

## D2.1 – Aanbod en selectie van printmaterialen

**Project titel:** VIS INSIDE Metal AM  
**Project Type:** Speerpuntcluster-VIS-project  
**Projectduur:** 01/04/2018 – 31/12/2020

Dit project werd mogelijk gemaakt door de steun van het Strategisch Initiatief Materialen (SIM Flandres) en het Vlaams Agentschap voor Innoveren & Ondernemen (Vlaio).

**Projectpartners:** Sirris, CRM, BIL, SIM

**Type document:** project rapport

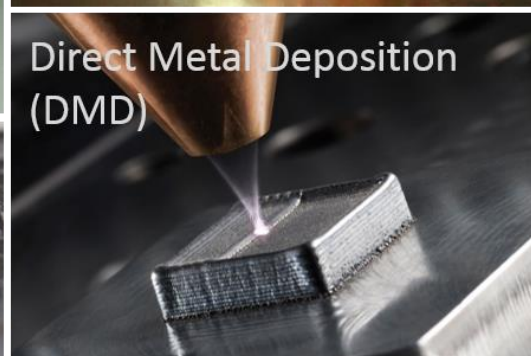
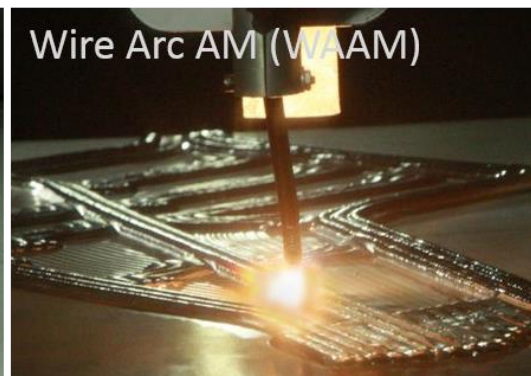
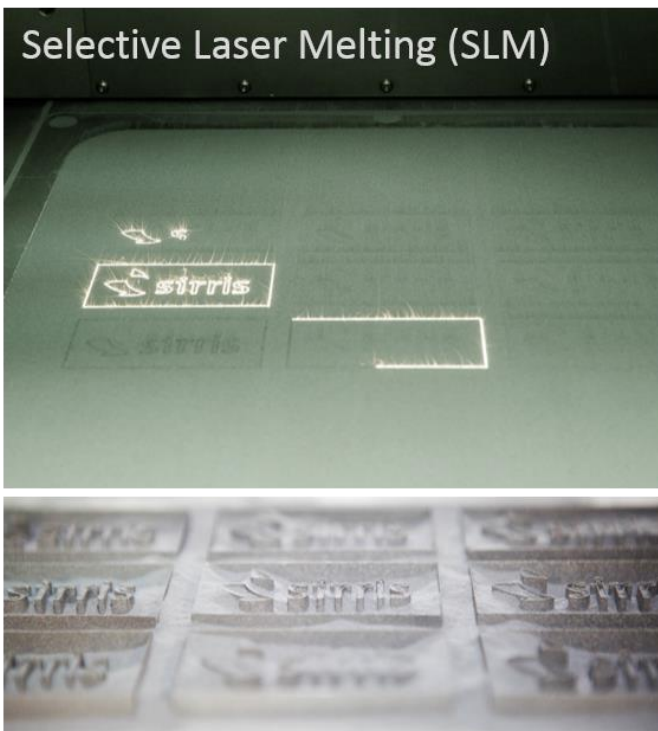
**Versies:** v1.2, 23/06/2020

v1.3, 14/08/2020

**Auteur:** Jeroen Tacq, [jeroen.tacq@sirris.be](mailto:jeroen.tacq@sirris.be), 0493 31 06 44

Een beknopte versie van dit verslag verscheen in Metallerie op 30/06:  
Selectie van printmaterialen en beschikbare staalsoorten – 3d-printen met Metaalpoeders, Metallerie nr. 2005, 30/06/2020.

Meer informatie over dit project kan u terugvinden op: <https://www.sirris.be/node/50468>



## Inhoudstabel

INHOUDSTABEL	2
1 INTRODUCTIE	3
2 MATERIAALSELECTIE	4
2.1 Keuze van de materiaalsamenstelling	4
2.2 Andere aandachtspunten	7
2.2.1 Vorm en deeltjesgrootteverdeling van poeders	7
2.2.2 Vloei van poeder	8
2.2.3 Gasinsluitels in poeder	9
2.2.4 Invloed van proces en machine op finale eigenschappen	10
3 COMMUNICATIE TUSSEN KLANT EN 3D PRINT PRODUCENT	10
4 BESCHIKBARE MATERIALEN	12
4.1 Poeders	12
4.1.1 Poederleveranciers	12
4.1.2 Standaard materialen	13
4.1.3 Nieuwe ontwikkelingen	15
4.2 Draadmateriaal	16
4.3 Kostprijs	17
4.4 Poeders en draad op maat	18
5 HET INSIDE METAL AM PROJECT	19
6 BIBLIOGRAFIE	20

## 1 Introductie

Additive manufacturing (AM), ook gekend als 3D printen, wordt al enkele jaren op grote schaal ingezet voor hoogtechnologische toepassingen in de vliegtuig- en automobielenindustrie en in de medische sector, maar biedt ook veel mogelijkheden voor bredere toepassingen in de industrie. In het project INSIDE Metal AM wordt actief gewerkt aan het onderzoek naar en praktisch ondersteunen van 3D-printen met hogesterkte- en roestvast staal. Beide materiaalklassen worden geëvalueerd voor drie 3D-printtechnologieën: Selective Laser Melting (SLM – poederbed), Laser Metal Deposition (LMD) en Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

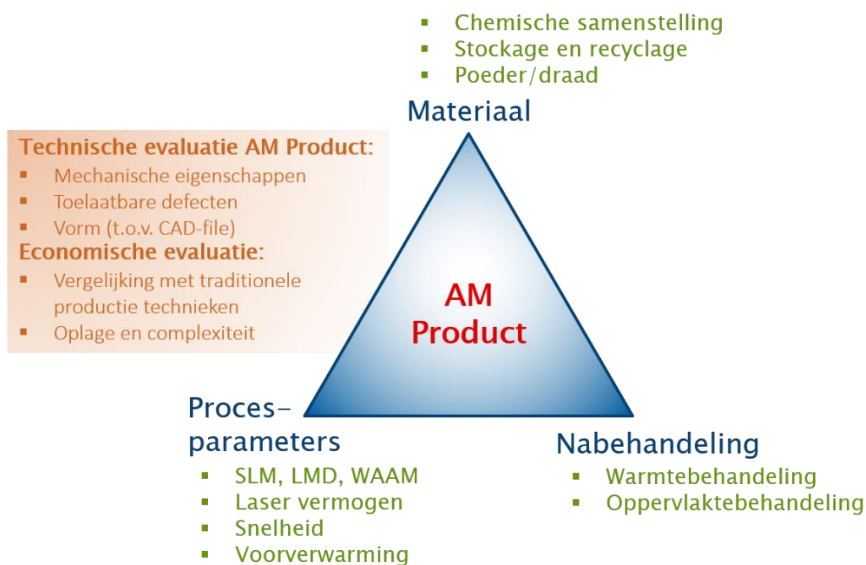
De focus op het 3D-printen van stalen onderdelen is gekozen omdat zich hier een groot potentieel aanbiedt voor het bereiken van een brede doelgroep. Dit voor de productie van onder andere:

- onderdelen voor machinebouw en transportmiddelen, typisch daar waar gewicht, mechanische eigenschappen en complexiteit hand in hand gaan,
- hydraulische componenten, waar druk en temperatuur het ontwerp bepalen,
- productiegereedschappen en tooling (bijv. opspanningen, assemblagehulpmiddelen, grijpers, matrijzen),
- snelle en lokale productie van reserveonderdelen, zodat stilstandtijden verminderd kunnen worden en stock kan afgebouwd worden.

Op basis van bestaande kennis en bijkomend toegepast onderzoek zullen CRM, BIL en Sirris richtlijnen en informatie bronnen creëren die helpen om de keuze te maken tussen productie door AM of traditionele technieken, op basis van zowel technische als economische argumenten.

Daarnaast zullen richtlijnen uitgewerkt worden die moeten toelaten de technische complexiteit van het AM-productieproces te kanaliseren en al vanaf de eerste batch een kwalitatief hoogstaand en certificeerbaar product af te leveren ('first time right'). Hieronder vallen onder andere richtlijnen voor materiaalkeuze, kwaliteitscontrole en certificatie van grondstoffen, keuze van procesparameters en nabehandeling.

In dit rapport wordt stilgestaan bij de moeilijkheden rond materiaalselectie en de aandachtspunten waarmee rekening moet worden gehouden. Daarna wordt een overzicht gegeven van beschikbare materialen en materiaalleveranciers. De mogelijkheid voor het produceren van poeders op maat wordt ook kort toegelicht. Het rapport wordt afgesloten met een overzicht van de materialen die in het project INSIDE Metal AM verder zullen worden onderzocht om de relatie tussen proces parameters, materiaal en nabehandeling in kaart te brengen. Deze inzichten zullen aangewend worden voor de productie van een aantal demonstratie stukken.



Figuur 1: Overzicht van het Additive Manufacturing proces en de projecttaken.

