventuele leidingen voor persluchttransport te printen en te gebruiken als dragende delen van het geprinte frame.



Figuur 8.3 - Links: Festo VN-20H vacuüm-ejector cartridge. Rechts: Een dwarsdoorsnede laat zien hoe de cartridge in de constructie verwerkt zit.

De selectie van de ejector is een afweging tussen de benodigde onderdruk en debiet bij de instroom versus het persluchtverbruik. Als uitgangspunt zijn er voor de gripper voor vlakke objecten ejectoren met een nozzle diameter van 0.7 mm op maat ontworpen en SLA-geprint (FormLabs 2, Clear Resin). De ejectoren leveren naar schatting bij een persluchtdruk van 4 bar een onderdruk van 83kPa en een debiet van 9l/min aan de instroom [39]. Om, indien nodig, een ejector met een groter debiet bij de instroom te kunnen aanbrengen, is voor de gripper voor vlakke objecten een formaat holte aangehouden waarin de Festo 'VN' serie ejector cartridges tot een nozzle diameter van 2.0 mm in kan worden aangebracht. Aan de hand van de testresultaten met de gripper voor vlakke objecten wordt bepaald, welke geometrie ejector er voor de gripper voor enkel gekromde objecten wordt gehanteerd en geïntegreerd in het LPBF-geprinte frame.



8.3. Gripper voor vlakke objecten

Nadat het pakket van eisen, het type en aantal zuignappen en het type vacuüm-ejectoren zijn vastgelegd, is een gripper voor vlakke objecten ontworpen. Het ontwerp is gemaakt in CAD-software (SolidWorks) zonder gebruik van simulaties of door de computer berekende of gegenereerde structuren. Vanaf het begin van het ontwerpproces is gelet op de ontwerprichtlijnen voor LPBF [40], om een robuust printproces te creëren met een minimale hoeveelheid supportmateriaal. Op basis van deze richtlijnen en de eigen printervaring zijn de belangrijkste toegepaste productie-gerelateerde richtlijnen:

- Wanddikte \geq 1.5 mm, deze waarde voor gasdichtheid is vastgesteld bij eerder testen;
- Hoogte-wanddikte ratio \leq 8:1;
- Zelfondersteunende wanden \leq 55° overhang ten opzichte van de Z-as; zelfondersteunend houdt in dat er geen support nodig is.
- Zelfondersteunende overbrugging over afstanden \leq 4 mm en bogen \leq Ø12 mm.

Een eerste methode om de massa te beperken is het ontwerpen van een gripper die zo compact mogelijk is. Aangezien er geen eisen zijn gesteld omtrent een minimumformaat van de gripper, is uitgezocht hoe de belangrijkste functionele componenten – de zuignappen, ejectoren en kanalen voor persluchttransport – zo dicht mogelijk op de pols van de cobot konden worden geplaatst. In dit proces is ook gelet op de printoriëntaties van de verschillende productdelen om het gebruik van supportmateriaal en de kans op defecten te minimaliseren.

In figuur 8.4 is afgebeeld waar de zuignappen, injectoren en persluchtleidingen moeten komen ten opzichte van de kop van de cobot (grijs). Op basis van deze positionering moet er een frame ontworpen worden. Er is gekozen voor een cirkelsymmetrische layout voor de zuignappen en ejectoren. Dit maakt het ontwerp gemakkelijk schaalbaar in aantal en diameter van de zuignappen. Door de ejectoren schuin te plaatsen met de uitgang naar buiten kan de pols dicht op de onderzijde van de zuignappen worden gemonteerd. Tegelijk zijn de holtes voor de ejectoren nog steeds zelfondersteunend bij de gekozen hoek, wanneer de onderzijde van de zuignappen parallel aan het bouwplatform staan.

De persluchtleiding voor de ejectoren (rood) is in de vorm van een ring geplaatst tussen de ejectoren en montagepunten aan de pols van de cobot. De persluchtleiding voor afblazen (roze) is hogerop geplaatst om de holtes voor de ejectoren aan de bovenzijde te verbinden. Deze leidingen dienen dus niet alleen maar voor het transporteren van perslucht, maar dragen ook bij aan de sterkte en stijfheid van het frame.



Figuur 8.4 - Positionering van de zuignappen, ejectoren en persluchtleidingen rondom de kop van de cobot (grijs).

Op basis van de positie van de componenten uit figuur 8.4 is een frame ontworpen, dat deze componenten met elkaar verbindt. Bij deze verbindingen zijn de wanddiktes geminimaliseerd en tussen de persluchtringen is een matrixstructuur aangebracht die zorgt voor de benodigde stijfheid. Het CAD-model van het frame, is vanuit meerdere aanzichten weergegeven in figuur 8.5. In dit model zijn nog enkele extra elementen verwerkt, zoals aansluitpunten voor de aanvoer van perslucht en een in hoogte verstelbare kunststofplaat ter stabilisatie van de goederen. De netstructuur tussen de onderste en bovenste persluchtleiding is getekend om de constructie stijver en sterker te maken en dient tevens om zelfondersteunend te printen in plaats van supportmateriaal te gebruiken.