## 2 Materiaalselectie

Er bestaan een heel groot aantal materialen die geschikt zijn voor verschillende 3D print technologieën. Volgens [1] gaat het om meer dan 80.000 materialen. Dit omvat zowel kunststoffen, composieten, metalen en keramische materialen. Voor elk materiaal zijn er een aantal specifieke technologieën die gebruikt kunnen worden om het materiaal additief te vervaardigen. Indien men een bepaalde toepassing voor ogen heeft moet het kiezen voor een bepaald materiaal en een bepaalde technologie vaak gelijktijdig gebeuren. Hiervoor is heel wat kennis rond de beschikbare materialen en technologieën nodig. Dit maakt dat het maken van de beste keuze een niet te onderschatten uitdaging vormt.

Hier focussen we specifiek op staal soorten, waardoor de waaier aan beschikbare materialen voor 3D printen al drastisch gereduceerd wordt. Verder focussen we op de drie technologieën die in Vlaanderen, en bij uitbreiding België het meest gebruikt worden: Selective Laser Melting (SLM), Laser Metal Deposition (LMD), en Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). De eerste twee technologieën maken gebruik van poeder, terwijl WAAM draad als grondstof gebruikt.

### 2.1 Keuze van de materiaalsamenstelling

Keuze van de materiaalsamenstelling wordt in de eerste plaats bepaald door de gewenste eigenschappen van het te printen onderdeel (mechanische eigenschappen, corrosie bestendigheid, bio compatibiliteit, slijtvastheid). Een tweede bepalende factor, die een impact kan hebben op de technische en economische haalbaarheid, is hoe makkelijk of moeilijk het is om een bepaald materiaal te printen (breed of smal venster van procesparameters waarbinnen gewerkt kan worden). Als derde factor dient ook gekeken te worden naar welke mate van ondersteuning men kan krijgen bij de machine leverancier voor de verschillende materiaalsoorten. Vooral bij het poederbed printen kan dit relevant zijn. Het bepalen van de optimale procesparameters kan veel tijd in beslag nemen en is bovendien machine afhankelijk. Indien men van de machine leverancier ondersteuning kan krijgen bij de selectie van de procesparameters, zal dit het ontwikkelingsproces verkorten.

Belangrijk bij het selecteren op basis van materiaaleigenschappen, is dat niet enkel de as-build eigenschappen in rekening gebracht worden, maar dat ook de mogelijke verbetering in eigenschappen door het uitvoeren van nabehandelingen zoals warmtebehandelingen, nitreren, harden, etc. in rekening gebracht wordt (zoals dit ook bij conventionele productietechnieken het geval is). Bij het doornemen van materiaaldocumentatie is het dus van groot belang na te gaan voor welke toestand

van het materiaal de eigenschappen zijn opgegeven. Waarden opgegeven voor de as-build toestand zijn niet noodzakelijk representatief voor de toestand waarin het materiaal uiteindelijk gebruikt zal worden. Warmtebehandelingen, HIP, oppervlakte nabewerking, etc. kunnen allemaal een belangrijke invloed hebben op de eigenschappen. Wanneer materiaolgegevens uit een trektest worden opgegeven, vormt dit wel een goed startpunt om het materiaal te evalueren, maar in specifieke toepassingen waar andere soorten van belasting optreden is de vloeigrens en treksterkte niet altijd voldoende om een correcte uitspraak te kunnen doen over hoe het materiaal zal presteren. Denk bijvoorbeeld aan vermoeiing kritische toepassingen, of toepassingen bij lage temperatuur waar taaiheid een belangrijke rol speelt. Data uit specifieke testen voor het vaststellen van vermoeiingseigenschappen en taaiheid bij de gewenste temperatuur is in dit geval vereist.

Materiaalkeuze voor staal, zeker in SLM, komt op vandaag nog neer uit kiezen tussen een beperkt aantal legeringen. Gezien de kleine verschillen in kostprijs tussen de verschillende staalpoeders in vergelijking met de totale proces kost (enkele 10-tallen euro per kg), is het vaak mogelijk hoogwaardigere legeringen te kiezen dan de legeringen waaruit men het stuk conventioneel zou maken. Belangrijk is om ook andere types van legeringen in overweging te nemen zoals Titanium, Inconel en kobalt gebaseerde legeringen. Deze legeringen zijn per kg een stuk duurder dan ijzer-gebaseerde (factor 5 tot 10), maar voor kleine series en kleine componenten, zal deze extra materiaalkost niet noodzakelijk een grote impact hebben op de kost van de component. De keuze voor een hoogwaardig materiaal en daardoor betere eigenschappen kan vaak gerechtvaardigd worden. Materiaalkost wordt pas doorslaggevend bij productie van grote series of grote componenten, wat voor AM op vandaag nog uitzonderlijk is. Het is dus belangrijker om het beste materiaal te kiezen vanuit het oogpunt van de te verwachten eigenschappen en de voorziene toepassing.

Materiaalselectie omvat typisch drie stappen. De exacte invulling van de verschillende stappen is afhankelijk van de omvang van het selectie probleem en verschillende methodes zijn voorgesteld in de literatuur of opgenomen in commerciële software. Vaak wordt de materiaalselectie en keuze van optimale technologie en type machine gelijktijdig doorgevoerd [3]. Indien we ons hier beperken tot metalen en een beperkte doelgroep van de meest gebruikte AM technologieën (SLM, LMD, WAAM), kan een mogelijke procedure voor materiaalselectie er als volgt uitzien:

**(1) Translation (vertaling van vereisten):** Opstellen van een set te optimaliseren voorwaarden op basis van ontwerp, gekozen productie proces en de functionele eisen waaraan de component moet voldoen (doel, geometrie, mechanische eigenschappen, etc.). Ook het identificeren van vrije variabelen is hier van belang, zodat men duidelijk weet binnen welke ruimte de selectie dient uitgevoerd te worden. Is het bijvoorbeeld strikt noodzakelijk om een ijzer gebaseerde legering te gebruiken? Of zijn de drijvende factoren component kost en mechanische eigenschappen? Een materiaalselectie voor productie m.b.v. Additive Manufacturing zal niet noodzakelijk tot eenzelfde materiaalkeuze leiden als bij conventionele productie.

**(2) Screening:** Screening van alle mogelijke materialen om geschikte kandidaten over te houden (op basis van een set criteria zoals minimale sterkte, maximale kost, toegelaten legeringselementen, printbaar zonder voorverwarmen, etc.). Deze criteria kunnen zowel een vereiste zijn voor de toepassing ('application requirement'), als een beperking opgelegd door de productie route ('Manufacturing Constraint', bijv. doordat een specifieke technologie gebruikt moet worden)<sup>1</sup>. In een eerste screening stap worden de beschikbare materialen afgetoetst aan strikte minimum en maximum waarden voor bijvoorbeeld sterkte, biocompatibiliteit, corrosieweerstand, etc. Alle materialen die niet voldoen, vallen af. In een tweede screening stap, kan de groep van mogelijke materialen verder gereduceerd worden a.d.h.v. een aantal 'performance indices' volgens het principe van Ashby. Hierbij wordt bijvoorbeeld gekeken welke materialen het best scoren voor sterkte per eenheid gewicht. Na

---

<sup>1</sup> Mohammed Alghamdy et al. / Procedia CIRP 84 (2019) 486–490

de screening, wordt een beperkte subset van materialen overgehouden die allen goede kandidaten zijn voor de beoogde toepassing.

**(3) Opstellen van een ranglijst:** Om een finale materiaalkeuze te maken worden de eerder opgestelde optimalisatie voorwaarden (bijv. sterkte per eenheid gewicht, geometrische criteria zoals nodige sectie om een last te kunnen dragen, etc.) gebruikt om de overblijvende materialen een score toe te kennen. Indien er een beperkt set aan materialen is om uit te kiezen (bijv. omwille van beperkingen door de machine leverancier), kan dit proces manueel gebeuren. Het gebruik van beslissingstabellen kan in dit geval een waardevolle keuzehulp bieden. Hierbij wordt aan de verschillende criteria een gewicht toegekend en krijgen alle materialen een score voor ieder criterium.

Voor SLM zijn er relatief weinig materialen voor handen die reeds ondersteund worden door de grote machine producenten. Gezien de hoge kost van het optimaliseren van het gebruik van een nieuw materiaal (enkele maanden studiewerk voor nodig en veel 'trials'), is het aangewezen de materiaalkeuze te beperken tot die materialen die ondersteund zijn. Dit wil zeggen dat met voor staal beperkt is tot een lijst van een 10-tal materiaal soorten. Dit vereenvoudigt de keuze gevoelig. Voor andere technologieën zoals LMD en WAAM is de keuze veel groter. De keuze van materiaal en technologie zijn dus aan elkaar gelinkt.

Wanneer de keuze ruimte relatief beperkt is, bijvoorbeeld omwille van de beschikbaarheid van een bepaalde machine, of de noodzaak om met een ijzer-gebaseerde legering te werken, kan de selectie van de materiaalsamenstelling nog manueel gebeuren aan de hand van de hierboven uitgewerkte stappen. Bij een meer complex selectieprobleem kunnen bestaande materiaalselectie databases en selectie software zoals die van Granta Design gebruikt worden<sup>2</sup>. Daar het aanbod aan beschikbare materialen maand na maand toeneemt, zullen dergelijke databases en software steeds belangrijker worden bij een goed onderbouwde materiaalkeuze. De meest uitgebreide database voor AM materialen is de Senvol databse<sup>3</sup>. De software van Granta Design maakt gebruik van de gegevens in deze database. De grote meerwaarde van de Granta Design software bestaat erin dat ze verschillende methoden, functies en visualisatie mogelijkheden aanreikt om een objectieve en op feiten gebaseerde materiaalkeuze te maken.

Wanneer de finale beslissing voor een bepaalde materiaal samenstelling genomen is, moet men er rekening mee houden dat er een range van toegelaten samenstellingen is voor typische legeringen beschreven in internationale standaarden. Dit betekent dat er kleine variaties in de samenstelling van bijv. een 17-4PH staal kunnen zijn wanneer de ene leverancier met de andere vergeleken wordt. Dit kan leiden tot significante verschillen in de eigenschappen van het materiaal.

In hoofdstuk 4 van dit rapport wordt een beknopt overzicht gegeven van de staal soorten die op dit moment meest gebruikt worden voor 3D printen. In algemene termen wordt aangegeven welke staalsoorten in aanmerking kunnen komen, afhankelijk van de toepassingsvereisten. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van materiaalleveranciers en worden enkele recente ontwikkelingen belicht.

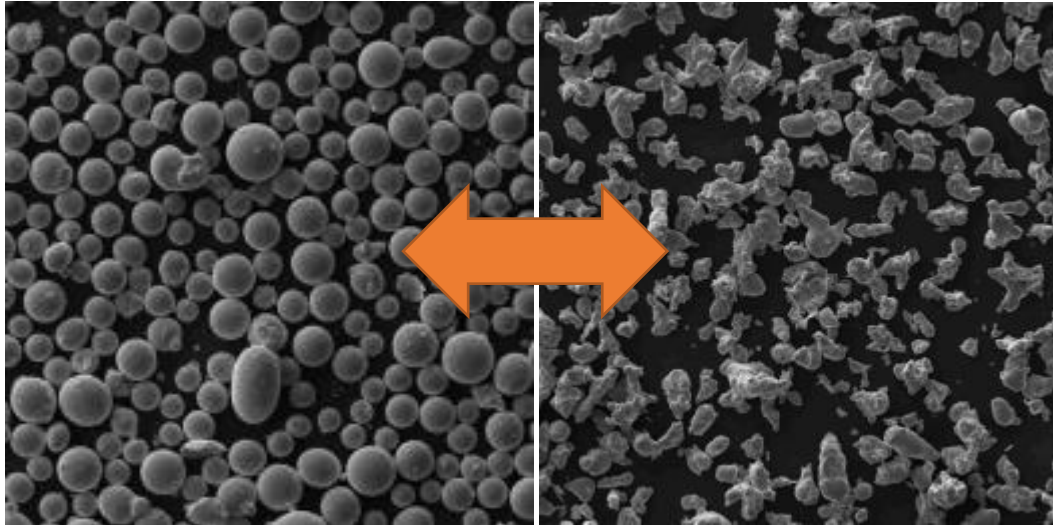
---

<sup>2</sup> <https://grantadesign.com/industry/products/data/applications/additive-manufacturing/>

<sup>3</sup> <http://senvol.com/material-search/>

## 2.2 Andere aandachtspunten

### 2.2.1 Vorm en deeltjesgrootteverdeling van poeders



*Figuur 2: Links, voorbeeld van sferische poederdeeltjes, geproduceerd via gas atomisatie. Rechts, voorbeeld van onregelmatige poederdeeltjes, geproduceerd via water atomisatie.*

Niet enkel de chemische samenstelling maar ook de vorm en deeltjesgrootteverdeling van poeders is van belang. Een typische grootte voor laser gebaseerde poederbed processen is 15-45 $\mu\text{m}$ . Electron beam poederbed processen hanteren een typische grootte van 45-105 $\mu\text{m}$ . LMD werkt typisch met grotere deeltjes omdat het poeder met behulp van een gasstroom naar de laserspot worden gebracht. Typische groottes zijn 45-180 $\mu\text{m}$ , 45-150 $\mu\text{m}$ , 45-105 $\mu\text{m}$  en 53-180 $\mu\text{m}$ . De toegelaten deeltjesgrootte kan afhankelijk zijn van de specifieke machine en dan vooral de gebruikte 'powder nozzle'. Het is belangrijk dat het poeder goed vloeit en een hoge pakking dichtheid heeft. Voor poederbed processen is dit cruciaal om een goede spreiding van de poederdeeltjes te bekomen in iedere laag van het printproces. Bij LMD is een goede vloeï vereist om het poeder uit de silo's (waarin het poeder is opgeslagen) op een gecontroleerde en uniforme wijze tot bij het smeltbad te brengen. Om een goede vloeï te bekomen dienen de deeltjes mooi sferisch te zijn en speelt ook de deeltjesgrootte verdeling een belangrijke rol.

#### **Invloed poeder productieproces**

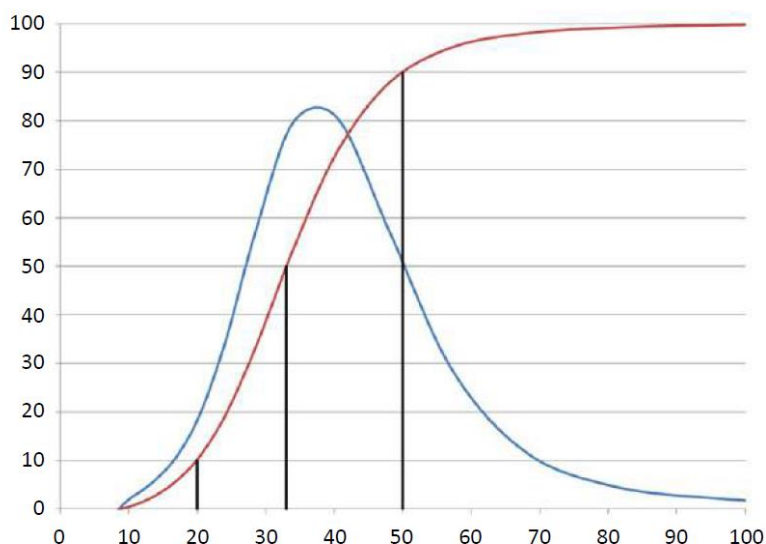
De vorm is in grote mate afhankelijk van het productieproces. De meest toegepaste productieprocessen zijn op vandaag water- en gasatomisatie. Gasatomisatie resulteert in een meer sferische vorm. Wateratomisatie is een goedkoper en sneller proces, maar resulteert in poeders die er uit kunnen zien als koraal [6]. Deze poeders worden vooral gebruikt voor poeder metallurgische processen op basis van persen en sinteren [5]. Voor kritische toepassingen en het vermijden van problemen met uitspreiden van poeder in poederbed processen (SLM) is gas atomisatie een veiligere keuze. Dit is met name het geval voor nieuwe generaties van machines, die sneller werken en daarom ook hogere eisen stellen naar de performantie van poeders [4]. Voor het proces is de eigenlijke vorm van het poeder niet de belangrijkste vereiste, maar de vloeibaarheid. Vaak wordt dan ook niet de vorm opgemeten, maar de vloeï eigenschappen.

Andere productiemethoden zijn 'Induction Melted Bar Atomisation' (EIGA), plasma atomisatie en 'Plasma Rotating Electrode' processen (PREP). EIGA wordt typisch aangewend voor de productie van reactieve poeders (bijv. Ti). Dit is ook het geval bij PREP, die perfect sferische poeders oplevert. Beide processen zijn echter duur en de materiaalkeuze is tot op heden beperkt. Poeder geproduceerd via plasma atomisatie is enkel beschikbaar voor materialen die in draadvorm verkrijgbaar zijn (draad is de grondstof voor dit proces). Bij LMD worden minder eisen gesteld aan de vloeï van het poeder in vergelijking met SLM, waardoor voor LMD processen ook andere poederproductieprocessen kunnen overwogen worden, zoals Ball Milling.

### Deeltjesgrootteverdeling

De deeltjesgrootteverdeling wordt typisch aangegeven in percentielen: D10, D50 en D90. D10 betekent dat 10% van het poeder (op gewichtsbasis) fijner is dan het aantal micron aangegeven bij dit percentiel. D90 betekent dat 10% van het poeder groter is dan het aantal micron aangegeven bij dit percentiel. D50 geeft het midden van de verdeling aan. Vaak wordt een poedergrootte ook aangeduid zoals bijv. 15-45µm. Dit komt dan overeen met D10 >15µm, D50 30-35µm en D90 <45µm.

Het is hierbij belangrijk te beseffen dat de fijnste poederdeeltjes een groot effect kunnen hebben op AM processen. De fijne deeltjes smelten snel in SLM processen, wat een voordeel kan zijn, maar kunnen ook verdampen en leiden tot rookvorming of porositeiten. [5] De vloeieigenschappen worden ook sterk beïnvloed door de fractie kleine deeltjes. Grote deeltjes vloeien over het algemeen beter [6]. Een kleine hoeveelheid kleine deeltjes (<15µm) kan de vloeieigenschappen echter verbeteren, terwijl grotere hoeveelheden kleine deeltjes juist kunnen zorgen voor het blokkeren van de grotere deeltjes en de vloeieigenschappen zodanig kunnen verslechteren dat het poeder niet bruikbaar is voor AM. Vanuit dat oogpunt kan het belangrijk zijn de volledige verdeling te kennen en niet enkel de percentielwaarden. Bovendien toont dit ook aan dat er voor AM een groot verschil is tussen een 15-45µm poeder en een 22-53µm poeder.