Figuur 8.5 - CAD model van de geassembleerde gripper vanuit meerdere aanzichten.

Het aluminium frame van de gripper heeft een berekende massa van ca. 247 gram. De totale massa van de gripper is berekend op ca. 492g. De bijdrage van individuele componenten is weergegeven in tabel 8.3. Hierbij valt op dat de blindpluggen (gebruikt om de holtes van de ejector cartridges af te sluiten) samen 90 gram wegen. Zouden deze stalen pluggen worden vervangen voor aluminium, dan zou er nog eens 60g massabesparing - meer dan 10% van de totale gripper - gerealiseerd kunnen worden.

Onderdeel	Massa/stuk (g) Aantal	Massa (g)
Frame	246.6	1	246.6
Stabilisatieplaat	11.2	1	11.2
Zuignap (PIAB BGI48-1)	16.7	6	100.2
Ejector cartridge (geprint+o-ringen)	2.9	6	17.4
Blindplug (Festo 3569)	15.0	6	90.0
Persluchtkoppeling (Festo 186109)	10.2	1	10.2
Persluchtkoppeling (Festo 186107)	8.3	1	8.3
Bout (M4x16mm CS)	1.4	6	8.4
	То	tale massa	492.3

Tabel 8.3: Berekening van de massa van de gripper voor vlakke objecten.



In figuur 8.6 is een doorsnede van het frame weergegeven in de gekozen oriëntatie en met de supports waarmee deze is geprint. De voornaamste zichtvlakken hebben geen overhangende delen, waardoor de oppervlakteruwheid lager zal uitvallen. Het product wordt geprint vanaf een brede basis naar een smalle bovenzijde, wat gunstiger is voor het weerstaan van zijdelingse krachten van recoating in het printproces. In de gekozen oriëntatie hoeven alleen de montagepunten voor de cobot, de bovenste persluchtleiding en de uiteinden van de ejector holtes ondersteund te worden, wat resulteert in 23% extra materiaalgebruik in de vorm van support. De geprinte gripper met supports is weergegeven in figuur 8.7.



Figuur 8.6 - Doorsnede van het frame met een weergave van de printoriëntatie en de supports die zijn gebruikt, Het doorgesneden materiaal is in het rood afgebeeld.



Figuur 8.7 - Geprint frame met supports na loszagen van het printbed.
De supports zijn van het frame verwijderd en de print is gereinigd door middel van glasparelstralen. Het poeder in de persluchtleidingen liet zich tijdens dit proces eenvoudig verwijderen. Vervolgens is het frame nabewerkt op de vlakken weergegeven in figuur 8.8. In verband met de doorlooptijd en kosten is ervoor gekozen, de nabewerking uit te voeren met handgereedschap en klein machinegereedschap. Een detailafbeelding van de afwerking is weergegeven in figuur 8.9.



Figuur 8.8 - Vlakken van het frame welke zijn nabewerkt met handgereedschap en klein machinegereedschap.



Figuur 8.9 - Detailafbeelding van nabewerkte montagevlakken en schroefdraden.

Hierna is de gripper geassembleerd en gemonteerd op een UR10e cobot van de Hogeschool Windesheim voor het uitvoeren van enkele testen. In figuur 8.10 is de geassembleerde gripper te zien, en in figuur 8.11 de gripper tijdens testen op de cobot.



Figuur 8.10 - Nabewerkte en geassembleerde gripper.



Figuur 8.11 - Gripper in gebruik tijdens testen van de maximale last bij volledige acceleratie en bewegingssnelheid.

De maximale last van de gripper is bepaald met de in figuur 8.11 weergegeven opstelling, gebruikmakend van een UR10e cobot en een persluchtsysteem met een druk van 6 bar. De proef bestond uit het optillen van het kunststof kist van aan de voorkant van de tafel, het zijdelings verplaatsen naar de hoek van de tafel (linksachter in figuur 8.11), tot stilstand komen, 3 seconden wachten, terug bewegen en de kist terugzetten aan de voorkant van de tafel. Er is gebruik gemaakt van de maximale acceleratie en snelheid van de cobot. Er is stapsgewijs meer ballast onder in de kist geplaatst totdat de beschreven testcyclus niet meer reproduceerbaar plaatsvond en het krat zo nu en dan viel.

Uit de proeven bleek dat de gripper bij maximale acceleratie en snelheid tot en met 5kg succesvol kon optillen en verplaatsen. Dit is 1,5kg meer dan de minimale eis van 3,5kg.



Verder viel op dat het krat de neiging had door te zwaaien bij richtingswisselingen, zoals weergegeven in figuur 8.12. In de meeste gevallen dat het krat viel, gebeurde dit bij een zijdelingse wisseling van richting. Ter indicatie zijn ook tests uitgevoerd bij 25% van de acceleratie en snelheid van de cobot. Bij deze lagere snelheid kon de gripper tot en met 8kg succesvol optillen en verplaatsen.



Figuur 8.12 - Tijdens het testen van de gripper bij maximale acceleratie en snelheid zwaaide de last door.