Figuur 3: Deeltjesgrootteverdeling met cumulatief volume in het rood en percentage per grootte interval in blauw. De zwarte lijnen duiden op de D10, D50 en D90 waardes (Bron: MAM Summer 2018 [2])

### Vorm

Bolvormigheid (sphericity) wordt typisch berekend als ideale oppervlakte/reële oppervlakte van een deeltje, waarbij de ideale oppervlakte de oppervlakte is die een perfect bolvormig deeltje van eenzelfde volume zou hebben. Een bolvormigheid van één betekent dus een perfecte bol. Deeltjes met een bolvormigheid >0.91 worden typisch als sferisch beschouwd. Andere methoden om bolvormigheid (Shape Factors) te beschrijven zijn de aspect ratio en rondheid (circularity) [6].

#### 2.2.2 Vloei van poeder

Vloei wordt typisch gedefinieerd aan de hand van de Hall Flow methode (ASTM B213), waarbij 50g poeder in een trechter wordt gebracht en de tijd wordt opgemeten die nodig is om al het poeder er doorheen te laten stromen. Een kortere tijd, typisch uitgedrukt in seconden, komt overeen met een betere vloei.

Voor AM is het meten van spreiding (spreading) echter meer representatief, omdat bij AM processen poeder maar zelden door een cirkelvormige opening stroomt. De spreiding kan gekarakteriseerd worden door het opmeten van de rusthoek bij het uitgieten van poeder op een vlak oppervlak (angle



of repose) en cohesie index (cohesive index). Deze laatste drukt uit hoe sterk de interactie is tussen de poederdeeltjes. Verschillende methodes bestaan en worden gebruikt om de cohesie index op te meten. Er bestaat echter geen consensus over welke techniek meest aangewezen. [6] Een voorbeeld ontwikkeld binnen België is de methode van Granutools, waar een cohesie index onder de 30 typisch resulteert in een goede poederspreiding.

De dichtheid van een poeder kan gekarakteriseerd worden via twee parameters: de schijnbare dichtheid (ENG: apparent of bulk density, verkregen door een poeder vrij in een bokaal te laten stromen) en de tap dichtheid, verkregen na vibratie.

De **schijnbare dichtheid** van een poeder is de verhouding van de massa van een ‘untapped powder’ (zonder vibratie of tappen), over het ingenomen volume (inclusief de ruimte tussen de deeltjes). De schijnbare dichtheid is dus afhankelijk van zowel de dichtheid van het materiaal zelf, als de ruimtelijke verdeling van de poederdeeltjes.

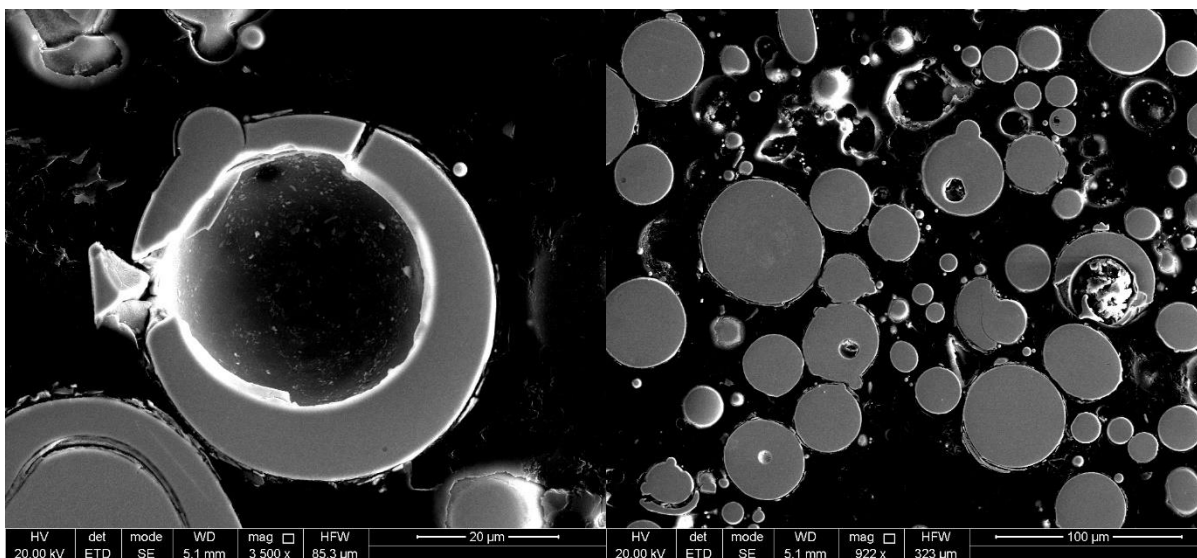
Bij het rapporteren van de **tap dichtheid** wordt vaak ook het ‘characteristic tap number,  $n_{1/2}$ ’ vermeld. Dit komt overeen met het aantal ‘taps’ dat nodig is om de helft van de maximaal bereikbare tap dichtheid te bereiken. De maximaal bereikbare tapdichtheid wordt bepaald door het fitten van een asymptotische functie aan de dichtheid vs. aantal taps curve.

De verhouding tussen de schijnbare en tap dichtheid, wordt de **Hausner Ratio** genoemd (schijnbare dichtheid/tap dichtheid). Als de schijnbare en de tap dichtheid dicht bij elkaar liggen, zorgt dit voor minder variatie in dichtheid op de bouwplaat, een lage Hausner ratio (dichter bij 1) is dus gewenst voor poederbed processen. [5] Typische waardes voor de Hausner ratio liggen rond 1.2 [14], met waardes boven 1.3 die vaak leiden tot slechte spreiding van het poederbed (uit een concreet voorbeeld voor aluminium poeder). Een waarde onder 1.1 wordt zelden bereikt.

Het belang van poeder vloeï en deeltjesgrootte verdeling wordt gekarakteriseerd door de **‘packing fraction’**. Dit is de ratio van de dichtheid van het poederbed over de dichtheid van een poeder deeltje (i.e. het materiaal zelf).

### 2.2.3 Gasinsluitels in poeder

Wanneer poeders geproduceerd worden via gas atomisatie, wat nodig is voor een goede bolvormigheid, kunnen kleine hoeveelheden gas ingesloten worden in de poederdeeltjes (dit is inherent aan het proces en een gevolg van de snelle afkoeling van de metaaldruppeltjes). Door de zeer snelle afkoelsnelheden bij 3D printen, kan dit gas niet ontsnappen en wordt ingesloten in de geprinte onderdelen als porositeiten. Voor vermoeïing kritische componenten kan dit een punt voor scheurinitiatie vormen. De hoeveelheid gasinsluitels in poederdeeltjes kan verschillen tussen poeders. Dit kan gecontroleerd worden door met een microscoop op een doorsnede van poederdeeltjes te kijken. In [6] wordt een voorbeeld gegeven met een porositeit van 0.873% in poeder verkregen via gasatomisatie. In poeder geproduceerd via plasma atomisatie komen typisch geen porositeiten voor, doordat de metaaldruppeltjes minder snel afkoelen en de gas insluitels meer kans hebben om te ontsnappen.



Figuur 4: Voorbeeld van gasinsluitsels in poeder geproduceerd via gas atomisatie.

#### 2.2.4 Invloed van proces en machine op finale eigenschappen

De uiteindelijke (mechanische) eigenschappen van een AM materiaal zijn afhankelijk van de finale microstructuur (korrel grootte, fazen, porositeit, etc.). Gerapporteerde waarden voor de eigenschappen zijn vaak het resultaat van een lange optimalisatie van de procesparameters om goede en reproduceerbare eigenschappen te krijgen. Er dient opgemerkt te worden dat het niet altijd vanzelfsprekend is om diezelfde eigenschappen te realiseren in een andere machine of voor een ander onderdeel. De eigenschappen kunnen ook verschillen van punt tot punt in het geproduceerde onderdeel, door verschillen in de thermische geschiedenis. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij de ontwikkeling van kritische componenten. Heel wat onderzoek, zowel bij onderzoekinstellingen als bij bedrijven, spits zich dan ook toe op het accuraat voorspellen van de lokale (verschillen in) eigenschappen, gelinkt aan de geometrie van de component.

Naast de materiaaleigenschappen kan ook het productieproces van het poeder een rol spelen. Bijv. voor 17-4PH. Dit materiaal kan na printen onderworpen worden aan een precipitatie behandeling om de mechanische eigenschappen te verbeteren. Wanneer echter poeder van stikstof-gasatomisatie gebruikt wordt, kan het extra stikstof die hierdoor in het poeder terechtkomt de vorming van de martensiet fase tijdens de warmtebehandeling verhinderen. Het is dan ook belangrijk poeder te kiezen dat via argon-gasatomisatie verkregen is (duurder, vanwege het gebruik van duurder argon gas)<sup>4</sup>.

### 3 Communicatie tussen klant en 3D print producent

Iedere toepassing is uniek en een andere keuze van materiaal en technologie kan zich opdringen afhankelijk van de specifieke eisen van de toepassing. Daarnaast kunnen ook andere elementen een rol spelen, zoals de mogelijkheden van een eventuele voorkeursleverancier van 3D geprinte onderdelen, randvoorwaarden opgelegd door de klant, etc.

Het is aan te raden om voor het kiezen van een materiaal en technologie voor een specifiek onderdeel altijd te starten van de functionele eisen waaraan het onderdeel moet voldoen. Daarnaast wordt een onderdeel vaak ingebouwd in een grotere constructie, wat ook bepaalde eisen met zich mee brengt en een impact kan hebben op de technologische en economische haalbaarheid. Belangrijk is dat klant en leverancier hier onderling duidelijk over communiceren, en weten waar de aandachtspunten liggen. Om hieraan tegemoet te komen, werd een lijst met aandachtspunten/eisen opgesteld. Het behandelen van alle punten op de lijst, zal helpen bij het maken van een geschikte keuze en zal latere problemen vermijden.

<sup>4</sup> Info: Carpenter Additive

Voor alle eisen die bij het overlopen van onderstaande lijst naar boven komen, is het belangrijk na te gaan waar de eis vandaan komt, wat de achterliggende reden is. Zo kan het keuzeveld duidelijk bepaald worden en wordt vermeden dat bepaalde opties a priori worden uitgesloten. Zo kan bijvoorbeeld een ruwheid van 0.2  $\mu$ Ra geëist worden, maar is dit mogelijk niet op alle oppervlakken vereist, of kan de component perfect functioneren met een hogere ruwheid. Echter, als er geëist wordt dat de component eenvoudig met een doek met gereinigd moet kunnen worden, is een lage ruwheid wel belangrijk.

<b>Functionele eigenschappen opgelegd aan de component</b>	
<i>Verwachte mechanische belastingen</i>	Input voor materiaalselectie Input voor mogelijkheden tot design optimalisatie Zowel statische als dynamische belastingen
<i>Omgeving waarin de component functioneert</i>	Input voor materiaalselectie (agressiviteit van de omgeving)
<i>Werkings temperatuur</i>	Input voor materiaalselectie
<i>Bio compatibiliteit</i>	Input voor materiaalselectie
<i>Gewicht</i>	Minimaliseren van het gewicht van een component Materiaalselectie: optimaliseren van bijv. sterke of elektrische geleiding per eenheid gewicht.
<i>Andere materiaaleisen</i>	Elektrische eigenschappen Magnetische eigenschappen Slijtage weerstand Vermoeiingseigenschappen
<b>Functionele oppervlakken van de component</b>	
<i>Aanduiden van de functionele/contact oppervlakken en interface waarmee deze oppervlakken passen/koppelen.</i>	
<i>Maximale oppervlakte ruwheid</i>	Belangrijk voor de selectie van nodige nabehandeling. Mogelijke impact op kostprijs, printstrategie, component design, etc.
<i>Precisie en vorm vereisten, toleranties</i>	Belangrijk voor de selectie van nodige nabehandeling. Mogelijke impact op kostprijs, printstrategie, component design, etc.
<b>Design van de component</b>	
<i>Maximale afmetingen</i>	Nodig voor economische evaluatie (print kost) Input voor mogelijkheden tot design optimalisatie Input voor keuze van print technologie
<i>Assemblage waarin de component geïntegreerd wordt</i>	Input voor mogelijkheden tot design optimalisatie. Om optimaal gebruik te maken van de mogelijkheden van AM, is het mogelijk interessanter om een groter stuk van de assemblage in één stuk te printen.
<i>De totale commerciële waarde van het product/de apparatuur waarin de component wordt ingebouwd</i>	Input voor economische evaluatie
<i>Origineel ontwerp van de component</i>	Is er een 3D CAD bestand voor handen? Werd de component reeds ontworpen voor AM? Kan/mag het originele ontwerp worden aangepast? (Design optimalisatie om optimaal gebruik te maken van de mogelijkheden van AM.)

<i>Geometrie van de component</i>	Aanwezigheid van ondersnijdingen, minimale en maximale wanddiktes, variaties in wanddikte, massiviteit van de component. Mogelijk impact op printbaarheid, print strategie, print oriëntatie, materiaalkeuze, etc.
<i>Functionaliteit van de component vs. esthetiek</i>	Moet de component er enkel goed uitzien, functioneren én er goed uit zien, enkel goed functioneren.
<b>Levenscyclus van de component</b>	
<i>Verwachte serie en batch grootte over de product levensduur</i>	Input voor economische evaluatie Input voor materiaal en technologie keuze
<i>Vereisten op vlak van recycleerbaarheid</i>	Input voor materiaalkeuze Input voor design

## 4 Beschikbare materialen

### 4.1 Poeders

#### 4.1.1 Poederleveranciers

De markt voor metaal poeders is een snel veranderende markt. Er is een groot aanbod aan poeder leveranciers. Er lijkt zich echter een zekere consolidatie uit te rollen, waarbij grote spelers kleinere niche spelers met een sterke kennis van zaken overnemen. In Tabel 1 is een overzicht gegeven van enkele van de meest gekende spelers op de markt.

Tabel 1: Overzicht van poederleveranciers.

Leverancier	Legeringstypes	Land
<b>3D Systems</b>	Al, Ti, Ni, CoCr, Steels	US, BE
<b>American elements</b>	All	US
<b>AP&amp;C</b>	Al, Ti, Ni	CA
<b>AMA</b>	All	F
<b>Carpenter Additive</b>	Al, Ti, Ni, CoCr, Steels	USA
<b>Concept Laser</b>	Al, Ti, Ni, CoCr, Steels	D
<b>Durum</b>	W-based	D
<b>Ecka Granules</b>	Cu, Al, Zn	D
<b>EOS</b>	Al, Ti, Ni, CoCr, Steels, Cu, W	D
<b>Erasteel</b>	Ni, Co, Cu, Steels	F
<b>Espi Metal</b>	Zuivere metalen	USA
<b>GKN Additive Materials</b>	Ti, Ni, Al, Cu, Steels	Global
<b>Hoganas</b>	Steel	SE
<b>Kennametal/Deloro</b>	Co and Ni based	F
<b>LSN Diffusion</b>	Ni, Co, Fe	UK
<b>MTI</b>	All	CN
<b>Metals4Printing</b>	All	D
<b>Metalisys</b>	Ti, Al, Ta, HEAs	UK
<b>NanoSteel (Rhode Island, USA)</b>	Steel	US
<b>Oerlikon</b>	Ni, Co, Fe, Ti	CH
<b>Orbix</b>	Steel	BE
<b>Powder alloy</b>	Al, Steel, Inco	US
<b>Phoenix Scientific Industries</b>	Al, Ni, Cr, Bi, Cu, Co, Au, Ag, Fe, Mg, Sn	UK

<b>Praxair</b>	Co, Fe, Ni, Ti	US
<b>Renishaw</b>	Ti, Al, CoCr, Ni, Steel	Global
<b>Rijdam</b>	W, Co	NL
<b>Sandvik Osprey</b>	All	UK
<b>SLM Solutions</b>	Al, Ni, Ti, Co, Fe, Cu	D
<b>TLS Technik</b>	Al, Ni, Cr, Nb, V, Steel, Cu	D
<b>Voestalpine/Böhler AMPO</b>	Ni, Ti, Steels	D

#### 4.1.2 Standaard materialen

Het aanbod standaard staalsoorten dat in poedervorm verkrijgbaar is voor Additive Manufacturing is tot op heden relatief beperkt, zeker in vergelijking met de grote weelde aan staalsoorten die als plaat, cilinder en allerhande profielen te verkrijgen zijn. Dit komt door de in vergelijking kleine vraag naar staalpoeder enerzijds en de kostprijs van het productieproces anderzijds. De staalsoort die op vandaag bij voorsprong het meest gebruikt wordt voor 3D printen is 316L. Andere veel gebruikte staalsoorten voor Additive Manufacturing zijn M300 en 17-4PH. Het is algemeen geweten dat de printbaarheid van staalpoeders goed gekenmerkt wordt door de lasbaarheid (zonder voorverwarming). Een goede printbaarheid wordt verkregen bij poeders met een koolstofequivalent lager dan ongeveer 0.2 wt%. Dit is de reden dat tot op heden vooral poeders met een lage koolstofinhoud gebruikt zijn voor L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion) processen. [15]

**316L** is een austenitisch roestvast staal en heeft zijn populariteit te danken aan zijn goede corrosieweerstand in combinatie met vrij goede mechanische eigenschappen. De 'L' staat voor de 'Laag koolstof' variant van 316, wat de lasbaarheid en ook printbaarheid positief beïnvloed. Van alle courante staalsoorten voor AM, heeft 316L de hoogste weerstand tegen corrosie in diverse milieus. Bovendien is 316L een materiaal wat relatief eenvoudig te printen is en weinig tot geen problemen geeft met scheurvorming. Voor complexe componenten kan dit ervoor zorgen dat de ontwikkelingstijd en kost lager is dan wanneer materialen met betere mechanische eigenschappen gebruikt worden. Omwille van zijn goede bio compatibiliteit en corrosie weerstand kunnen componenten geprint in 316L gebruikt worden voor medische toepassingen en in de voedingsindustrie. Daarnaast wordt 316L ook gebruikt in de automotive, lucht- en ruimtevaartsector.

**M300** is een Maragin staal met een zeer hoge sterkte in combinatie met goede ductiliteit. Daartegenover staat dat M300 geen roestvast staal is. De goede sterkte wordt bekomen na een warmtebehandeling. M300 is goed printbaar, is goed te lassen, en kan goed mechanisch bewerkt worden. M300 wordt gebruikt voor diverse applicaties in de lucht- en ruimtevaart en gereedschapsbouw (tooling). Een voorbeeld hiervan is de toepassing in het printen van matrijzen met ingebouwde koelkanalen.