Verbeterpunt

Verder viel op dat de gripper veel draagkracht verloor op het moment dat één van de zuignappen geen goede aansluiting vond aan het op te pakken object. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het secundaire persluchtkanaal: deze faciliteert een functie om goed sluitende objecten snel los te kunnen laten, maar via dit kanaal staan ook alle zuignappen met elkaar in verbinding. Op het moment dat er één zuignap niet goed aansluit resulteert dit mogelijk in een lek op alle zuignappen. Dit probleem zou kunnen worden verholpen door de opening van het afblaaskanaal te verkleinen of de afblaasfunctie algeheel te verwijderen van de gripper.

8.4. Gripper voor enkel gekromde objecten

Met de kennis van de gripper voor vlakke objecten, is ook een gripper voor enkel gekromde objecten ontworpen. De tweede gripper moet zowel vlakke oppervlakken als positief (convex) enkel gekromde oppervlakken met een diameter \geq 120 mm op kunnen pakken.

De aanpassing aan gekromde oppervlakken zou kunnen worden bereikt door flexibiliteit van het frame of door onderling scharnierende of beweegbare deelcomponenten. AM biedt weliswaar grote mogelijkheden voor ontwerpvrijheid van flexibele mechanismen, maar het brosse karakter van geprint aluminium leent zich hier niet goed voor. Daarom is gekozen voor het ontwerpen van onderling scharnierende deelcomponenten in het frame.

In figuur 8.13 staan dwarsdoorsneden afgebeeld van de geometrie van de scharnieren. De pen en het gat is getekend met het profiel van een diabolo. De overhangende zijde van het gat is afgeschuind zodat een soort druppelvorm ontstaat; de resulterende pen-gat verbinding is zelfondersteunend. Om te voorkomen dat twee delen van het scharnier aan elkaar vast smelten in het printproces, is er speling aangebracht. Bij het printen van testscharnieren met verschillende tussenafstanden bleek een speling van 0,4 mm een goede balans te bieden tussen een scharnier dat soepel draait en het minimaliseren van de speling.





Figuur 8.13 - Vooraanzicht (links) van het scharnier en dwarsdoorsnede vanuit het zijaanzicht (rechts). Het diabolo-profiel van de pen en het gat in combinatie met de druppelvormige afschuining van het gat, maken het scharnier zelfondersteunend. Door het aanbrengen van een speling van 0,4 mm tussen de pen en het gat smelten deze niet aan elkaar.

De conformerende werking van de gripper is weergegeven in figuur 8.14. In de standaardpositie staan de zuignappen parallel aan elkaar voor het oppakken van vlakke objecten. Door de cobot via een drukpunt in het midden van de gripper neer te laten duwen op het product worden vier spiraalveren ingedrukt. Dankzij het scharniersysteem worden de zuignappen naar het enkel gekromde product toegedraaid.



Figuur 8.14 - Schematische weergave van de conformerende werking van de gripper op een buis van Ø125 mm, vooraanzicht.

De UR10e kan een kracht tot 25N opbrengen om het frame te conformeren naar het oppervlak. Een zo laag mogelijke kracht is echter gewenst, omdat compressie van de schroefveren de belasting op de zuignappen verhoogt. Om de belasting te minimaliseren zijn veren geselecteerd met een lage veerconstante (0.35 N/mm) en is de voorspanning instelbaar gemaakt. Op deze manier kan de minimale voorspanning worden ingesteld die nodig is om de armen van de gripper uitgeklapt te houden wanneer er geen product wordt gedragen.

Voor het ontwerp is gebruik gemaakt van hetzelfde type en aantal zuignappen (6x PIAB piGRIP BGI48 met 1 balg) als bij de gripper voor vlakke producten. Ook het aantal en de interne geometrie van de ejectoren (6x ejector van eigen ontwerp met 0.7 mm nozzle) is hetzelfde.

Echter, in tegenstelling tot de gripper voor vlakke objecten zijn de ejectoren niet als cartridges naderhand geplaatst maar in het ontwerp geïntegreerd en meegeprint in het metalen frame. De ejectoren zijn onder een hoek van 45° ten opzichte van de Z-as geplaatst zodat de geometrie zelfondersteunend is, zoals weergegeven in figuur 8.15.

De hoofdcomponenten zijn gegenereerd met behulp van Generative Design van het softwarepakket Fusion 360. Generative Design is een geautomatiseerd iteratief ontwerpproces, waarbij op basis van een aantal opgelegde randvoorwaarden een ontwerp wordt gegenereerd. Randvoorwaarden die aan het Generative Design proces mee kunnen worden gegeven, zijn onder andere preserve bodies en obstacle bodies. Preserve bodies, zijn geometrieën die sowieso aanwezig moeten zijn in het gegenereerde object. In obstacle bodies mag door het proces geen materiaal toegevoegd worden. Via initiële Generative Designs zijn de spanningslijnen in de onderdelen ruwweg in kaart gebracht. Aan de hand hiervan zijn verdere uitgangspunten voor het Generative Design gedefinieerd, waaronder de route van de persluchtleidingen. Aan de hand van deze informatie en zijn nieuwe Generative Designs gegenereerd. Van het ontwerpproces van de arm zijn enkele iteratiestappen weergegeven in figuur 8.16.