**17-4PH** is een martensitisch roestvast staal met een hoge sterkte en goede ductiliteit. 17-4PH kan gezien worden als een compromis tussen M300 en 316L, voor toepassingen waar een hogere sterkte vereist is en waar de corrosieweerstand minder mag zijn dan die van 316L, maar beter dan die van M300. De goede mechanische eigenschappen van 17-4PH worden verkregen na het toepassen van een precipitatie warmtebehandeling. De goede eigenschappen worden behouden tot een werktemperatuur van 316°C. **15-5PH** is de ferriet vrije variant van 17-4PH, beide materialen zijn goed printbaar. Het lagere koolstofpercentage zorgt er ook voor dat precipitatie hardende legeringen zoals 17-4PH beter bewerkbaar zijn in vergelijking met M300. 17-4PH is een wijd inzetbaar materiaal met typische toepassingen voor medische instrumenten, lucht- en ruimtevaart, toepassingen in de chemie en petrochemie, papier en algemene metaalbewerking.

**H13** heeft een hoge treksterkte en zeer goede weerstand tegen slijtage. In tegenstelling tot M300 vertoont H13 wel een beperkte corrosieweerstand. In gebruik vertoont H13 een goede weerstand tegen thermische vermoeiing en scheurvorming. Daarentegen is H13 moeilijk om scheurvrij te printen omwille van het hoge percentage koolstof. Hierdoor moeten speciaal uitgeruste printers gebruikt

worden die het poederbed kunnen voorverwarmen (afhankelijk van de toepassing tot 200°C of 500°C). Eventueel is een nabehandeling met heet isostatisch persen (HIP) nodig om eventuele scheuren te sluiten. Dit gereedschapstaal worden vooral gebruikt voor het printen van matrijzen voor extrusie processen, spuitgieten en matrijzen voor aluminium en koper gietwerk.

Tabel 2: Samenstellingen van de meest courante staalsoorten beschikbaar in poedervorm voor 3D printen, aangevuld met enkele recente ontwikkelingen.

Naam	DIN	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Andere
316L	1.4404	<0,03			16,5-18,5	10,0-14,0	2,0-2,5	<0,11	
304 (5)	1.4301	<0,03	0,75	2,0	17,5-19,5	8,0-12,0		0,1	1,0 Cu; 0,04 O; 0,045 P; 0,03 S
H13*	1.2344	0,32-0,45	0,8-1,25	0,2-0,6	4,75-5,5		1,1-1,75		0,75 Ni+Cu; 0,8-1,2 V
M300	1.2709	0,03		0,10		18,0-19,0	4,7-5,2		0,5-0,8 Ti; 0,05-0,15 Al; 8,5-9,5 Co
15-5PH (1)	1.4540	0,07		1,00	14,0-15,5	3,5-5,5		0,10	0,15-0,45 Nb+Ta
17-4PH	1.4542	0,07		1,00	15,0-17,5	3,0-5,0		0,10	0,15-0,45 Nb+Ta
CL 91RW (2)		<0,03	0.3	0.3	12	9.2	1.4		1,6 Al
CX (3)		0,05	<0,4	<0,4	11-13	8,4-10	1,1-1,7		1,2-2 Al
BLDRmetal L-40 (4)		<1		<1	>10,5	<5	<5	<1	<1 Nb+Ta
M789 (6)		<0,02			12,2	<10	<1		<1,0 Ti
M3*	1.3344	1,17-1,27	<0,45	<0,40	3,80-4,50		4,70-5,20		6-7 W; 2,70-3,20 V; <0,3 P; <0,3 S
Invar36 (7)		0,1	0,5	0,5	0,5	35-37			0,5 others

\*Chemical composition for traditional bulk material

(1) Geen ondersteuning door Concept Laser

(2) Specifiek voor Concept Laser

(3) Specifiek voor EOS

(4) Ontwikkeld door Nanosteel, beperkte ondersteuning door machine leveranciers

(5) Beperkte ondersteuning door machine leveranciers, maar vergelijkbaar aan 316L

(6) Ontwikkeld door Böhler, beperkte ondersteuning door machine leveranciers

(7) Specifiek voor SLM Solutions

Tabel 3: Mechanische eigenschappen van de meest courante staalsoorten, beschikbaar in poedervorm voor 3D printen.

Naam	DIN	Vloeigrens [MPa]	Treksterkte [MPa]	Verlenging [%]	Hardheid (As-build)	(As-)	Temp. weerstand [°C]
316L	1.4404	330-375	530-640	63	20 HRC		
H13	1.2344	1500-1650	1500-1900	3-8	52-56 HRC		400
M300/MS1/18-Ni 300	1.2709	1000-1920	1135-1950	3-11	373 HV10 - 52 HRC		400
15-5PH	1.4540	670	1200	14	353 HV10		
17-4PH	1.4542	620-1300	900-1450	10-31	32-46 HRC		316
CL 91RW		1600	1700	> 2	48-50 HRC		
CX		840-1670	1080-1760	7-14	51 HRC		
BLDRmetal L-40		1300-1350	1500-1650	10	50 HRC*		
M789		1760-1810	1780-1880	4-8	50-54 HRC		
Invar36		386-394	487	32-33	150 HV10		280

\*Oppervlakte harden mogelijk tot 74 HRC

In Tabel 2 zijn de samenstellingen gegeven van de meest courante staalsoorten beschikbaar in poedervorm voor 3D printen, aangevuld met enkele recente ontwikkelingen. In Tabel 3 zijn de mechanische eigenschappen weergegeven. Hierin werden enkel deze materialen opgenomen waarvoor de eigenschappen na printen gevonden werden. Deze kunnen in belangrijke mate verschillen van het traditionele bulk materiaal. Voor sommige materialen is een grote range aan eigenschappen opgegeven. Dit komt doordat de eigenschappen sterk kunnen verschillen afhankelijk van de gebruikte machine en de gekozen warmtebehandeling. De gevonden maximum en minimum waarden zijn in de tabel opgenomen. Het is belangrijk op te merken dat producenten van 3D printers slechts voor een aantal van deze materialen ondersteuning bieden. Dit komt door het intensieve ontwikkelingsproces die nodig is voor het bepalen van de ideale proces parameters, de parameter range waarin gewerkt kan worden en de materiaaleigenschappen die bekomen kunnen worden.

Het valt hierbij op dat het standaard aanbod volledig bestaat uit hoog gelegeerde staalsoorten. Tot op vandaag is er geen (significante) markt voor laag gelegeerde staalsoorten, zoals bijv. constructiestaal. Een reden hiervoor is dat de kostprijs van het poeder vooral bepaald wordt door het productieproces en slechts in beperkte mate wordt beïnvloed door de exacte samenstelling. Daardoor kan men voor een toepassing waarvoor traditioneel laag gelegeerde staalsoorten gebruikt zouden worden, bij AM gekozen worden voor een hoogwaardiger alternatief zonder nadelige invloed op de prijs.

Bepaalde leveranciers brachten recent ook laag gelegeerde stalen op de markt in de vorm van AM poeders. Dit kan van belang zijn voor sectoren zoals de automobiel sector, waar serieproductie m.b.v. AM mogelijk wordt en waar een verdere kostenreductie door het gebruik van goedkopere legeringen wel degelijk een impact heeft. Recent bracht bijvoorbeeld GKN Additive Materials ANCORAM 4605 en 20MnCr5 op de markt voor poederbed printen. [7] Deze poeders vertonen ook een zeer goede vloeibaarheid en printbaarheid, waardoor het poederbed printen zeer kosten efficiënt kan worden doorgevoerd (hoog vermogen, scanspeed, weinig falen tijdens opbouwen).

Laag gelegeerde stalen voor gebruik in AM worden verder ontwikkeld. Eén van de voornaamste moeilijkheden bij het gebruik van laag gelegeerde stalen voor AM, is dat deze stalen traditioneel hun sterkte verkrijgen door een hoger koolstof percentage. De hoge afkoelsnelheden in AM processen, zorgen bij de aanwezigheid van een teveel aan koolstof echter vaak voor excessieve scheurvorming en bijgevolg onbruikbare onderdelen. De zoektocht naar alternatieve samenstellingen die zowel de sterkte als printbaarheid waarborgen, zonder een teveel aan koolstof, vormt een belangrijk ontwikkelingsaspect.

Een groot voordeel aan het ontwikkelen van laag gelegeerde staalsoorten is dat het onderdeel producenten in staat stelt de materialen te blijven gebruiken met de voor hen gekende eigenschappen. Daarnaast is er ook het aspect van kostprijs reductie. Echter moet altijd afgewogen worden, in functie van de serie grootte, het volume en de complexiteit van de component of een reductie van de soms geringe materiaalkost (typisch rond de 10% van de totale component, en voor staal mogelijk nog lager) en de printtijd doorweegt t.o.v. het gebruik van meer hoogwaardige materialen. Het feit dat het gebruik van hoogwaardige materialen bij Additive Manufacturing mogelijk wordt (minimaal materiaalgebruik) kan juist een meerwaarde betekenen.

#### 4.1.3 Nieuwe ontwikkelingen

Dankzij het steeds toenemende aantal toepassingen van additive manufacturing met metaal, zowel met staal als andere metalen, worden continu nieuwe eisen gesteld aan de materialen waaruit de componenten geprint worden. Materiaalleveranciers stappen hierin mee en komen op de markt met nieuwe ontwikkelingen. Vaak zijn deze materialen niet langer een één-op-één kopie van de traditionele legeringen, maar wordt de samenstelling speciaal ontwikkeld voor 3D print toepassingen. Dit is een logische volgende stap in het 3D printen, waar tot op heden vooral materialen met dezelfde samenstelling als traditionele bulk producten worden gebruikt. Deze materialen werden echter niet ontwikkeld met het oog op de specifieke thermische cyclus van herhaaldelijk snel opwarmen en

afkoelen die optreed tijdens 3D printen. Door het ontwikkelen van nieuwe materialen die optimaal gebruik maken van de uniciteit van het 3D print proces kunnen betere materiaal eigenschappen gecombineerd worden met een betere printbaarheid.