Figuur 8.15 - Doorsnede van de geïntegreerde vacuüm-ejectoren. Het doorgesneden materiaal is in het zwart weergegeven.



Figuur 8.16 - Links: Initieel Generative Design. Midden: Route van de persluchtleiding aan de hand van initieel Generative Design. Rechts: Generative Design met nieuwe uitgangspunten, waaronder de persluchtleiding als vaste geometrie en een grotere minimale wanddikte.

In figuur 8.17-links is de invoersituatie van de uiteindelijke arm afgebeeld. In het groen is de geometrie weergegeven die minimaal aanwezig moet zijn (preserve bodies) en in het rood gebieden waar geen materiaal toegevoegd kan worden (obstacle bodies). Er is in verschillende belastingssituaties (load cases) gerekend met belastingen van 250N. Daarbij is een minimale dikte van 3 mm opgelegd voor alle gegenereerde geometrie. In figuur 8.17-rechts is het resultaat afgebeeld, met in het wit de arm en in het rood de obstacle bodies (hierbinnen mag geen materiaal worden geplaatst). De uitvoersituatie is vervolgens verder afgewerkt, bijvoorbeeld door het integreren van de geometrie van de vacuüm-ejectoren. Eenzelfde methode met bijpassende belastingsrichtingen en randvoorwaarden is ook toegepast voor de andere hoofdcomponenten van het frame.



Figuur 8.17 - Links: Invoersituatie van de preserve bodies (groen) en obstacle bodies (rood) waar de laatste iteratie van het Generative Design vanuit is gegaan. Rechts: De resulterende geometrie (wit) en obstacle bodies (rood transparant).

De spacers voor de schroefveren en het drukpunt voor het initiëren van de scharnierende beweging, zijn ontworpen voor SLS-printen uit PA12 en zijn zo licht mogelijk gemaakt door in de software nTopology grote delen van het volume te vervangen voor Voronoi structuren. De kleine scharnierende armen van het metalen frame zijn voorzien van een lattice structuur (body centered cubic) om ook hier massa te besparen. Renders van het eindontwerp zijn weergegeven in figuur 8.18.



Figuur 8.18 - Renders van het eindontwerp van de gripper vanuit meerdere aanzichten.

Het beweegbare frame met geïntegreerde ejectoren heeft een berekende massa van ca. 340g, de totale massa van de gripper is berekend op 605g. De bijdrage van individuele componenten is weergegeven in tabel 8.4. Hierbij valt op dat de slotbouten, moeren en ringen (welke de rechtlijnige beweging in het frame geleiden) een bijdrage van meer dan 80g leveren aan de totale massa. Mogelijk is hier verdere gewichtsbesparing te realiseren.

Onderdeel	Massa/stuk (g) Aantal	Massa (g)
Frame	339.5	1	339.5
Zuignap (PIAB BGI48-1)	16.7	6	100.2
Persluchtkoppeling (Festo 186096)	8.0	2	16.0
Drukpunt	20.7	1	20.7
Bout (M3x12mm BH)	0.7	2	1.4
Schroefveer (Associated #91336)	6.7	4	26.8
Spacer, geleidebus en -pen	4.8	4	19.2
Slotbout+moer+ring (M6x80mm)	20.3	4	81.2
	To	tale massa	605.0

Tabel 8.4 - Berekening van de massa van de gripper voor enkel gekromde objecten.

In figuur 8.19 is het frame weergegeven met supports voor het printproces. Veel van de lichtgewicht structuren zijn niet zelfondersteunend, waardoor er 56% extra volume wordt geprint in de vorm van supportmateriaal. De voorbereiding van de supports duurde meerdere uren als gevolg van de complexe vormen en mesh (6+ miljoen elementen, 300+ MB bestandsformaat).



Figuur 8.19 - Weergave vanuit twee aanzichten van het frame (grijs) met de supports (blauw) welke zijn gebruikt bij het printen van het frame.

Naderhand zijn de supports van het frame verwijderd. Dit duurde aanzienlijk langer dan bij de gripper voor vlakke objecten door de hoeveelheid supports en omdat sommige plekken lastig bereikbaar waren. De gripper is hierna gereinigd door middel van glasparelstralen. Het poeder kon zonder problemen uit de persluchtleidingen worden verwijderd. De gripper is verder nabewerkt, geassembleerd en gemonteerd op een UR10e cobot van de Hogeschool Windesheim voor testen. In figuur 8.20 is de geassembleerde gripper te zien.



Figuur 8.20 - Nabewerkte en geassembleerde gripper.

Tijdens tests is geconstateerd dat het conformerende mechanisme functioneert. Wél zou een lagere benodigde kracht gewenst zijn. Tevens is geconstateerd dat de ejectoren slechts zeer geringe zuigkracht genereren. Producten oppakken was hierdoor niet mogelijk.

Mogelijk kan de hefboomwerking van het scharniermechanisme geoptimaliseerd worden, door de ruwheid van het scharnieroppervlak te verminderen. De ruwheid kan verminderd worden door bijvoorbeeld het printen met dunnere lagen (huidige laagdikte is 90µm). Ook het optimaliseren van de belichtingsparameters zou voor een lagere oppervlakteruwheid kunnen zorgen.

Mogelijk heeft de ruwheid van de print ook een negatieve invloed gehad op de werking van de ejectoren, en zou optimalisatie van het printproces voor lagere ruwheid hier ook voor helpen. Daarnaast zou overwogen kunnen worden in plaats van één kleine ejector per zuignap één grotere ejector per arm te produceren, met de achterliggende gedachte dat bij een grotere ejector de ruwheid relatief gezien kleiner is en daardoor minder effect heeft op de prestaties.

8.5. Conclusies & leerpunten

Uit de ontwerpprocessen van beide grippers zijn veel nieuwe inzichten verkregen ten aanzien van mogelijkheden en 'best practices' voor ontwerp, printen en nabewerking.

Allereerst is met beide grippers duidelijk geworden dat LPBF-geprint aluminium indrukwekkende mogelijkheden biedt om lichtgewicht grippers te maken. Met de gripper voor vlakke objecten is gedemonstreerd dat het goed mogelijk is een gripper te maken die 10x haar eigen massa kan tillen; ruim binnen het gestelde eisenpakket.

De gripper voor enkel gekromde objecten demonstreert dat het mogelijk is om zelfondersteunende, scharnierende elementen te printen als een assemblage, dat zich kan conformeren naar het op te pakken object.



Verder blijkt dat bij LPBF-printen zonder problemen holtes met een grote lengte-diameter verhouding in de constructie kunnen worden geïntegreerd, en lijkt het AlSi10Mg gasdicht bij wanddiktes van ≥1.5 mm bij de gebruikte procesparameters. De geprinte aluminium ejectoren functioneren echter nog niet zoals gewenst. Mogelijk zouden veranderingen in formaat of geometrie van de ejector, optimalisatie van procesparameters en nabewerking de prestaties van geprinte ejectoren verbeteren. Hiervoor is echter vervolgonderzoek nodig.

Op het gebied van ontwerpmethodiek kunnen zowel met een standaard tekenpakket als met Generative Design lichtgewicht grippers worden gerealiseerd. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de handmatig getekende gripper grotendeels zelfondersteunend was, terwijl de met Generative Design ontworpen gripper veel supportmateriaal nodig had. Dit kost zowel tijdens de printvoorbereiding, het printen zelf als bij nabewerking extra tijd. In steeds meer Generative Design en topology optimization pakketten zijn functies beschikbaar die rekening houden met printoriëntatie; dit had kunnen helpen. Als alternatief hadden in het huidige generative design massieve maar dunne wanden tussen de struts van het generative design kunnen worden toegevoegd. Deze wanden zijn onderdeel van het ontwerp en worden na het printen dus niet verwijderd. Het aanbrengen van de wanden kost weinig ontwerptijd, maar is wel zeer effectief in het besparen van tijd in het genereren en naderhand verwijderen van supports. In onderstaand figuur is deze dunne wand toegevoegd.



Figuur 8.21 - Door handmatig toevoegen van dunne wanden aan het Generative Design is de constructie beter zelfondersteunend. Dit bespaart tijd in zowel genereren als naderhand weghalen van supportmateriaal. Een arm van de gripper is afgebeeld als voorbeeld, met links het ontwerp zoals deze is geprint, en rechts het ontwerp met in het geel de toegevoegde wanden. In het blauw is de support weergegeven die nog nodig is. De massa van de arm in de afbeelding is ca. 9% hoger dan zonder de aangebrachte schotten, terwijl er ca. 58% minder supportmateriaal nodig is dankzij de aan het ontwerp toegevoegde schotten.

Tot slot is een belangrijk leerpunt om in het ontwerpproces goed stil te staan bij de gehele productieketen; met name met nabewerking moet vanaf de ontwerpfase rekening worden gehouden. Zo bleek op sommige plekken de toegang voor gereedschap (boren, tappen) lastig. Ook waren er weinig vlakken of elementen waar de frames mee konden worden uitgelijnd of ingeklemd voor nabewerking. Het besteden van aandacht aan deze aspecten in het ontwerpproces zou nabewerking aanzienlijk vergemakkelijken.



9. Demonstrator: deurvergrendeling moffeloven

Het Lectoraat Kunststoftechnologie heeft de beschikking over een moffeloven voor warmtenabehandeling van metaalgeprinte componenten. Bij levering bleek een onderdeel van de deurvergrendeling bij transport te zijn beschadigd, waardoor de machine niet direct in werking kon worden gesteld. Om zo min mogelijk tijd te verliezen in het operationeel krijgen van de faciliteiten is daarom besloten het onderdeel zelf met de EOS M400 te printen.

9.1. Ontwerp

De deurvergrendeling, weergegeven in Figuur 9.1, wordt bediend door middel van twee draaiknoppen, elk bestaande uit een draadeind met een via overmoulding aangebrachte kunststof greep. Het draadeind van één van de knoppen was krom geraakt.