Carpenter en BMT Aerospace (Oostkamp, België) werkten samen voor de ontwikkeling van een specifieke component luchtvaart component, waarvoor Carpenters gepatenteerde 465<sup>®</sup> legering werd gebruikt. Deze martensitische, precipitatie hardbare legering zou een superieure combinatie van sterkte, taaiheid, corrosieweerstand en tolerantie voor bij AM veel voorkomende microstructurele defecten hebben, in vergelijking met standaard materialen zoals 17-4PH en M300. Carpenters 465<sup>®</sup> zou een 25% hogere treksterkte en slijtageweerstand hebben dan 17-4PH. [8]

Nanosteel ontwikkelde in 2017 het metaal BLDRmetal<sup>™</sup> L-40 om scheurvrije componenten te printen met een hoge hardheid. BLDRmetal<sup>™</sup> L-40 is een oppervlakte hardbaar materiaal dat een hoge hardheid combineert met een goede ductiliteit. Een hardheid van meer dan 70HRC kan bereikt worden aan het oppervlak, met een verlenging van meer dan 10% in de kern. In vergelijking met M300 heeft dit materiaal een betere weerstand tegen thermische vermoeiing en een betere corrosie weerstand. Dit maakt het zeer geschikt voor toepassingen bij hoge temperatuur. De corrosie weerstand van M789, zie verder, is echter nog beter. Het materiaal zou daarnaast makkelijk te printen zijn op standaard commerciële apparatuur. [9]

Cetim (FR) werkt aan de ontwikkeling van het staal 33CrMoV12. Het staal kan een zeer hoge hardheid bereiken door nitreren van het oppervlak en is dan ook gericht op toepassingen waar het oppervlak zwaar belast wordt of waar sprake is van agressieve mechanische slijtage. De drie meest gebruikte stalen in AM kunnen eenvoudig gelast worden door hun lage koolstof percentage (rond de 0.05wt%). 33CrMoV12 kan koolstof percentage tot 0.36wt% hebben, daardoor moet het poederbed verwarmd worden, liefst tot 500°C, waardoor de meeste huidige toestellen niet in staat zijn dit materiaal goed te printen (voorverwarming typisch tot max. 200°C). Een mogelijkheid om rond dit probleem te werken, is een zeer minutieuze bepaling van de beste laser parameters. Dit vormt het onderzoek van Cetim. [10]

M789 is een precipitatiehardbaar, martensitisch roestvaststaal met een hoge hardheid, dat ontwikkeld werd door Böhler. Dit materiaal combineert de goede printbaarheid van maragin staal M300 met de corrosieweerstand van 17-4PH. Dit materiaal is mogelijk een goede kandidaat voor toepassingen waar de mechanische eigenschappen van M300 vereist zijn, maar de corrosieweerstand van 17-4PH. [11] M789 heeft een corrosieweerstand die nog beter is dan die van BLDRmetal<sup>™</sup> L-40, wat M789 beter geschikt maakt voor toepassingen in een corrosief milieu.

## 4.2 Draadmateriaal

Ook draadmateriaal kan gebruikt worden voor AM processen. Binnen dit project worden de mogelijkheden van Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) onderzocht. Door het gebruik van draad, kunnen hogere bouwsnelheden bekomen worden dan met poeder. Er kan gebruik gemaakt worden van conventionele lasdraden, wat het voordeel heeft van een lange ontwikkelingsgeschiedenis en goed ontwikkelde en gecertificeerde productieprocessen. De onderdelen die m.b.v. draadprocessen bekomen worden hebben typisch wel een veel ruwere afwerking en ruimere toleranties, waardoor nabewerking en machineren altijd vereist is. Daartegenover staat dat, door de lagere hoeveelheid oppervlak per eenheid volume, dat massief draadmateriaal veel minder de neiging heeft te oxideren en vocht te absorberen. Draad is daarenboven eenvoudiger om op te slaan en te hanteren, en is beschikbaar als spoel van enkele kg tot bulkverpakking van 500kg.

Het aantal leveranciers van lasdraad, dat speciaal voor WAAM is ontwikkeld, is zeer beperkt. Binnen Europa is het meest uitgebreide aanbod te vinden bij Voestalpine Böhler. Een overzicht van het beschikbare aanbod is weergegeven in Tabel 4. Daarnaast kan voor WAAM ook gebruik gemaakt worden van conventionele lasdraad, waarvoor het aanbod veel uitgebreider is.



De voordelen van specifiek ontwikkelde WAAM Lasdraden zijn o.a. dat deze geoptimaliseerd om draadbreek te voorkomen en homogenere analyse te verkrijgen. Daartegenover staat dat de hogere kostprijs en het gelimiteerd aanbod. Conventionele lasdraden kunnen uit de standaard catalogus gekozen worden, waardoor de keuze veel groter is en de kostprijs gevoelig lager. In Tabel 5 is een overzicht gegeven van enkele soorten conventionele lasdraden die voor WAAM interessant kunnen zijn.

Tabel 4: Overzicht beschikbaar draadmateriaal bij Voestalpine Böhler, specifiek ontwikkeld voor AM.

Product Name	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Rp0,2	Rm	A5	
Böhler 3Dprint AM50	0,10	0,65	1,40	<0,05	<0,05	1,35	>500 MPa	560 - 720 MPa	>18%	low alloyed steel
Böhler 3Dprint AM62	0,10	0,55	1,60	0,25	0,50	0,95	>620 MPa	700 - 890 MPa	>18%	medium alloyed steel
Böhler 3Dprint AM70	0,08	0,60	1,70	0,20	0,50	1,50	>690 MPa	770 - 940 MPa	>17%	medium alloyed steel

Product Name	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	N	
Böhler 3Dprint AM2209	0,025	0,5	1,6	23	3	9	0,14	duplex steel (no heat treatment)
Böhler 3Dprint AM2205	0,025	0,5	1,5	22	3	5	0,15	duplex steel (with solution annealing heat treatment)

Product Name	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	
Böhler 3Dprint AM304L	0,02	0,5	1,7	20		10		standard low carbon austenitic stainless steel
Böhler 3Dprint AM316L	0,02	0,5	1,7	18,5	2,6	12,3		standard low carbon austenitic stainless steel with Molybdenum
Böhler 3Dprint AM174PH	0,03	0,4	0,5	16,5		4,5	3,3	martensitic precipitation-hardening stainless steel
Böhler 3Dprint AM155PH	0,02	0,5	0,5	14,8		4,5	3,3	martensitic precipitation-hardening stainless steel - free of ferrite (aerospace grade)
Böhler 3Dprint AM410NiMo	0,03	0,8	0,7	13	0,5	4,7		martensitic stainless steel
Böhler 3Dprint AM430	0,02	0,5	0,5	18				ferritic stainless steel

Tabel 5: Overzicht van enkele soorten conventionele lasdraad die voor WAAM van toepassing kunnen zijn.

Naam	DIN	Type	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Other
S355	1.1108	Low alloyed	0.1	0.3	1.05					
S460	1.5513	Low alloyed								
S500			0.1	0.65	1.4		1.35			
s620			0.1	0.65	1.55		1.10	0.40		
S700			0.08	0.60	1.7	0.2	1.5	0.5		
S800										
304L	1.4306	Aust stainless	0.02	0.2-0.75	1.6	18.20	10			Cu 10
316L	1.4404	Aust stainless	0.015	0.45	1.6	16.5	12	2.6	0.04	
P22			0.08	0.5	1	2.5		1	0.04	
17-4PH (GP1)	1.4542	Martensitic Stainless	0,02	0.35	0.45	16.3	4.5	0.4	0.25	Cu 3.3
15-5PH (PH1)	1.4540	Martensitic Stainless	0,04	0.65	0.7	15,2	4.5	0.4		Cu 3.2
410		Ferritic stainless	0.01	0.65	0.7	12.2	4.6	0.5		
430		Ferritic stainless	0.07	0.8	0.7	17.5				

### 4.3 Kostprijs

De prijs van staalpoeders ligt typisch in de range van 30-100 euro/kg. Ter vergelijking, de kost voor Ti-6Al-4V poeder ligt in de range van 150-400 euro per kilogram. Hierbij dient echter wel opgemerkt te worden dat de prijs in sterke mate afhankelijk is van de chemische samenstelling, afname

hoeveelheid, de gewenste deeltjesgrootteverdeling en in mindere mate ook van het exacte type staal. In de komende jaren is een daling van de prijs verwacht t.g.v. de groeiende markt en toenemende capaciteit en efficiëntie van poederproductie.

Hoewel de eigenlijke materiaalkost voor het materiaal gebruikt in componenten typisch slechts rond de 10%<sup>5</sup> van de totale kost bedraagt [8], is het wel een belangrijk stock-item, omdat een relatief grote hoeveelheid poeder nodig is voor het vullen van de machines bij L-PBF processen. Voor LMD processen is het dan weer belangrijk om rekening te houden met de efficiëntie van afzetten. Afhankelijk van de gebruikte technologie en gekozen print parameters kan 2 tot 40% van het poeder verloren gaan.