Figuur 9.1 - Links: Bovenaanzicht van onbeschadigde deurvergrendeling. Rechts: Beschadigde deurvergrendeling.

Omdat de knoppen enige afstand uitsteken ten opzichte van de rest van de oven, is het onderdeel redelijk kwetsbaar. Voor het ontwerp van de metaalgeprinte knop is daarom gekozen voor een modulaire opbouw: Het draadeind draait in de knop en de twee delen worden gefixeerd door een moer op het draadeind tegen de knop aan te draaien, zoals weergegeven bij de meest rechter knop in figuur 9.2.

Om de doorlooptijd te minimaliseren is er gelet op het gemak bij productie en nabewerking. Zoals tevens te zien is in de twee meest rechter knoppen in figuur 9.2 is het onderdeel in twee oriëntaties zelfondersteunend, dit houdt in dat de knop geen supportmateriaal nodig heeft als deze rechtop of ondersteboven wordt geprint. Verder heeft de knop open structuren voor gemakkelijke verwijdering van het poeder na het printen. Het gat voor de schroefdraad is zo gedimensioneerd dat voorboren niet noodzakelijk is voordat de schroefdraad erin wordt getapt.





Figuur 9.2 - Ontwerp van de metaalgeprinte knop. De twee meest rechtse knoppen beelden de twee oriëntaties af, waarin de knop zelfondersteunend kan worden geprint.

9.2. Productie & gebruik

Twee knoppen zijn geprint in AlSi10Mg op de EOS M400 van het Lectoraat Kunststoftechnologie. Er is gekozen om de knop te oriënteren met de greep aan de onderzijde (figuur 9.2 volledig rechts). De greep is 4 mm verhoogd en maakt een vaste connectie met het bouwplatform. Deze verhoging gaat weer verloren op het moment dat de knop van het bouwplatform wordt losgezaagd.

Na het printen zijn de knoppen verwijderd van het bouwplatform door middel van een lintzaag en vervolgens zijn de knoppen gereinigd door middel van glasparelstralen. De draad is handmatig getapt zonder voor te boren. Tot slot zijn, met behulp van een stuk draadeind, de knoppen opgespannen in een accuboormachine en zijn de zaagsnede en het greepvlak geschuurd en gepolijst. Hierna is het draadeind aangebracht en zijn de knoppen en de oven in gebruik genomen. Een vergelijking tussen de onafgewerkte en afgewerkte knop is te zien in figuur 9.3, de knop is gemonteerd op de machine weergegeven in figuur 9.4.



Figuur 9.3 - De onafgewerkte draaiknop (links) en de getapte, geschuurde en gepolijste draaiknop (rechts).





Figuur 9.4 - Links: Beide draaiknoppen van de deurvergrendeling gemonteerd op de moffeloven. Boven en Rechts: Close-ups van dezelfde draaiknoppen na montage op de oven.

9.3. Casus voor serieproductie

Door de vorm is de knop zowel rechtop als op de kop uitstekend nestbaar. In combinatie met een vaste verbinding of supportmateriaal is de knop ook uitstekend stapelbaar. Hoewel in dit geval geen grote serie aan producten nodig was, is wel uitgewerkt hoe een dergelijke printjob er uit zou kunnen zien.

In figuur 9.5 is een indeling van een EOS M400 bouwplatform geïllustreerd, waarbij gebruik is gemaakt van 'nesten' en stapelen. Er is een onderlinge afstand gehouden van minimaal 1,9 mm, er is ruimte gehouden voor het verwijderen van de bouten op de hoeken van het bouwplatform en het ophijsen van het bouwplatform uit de printer. In de resulterende printjob zouden 490 knoppen kunnen worden geprint, een job welke ca. 145 uur zou duren; omgerekend ca. 18 minuten productietijd per knop. Als deze knop op een conventionele manier wordt gemaakt, zal dat met 2 bewerkingen gebeuren, eerst draaien en daarna frezen. Daarbij is het niet mogelijk de hoeken van 60 graden van het honingraatstructuur zonder radius de maken. Hoe scherper de hoek moet worden, hoe kleiner de frees moet zijn en hoe langer de bewerking duurt. Het gerenommeerde verspaningsbedrijf Hordal uit Zwolle schat in, dat de bewerkingstijd, met een kleine radius in de honingraadstructuur, een klein half uur per stuk bedraagt.



Figuur 9.5 - Impressie hoe in één printjob op een EOS M400 door middel van nesten en stapelen 490 draaiknoppen kunnen worden geprint, met links een perspectiefafbeelding, rechtsboven een zijaanzicht en rechtsonder een bovenaanzicht.



10. Demonstrator: deurklink superjacht

De Klerk Binnenbouw uit Moordrecht is een bedrijf dat meubilair levert voor superjachten. In hun zoektocht naar innovatieve technieken en ontwerpen was ook een verkenning van de mogelijkheden met LPBF opgenomen. Als demonstrator werd een deurhendel gekozen die alleen met LPBF te vervaardigen moest zijn, waar met name een uniek ontwerp en een luxe uitstraling als randvoorwaarden werden meegegeven. Door middel van een eerste vormstudie, zijn een aantal ideeën gegenereerd. Vervolgens zijn de schetsen als volgt gecategoriseerd (Figuur 10.1):

- 1. Een combinatie van metaal en epoxy (links boven)
- 2. Organische vorm met een inwendige lattice structuur (links onder)
- 3. Organisch vs. geometrisch (rechts boven)
- 4. Generatief of minimalistisch (rechts onder)



Figuur 10.1 - Verschillende vormstudies voor een unieke deurklink.

Tijdens het overleg met De Klerk bleek dat de vorm van de deurhendel wel traditioneel van vorm moest blijven. Uit de schetsen zijn twee opties gekozen die verder worden uitgewerkt. De eerste is een combinatie van een geprinte hoofdvorm, die door middel van epoxy wordt gevuld (zie figuur 10.2). Hierbij is er de mogelijkheid om iets in de deurhendel te verwerken. Denk hierbij aan een miniatuurobject of initialen van de eigenaar van het schip.





Figuur 10.2 – Verschillende aanzichten van de metalen hoofdvorm van een deurklink, die nog met epoxy moet worden gevuld.

Om te ervaren of het gebruik van geautomatiseerde ontwerpsoftware nog tot verrassende ontwerpen kan leiden, is er als tweede optie een deurhendel ontworpen door middel van Generative Design (zie figuur 10.3).



Figuur 10.3 - Deurklink ontwerpen met Generative Design.

Uiteindelijk is gekozen voor een deurklink met een geprinte hoofdvorm die door middel van epoxy wordt ingevuld. Dit concept kan het beste aan de eisen van De Klerk voldoen en geeft daarnaast de beste mogelijkheden om de klink te personaliseren naar wens van de eigenaar.



Op basis van deze keuze zijn twee prototypes gemaakt. De metalen hoofdvormen zijn geprint in AlSi10Mg. Daarnaast zijn er siliconen mallen gemaakt om deze hoofdvorm te vullen met epoxy. In de hoofdvorm is een (willekeurig) miniatuurjacht aangebracht, dat full colour 3D is geprint (Mimaki 3DUJ-553) (figuur 10.4).



Figuur 10.4 - CAD modellen prototypes en miniatuur jacht.

In onderstaande figuur is het prototype weergegeven.





Bij beide concepten zijn de volgende voordelen benut van de productietechniek LPBF:

- Vormvrijheid: dit is terug te zien in de vorm van de metalen delen. Hierin is gespeeld met vormen om uiteindelijk een golvend effect te geven, als verwijzing naar het water in de zee.
- Gepersonaliseerd product: dit product kan voor iedere klant gepersonaliseerd worden. Het miniatuurjacht kan veranderd worden.
- · Conventioneel niet of lastig maakbaar: de concepten zijn conventioneel lastig maakbaar. Niet dat het
- onmogelijk is, maar de hoeveelheid arbeidsuren die ervoor nodig zouden zijn zullen niet rendabel zijn. • Rapid prototyping: door de CAD-software kunnen makkelijk aanpassingen gemaakt worden aan de
- bestaande ontwerpen. Zo kunnen snel nieuwe prototypes gemaakt worden.

Met deze demonstrators heeft De Klerk een goed beeld gekregen van de mogelijkheden om onderdelen van een superjacht te personaliseren met 3D metaalprinten.

De grippers, ovenknop en deurklink zijn demonstrators die de mogelijkheden van de LPBF techniek goed laten zien. De grippers zijn een typisch voorbeeld van lichtgewicht, sterk en stijf construeren. De case van de overknop laat zien dat een ontbrekend of reserve onderdeel relatief snel beschikbaar is met LPBF. Met de deurklink is aangetoond dat je de meest fantastische vormen kunt maken als er behoefte is aan maatwerk op vormgevingsgebied.