De kost voor staal in draadvorm bedraagt typisch tussen de 5 en 50 euro per kilogram.

#### 4.4 Poeders en draad op maat

Zoals eerder aangehaald, zijn er reeds een aantal off-the-shelf materialen beschikbaar voor 3D printen, dit zowel met staal als andere metalen. Voor sommige toepassingen bieden deze echter geen of geen ideale oplossing, of laten de materialen niet toe om optimaal gebruik te maken van de mogelijkheden van AM. Materialen zullen het best presteren wanneer ze ontwikkeld zijn specifiek voor het gebruikte productie proces. Dit is ook zo voor metaal printen. Wanneer traditionele samenstellingen gebruikt worden, die geoptimaliseerd zijn voor gieten, walsen, smeden of koudvervormen, zullen deze niet optimaal presteren onder de cycli van snelle opwarming, smelten en snelle afkoeling die optreden bij laser poederbed printen. Bestaande poeder materialen zullen ook niet altijd een gewenste combinatie van eigenschappen geven, denk maar aan bio compatibiliteit, hypoallergene eigenschappen, corrosieweerstand, hardheid, taaiheid, etc. Voor specifieke toepassingen kan het daarom nodig zijn nieuwe legeringen te ontwikkelen.

In sommige gevallen is het a-priori duidelijk welke samenstelling men wenst, of is slechts een kleine aanpassing in de samenstelling toegelaten. In dit geval is de range van mogelijke samenstellingen beperkt, en kan door trial-and-error een goeie nieuwe samenstelling bepaald worden. Voor deze gevallen, is het mogelijk kleine hoeveelheden poeder op maat te laten maken en te testen. Een groot voordeel hierbij is dat relatief kleine materiaalhoeveelheden nodig zijn om AM testen uit te voeren, en dat het met kleine atomisatie units ook mogelijk is kleine hoeveelheden poeder te produceren (reeds vanaf enkele kilogrammen). Heel wat bedrijven bieden deze service aan, zoals bijvoorbeeld LPW Technology, Carpenter Additive en Sandvik Osprey. Binnen België is het ook mogelijk om samen te werken met de KU Leuven, departement Materiaalkunde of de UCL, departement Materials and process engineering, die elk een atomisatie unit ter beschikking hebben voor het produceren van kleine hoeveelheden poeder.

Wanneer het niet a-priori duidelijk is welke samenstelling gewenst is, wordt men geconfronteerd met een veel groter probleem. Een poeder kan tegenwoordig typisch geproduceerd worden met een nauwkeurigheid van de elementen tot 0.1%. Kleine verschillen in samenstelling kunnen tot disproportioneel grote veranderingen in eigenschappen leiden. Voor een simpele legering, met drie elementen, betekent dit dat er reeds tot 50.000 samenstellingen kunnen zijn met significante verschillen in eigenschappen. De laatste jaren zijn er gelukkig sterke ontwikkelingen geweest in fysische en fysisch-empirische modellen die, in combinatie met de nodige rekenkracht, toelaten een zeer groot aantal mogelijke samenstellingen te screenen en goede kandidaten voor te stellen die als startpunt kunnen dienen voor verdere ontwikkeling. Zo wordt de ontwikkelingskost drastisch gereduceerd. Een voorbeeld van een bedrijf die een dergelijke service commercieel aanbiedt is OxMet, een spin-off van de universiteit van Oxford. [12]

De hiervoor aangehaald productie van poeders op maat, gaat ervanuit dat gelegeerde poeders gebruikt worden in het printproces. Dit zijn poeders die alle legeringselementen bevatten die in de finale component de juiste samenstelling moeten opleveren. Een andere aanpak is de samenstelling

---

<sup>5</sup> Een andere bron spreekt over 18-30% van de totale productiekost. (<https://www.nano-di.com/blog/2019-additive-manufacturing-cost-drivers-4-key-considerations>)

bijsturen door gebruik te maken van een mengsel van verschillende poeders. Dit zorgt voor een veel grotere flexibiliteit voor het bijsturen van de samenstelling binnen een bepaalde range, wat de kostprijs positief zal beïnvloeden. Om een homogene samenstelling te krijgen in het geprinte onderdeel, is het hierbij van groot belang dat de poeders goed gemengd zijn, en dat de deeltjesgrootte klein is in vergelijking met de verwachte grootte van het smeltbad tijdens het print proces. [13] Hoewel in het beste geval de ontwikkelingstijd gereduceerd kan worden tot enkele weken of maanden, is het duidelijk dat het ontwikkelen van een nieuwe samenstelling niet iets is wat voor één enkele component kan gedaan worden. De voorziene afzetmarkt voor het poeder of de specifieke component moet voldoende groot zijn om de ontwikkelingskost te rechtvaardigen.

Binnen België is het ook mogelijk om draad met een specifieke samenstelling te laten ontwikkelen. Hiervoor kan men contact opnemen met CRM, OCAS en/of Bekaert. Dit is niet enkel van belang voor het ontwikkelen van lasdraden voor WAAM, maar kan ook van nut zijn voor poederproductie processen die draad als grondstof gebruiken.

## 5 Het INSIDE Metal AM project

Op basis van de input van de gebruikersgroep, is binnen het INSIDE Metal AM project gekozen om volgende materialen te onderzoeken:

- Voor SLM: 316L, H13/H11 en 17-4PH.
- Voor LMD: 316L, 17-4PH en M3.
- Voor WAAM: S355, 316L en Duplex 2209.

In eerste instantie worden kleine proefmonsters geprint, zoals kubusjes en munten. Deze worden gebruikt voor het bepalen van de beste print parameters en het onderzoeken van de materiaaleigenschappen. Aan de hand van deze monsters zal ook onderzocht worden wat een geschikte nabehandeling is. Binnen dit project bestaat deze uit een warmtebehandeling voor het optimaliseren van de mechanische eigenschappen en een oppervlakte behandeling om de ruwheid van het oppervlak te reduceren.

Voor het SLM proces, werd deze methode niet gevolgd voor 316L en H13/H11. 316L werd reeds uitgebreid onderzocht en hierover is voldoende informatie reeds voorhanden uit zowel de academische als meer industrieel gerichte literatuur. Het materiaal H13/H11 zal worden onderzocht in samenwerking met VAC Machines en Trumpf.

Het onderzoek voor LMD zal zich vooral toespitsen op 316L en 17-4PH, met een beperkte haalbaarheidsstudie voor M3. Er wordt verwacht dat M3 moeilijker printbaar zal zijn, wegens snelle scheurvorming tijdens het print proces. Binnen dit project zal dit geëvalueerd worden.

De lasdraad die gebruikt zal worden voor WAAM van S355 is gelijkaardig aan S420 materiaal. De lasdraad wordt namelijk iets sterker gekozen, met een verhoogde inhoud van Si en Mn (volgens ISO 14341-A G 42 4 M 3Si1).

Verschiede gegeneraliseerde demonstratoren, aangereikt door de gebruikersgroep van dit project zullen uiteindelijk gerealiseerd worden, waarin de opgebouwde kennis wordt geïllustreerd aan een breder publiek.

Indien u interesse hebt in dit project, vragen of opmerkingen, of indien u meer informatie wenst rond de mogelijkheden die 3D printen u en uw bedrijf kan bieden, aarzel dan niet om contact op te nemen met de auteur van dit rapport.

## 6 Bibliografie

- [1] U.K.u. Zaman et al., *Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 51 (2018) 169–180
- [2] An introduction to metal powders for AM: Manufacturing processes and properties, Metal AM Magazine, Summer 2018
- [3] Mohammed Alghamdy et al. / Procedia CIRP 84 (2019) 486–490
- [4] Optimising metal powders for additive manufacturing properties, MPR September/October 2014, metal-powder.net
- [5] An introduction to metal powders for AM: Manufacturing processes and properties, Metal Additive Manufacturing, Vol. 4 No. 2 pg. 111.
- [6] Understanding metal powder requirements for AM: Views from the industry, Metal Additive Manufacturing, Vol. 5 No. 3 pg. 175
- [7] GKN Additive Materials, <https://www.gknpm.com/en/our-businesses/gkn-additive/am-in-action/low-alloy-steels-for-additive-manufacturing/>, geraadpleegd op 08/01/2020.
- [8] MAM Winter 2019, pg. 97 - From atomisation to analysis: How Carpenter Additive is delivering improved material reliability, economics and quality
- [9] <http://additivemanufacturing.com/2017/06/19/nanosteel-launches-3d-printable-tool-steel/>, geraadpleegd op 03/02/2018.
- [10] <https://www.metal-am.com/cetim-characterises-new-steel-grade-for-laser-powder-bed-fusion-additive-manufacturing/>, geraadpleegd op 24/09/2019.
- [11] Turk, C., Zunko, H., Aumayr, C. et al. Berg Huettenmaenn Monatsh (2019) 164: 112. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-0835-z>
- [12] MAM Winter 2019, pg. 119 - Alloys by Design: The future of materials for Additive Manufacturing
- [13] T. DebRoy et al., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, Progress in Materials Science 92 (2018) 112–224
- [14] Jujie Yan et al., A Comprehensive Study of Steel Powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for Their Selective Laser Melting Additive Manufacturing, Metals 2019, 9, 86; doi:10.3390/met9010086
- [15] C. Turk et al., Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing, Berg Huettenmaenn Monatsh (2019) Vol. 164 (3): 112–116