Referentielijst

- 1. ANSYS 2021R2 Mechanical User's Guide. 2021.
- 2. Hill, M. and D. Nelson, The Inherent Strain Method For Residual Stress Determination And Its Application To A Long Welded Joint. ASME Press. Vessels Pip., 1999. 318.
- 3. ANSYS 2021R2 Workbench Additive Manufacturing Analysis Guide. 2021.
- 4. Peter, N., et al., Benchmarking build simulation software for laser powder bed fusion of metals. Additive Manufacturing, 2020. 36: p. 101531.
- 5. ANSYS 2021R1 Additive Calibration Guide. 2021.
- 6. Wohlfahrt, M., Building without support? Possibilities and limitations, in LinkedIn Articles. 2019.
- 7. Cooper, K., et al., Contact-Free Support Structures for Part Overhangs in Powder-Bed Metal Additive Manufacturing. 2016.
- 8. ConceptLaser, CL WRX Parameter Training. 2018.
- 9. Noordhuis, F., et al., Kunststoffen in de machinebouw II. 2018.
- 10. EOS, AlSi10Mg Material Data Sheets (Multiple machines). 2021.
- 11. van Abbema, R., T. Stobbe, and G. Heideman, Verkenning van 3D Metaalprint Technologie Selective Laser Melting. 2019.
- 12. Robinson, J.H., et al., The effect of hatch angle rotation on parts manufactured using selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, 2019. 25(2): p. 289-298.
- 13. Shiomi, M., et al., Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process. CIRP Annals, 2004. 53(1): p. 195-198.
- 14. EOS, AlSi10Mg Material Data Sheet FlexLine M400, 90µm. 2018.
- 15. Kleiner, S., et al., Heat Treatment Response of Selectively Laser Melted AlSi10Mg. HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 2020. 75(5): p. 113-127.
- 16. Fiocchi, J., A. Tuissi, and C.A. Biffi, Heat treatment of aluminium alloys produced by laser powder bed fusion: A review. Materials & Design, 2021. 204.
- 17. Kimura, T. and T. Nakamoto, Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting. Materials & Design, 2016. 89: p. 1294-1301.
- 18. Jong, F. de, LARA Engineering, <u>https://sterkteberekening.nl/fatigue-failure-2/</u>
- 19. Ferro, P., et al., Defects as a root cause of fatigue weakening of additively manufactured AlSi10Mg components. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020. 108: p. 102611.
- 20. Abbema, R.v., T. Stobbe, and G. Heideman, Verkenning van 3D metaalprint technologie: Selective Laser Melting. 2019, Lectoraat Kunststoftechnologie.
- 21. du Plessis, A. and S. Beretta, Killer notches: The effect of as-built surface roughness on fatigue failure in AlSi10Mg produced by laser powder bed fusion. Additive Manufacturing, 2020. 35: p. 101424.
- 22. Beretta, S., et al., Fatigue strength assessment of "as built" AlSi10Mg manufactured by LPBF with different build orientations. International Journal of Fatigue, 2020. 139: p. 105737.
- 23. Zhang, C., et al., Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi10Mg. International Journal of Fatigue, 2018. 116: p. 513-522.
- 24. Jian, Z.M., et al., Crack initiation behavior and fatigue performance up to very-high-cycle regime of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting with two powder sizes. International Journal of Fatigue, 2021. 143: p. 106013.
- Xu, Z., A. Liu, and X. Wang, Fatigue performance and crack propagation behavior of selective laser melted AlSi10Mg in 0°, 15°, 45° and 90° building directions. Materials Science and Engineering: A, 2021. 812: p. 141141.
- 26. Xu, Z.W., et al., High cycle fatigue performance of AlSi10mg alloy produced by selective laser melting. Mechanics of Materials, 2020. 148: p. 103499.



- 27. Uzan, N.E., et al., Fatigue of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing selective laser melting (AM-LPBF). Materials Science and Engineering: A, 2017. 704: p. 229-237.
- 28. Brandl, E., et al., Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (LPBF): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. Materials & Design, 2012. 34: p. 159-169.
- 29. ISO, ISO 1143:2021, in Metallic materials Rotating bar bending fatigue testing. 2021.
- 30. Revilla Castillo, R. I., & De Graeve, I. (2017). Challenges on the anodizing of additive manufactured Aluminium alloys. Abstract from Anodize it !, Toulouse, France.
- Revilla, R. I., Terryn, H., & De Graeve, I. (2018). Role of Si in the Anodizing Behavior of Al-Si Alloys: Additive Manufactured and Cast Al-Si10-Mg. Journal of the Electrochemical Society, 165(9), C532-C541. https://doi.org/10.1149/2.1301809jes
- 32. Schmalz. Theoretical Holding Force of a Suction Cup. 2022 [cited 2022 10.06.2022]; Available from: https://www.schmalz.com/en-us/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/system-design-calculation-example/theoretical-holding-force-of-a-suction-cup/.
- 33. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI25S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 34. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI34-2S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 35. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI41-2S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 36. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI48-2S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 37. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI63-2S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 38. PIAB, Datasheet piGRIP G.BGI80S50.B1.S1.MM10M.00 suction cup. 2021.
- 39. Mateboer, T.J., CFD simulaties aan vacuüm-ejectoren, ongepubliceerd werk. 2021.
- 40. Crucible Design, Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). 2015.

Projectpartners

Dit project is uitgevoerd in samenwerking met:





















technologies **added**



AMBITION Deel 2: Optimaliseren van het printproces en de producten bij Laser Powder Bed Fusion

Eindrapportage

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

Deze publicatie is tot stand gekomen voor een onderzoek naar 3D-metaalprinten van 2019 tot 2022. Dit onderzoek is uitgevoerd door onderzoekers, docenten en studenten van Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven. Binnen dit project is onderzoek gedaan naar het optimaliseren van het printproces en de geprinte producten. De volgende onderwerpen zijn in deze rapportage beschreven:

- Simulatie van deformatie van tijdens het printproces`
- Invloed van procesparameters op mechanische eigenschappen
- Printen zonder support
- Invloed warmtebehandeling op mechanische eigenschappen
- Vermoeiingseigenschappen van aluminium producten
 - Het anodiseren van geprint aluminium
- Demonstrators
 - Lichtgewicht grippers voor cobots
 - Deurvergrendeling moffeloven
 - Deurklink superjacht

