Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie 2022; 41(1):92-105
South African Journal for Science and Technology 2022; 41(1):92-105
https://doi.org/10.36303/SATNT.2022.41.1.929
Open Access article distributed under the terms of the
Creative Commons License [CC BY-NC 3.0]
http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0

SATNT / SAJST
ISSN: 2222-4173 EISSN: 0254-3486
© 2022 The Author(s)
OORSPRONKLIKE NAVORSING

Laagvervaardiging en beroepsgesondheid in Suid-Afrika: 'n Literatuurstudie

S du Preez,[1] J du Plessis,[1] J Fourie,[2] W du Preez,[3] D de Beer[3]

[1] Beroepshigiëne en -gesondheidsnavorsingsinisiatief (OHHRI), Noordwes-Universiteit, Suid-Afrika
[2] Skool vir Meganiese Ingenieurswese, Noordwes-Universiteit, Suid-Afrika
[3] Sentrum vir Snelprototipering en Vervaardiging, Sentrale Universiteit van Tegnologie, Suid-Afrika
***Korresponderende outeur:** S du Preez **E-pos:** dupreezsonette@nwu.ac.za*

Die doel van hierdie literatuurstudie was om 'n breë oorsig van laagvervaardiging in Suid-Afrika en die beroepsgesondheid risiko's wat geassosieer word met laagvervaardiging te voorsien. Laagvervaardiging is die proses waar materiale laag-vir-laag neergelê word om 'n driedimensionele (3D-) voorwerp te vorm. Volgens internasionaal gestandaardiseerde terminologie bestaan daar sewe standaard laagvervaardiging proseskategorieë tesame met verskeie tegnologieë en materiale. Laagvervaardigingsmateriale is die grondstowwe wat in poeier-, soliede of vloeistofvorm toegevoeg word tot die bou- (produksie-) proses en die gehalte van die finale produk beïnvloed. Wêreldwyd word laagvervaardiging in die produksie van komplekse onderdele in die lugvaart- en motorbedryf sowel as vir die vervaardiging van pasiëntspesifieke mediese prosteses gebruik. Suid-Afrika se eerste laagvervaardigingsmasjien het in 1991 sy debuut gemaak, waarna verskeie Suid-Afrikaanse instansies ook in laagvervaardiging belê het, met die doel om navorsing en ontwikkeling in laagvervaardiging te bevorder. Daar was aanvanklik 'n beperkte opname van die tegnologie, en dit kon toegeskryf word aan die tradisionele vervaardigingsbedryf in Suid-Afrika. Die toename in die gebruik van industriële laagvervaardigingsmasjiene sowel as die gebruik van intreevlak-3D-drukkers vir die algemene gebruiker het eers in die tydperk tussen 2010 tot 2017 plaasgevind. Na gelang hierdie innoverende tegnologie bly vorder, is dit belangrik vir die operateur, d.w.s. beide die ingenieur en die algemene gebruiker van die laagvervaardigingsmasjien, om bewus te wees van potensiële gesondheidsrisiko's wat met hierdie tegnologie geassosieer word.

Sleutelwoorde: snelprototipering; 3D-drukwerk; metaalallooipoeiers; titaan; polimere; beroepsblootstelling; blootstellingsroetes

Layer manufacturing and occupational health in South Africa: A literature study: The purpose of this literature study was to provide a broad overview of additive manufacturing in South Africa and the occupational health risks associated with additive manufacturing. Additive manufacturing is the process where materials are laid down layer by layer to form a three-dimensional (3D) object. According to internationally standardised terminology, there are seven standard additive manufacturing process categories along with various technologies and materials. Additive manufacturing materials consist of the raw materials that can be added in powder, solid or liquid form to the construction (production) process, and they affect the quality of the final product. Globally, additive manufacturing is used for the production of complex parts in the aerospace and automotive industries, as well as for the manufacturing of patient-specific medical prostheses. South Africa's first additive manufacturing machine made its debut in 1991, followed by several South African institutions also investing in additive manufacturing to promote research and development in additive manufacturing. There was initially a limited uptake of the technology, which could be attributed to the traditional manufacturing industry in South Africa. The increase in the use of industrial additive manufacturing machines as well as entry-level 3D printers for the general user only took place in the period between 2010 and 2017. As this innovative technology continues to advance, it is important for the operator, i.e. both the engineer and the general user of additive manufacturing machines, to be aware of potential health risks associated with the use of this technology.

Keywords: rapid prototyping; 3D printing; metal alloy powders; titanium; polymers; occupational exposure; exposure routes

Inleiding

Laagvervaardiging is 'n proses wat materiale laag-vir-laag met mekaar verbind om 'n driedimensionele (3D-) onderdeel vanaf 'n rekenaargesteunde ontwerp deur 'n rekenaargesteunde program te skep (Afshar-Mohajer, et al., 2015; Chen, et al., 2017; ISO/ASTM 2015; Kellens, et al., 2017). Laagvervaardiging is 'n multidissiplinêre veld wat verskeie fasette van die wetenskap, byvoorbeeld chemie, ingenieurswese, die biomediese veld, omgewingsgesondheid en die beroepsgesondheidveld insluit (Bharti & Singh, 2017; Rejeski, et al., 2018). Die laagvervaardigingsproses staan ook as snelprototipering en industriële 3D-drukwerk bekend (Bourell, et al., 2017; Calignano, et al., 2017). Aanvanklik is die term "*rapid prototyping*" of "snelprototipering" gebruik om die vinnige proses van laagvervaardiging te verduidelik (Gibson, et al., 2010), maar ook omdat dit aanvanklik as fisiese simulasiemodelle, wat die finale produk simuleer, gebruik is. Na gelang die tegnologie ontwikkel en in verskeie bedrywe uitgebrei het, het die *American Society of Testing and Materials (ASTM)* se internasionale F42-komitee die term *"additive manufacturing"* as die gestandaardiseerde term aanvaar (ISO/ASTM 2015). In 2016 is die term laagvervaardiging

deur die woordeboek van die Afrikaanse Taal (WAT) erken. Die term 3D-drukwerk word deur die algemene publiek gebruik en word gewoonlik geassosieer met masjiene (drukkers) wat kostegewys nie so duur soos industriële laagvervaardigingsmasjiene is nie en wat slegs oor 'n beperkte aantal funksies vir die vervaardiging van onderdele beskik (Campbell, et al., 2012; Wohlers & Caffrey, 2015).

Na gelang van die tipe laagvervaardigingsproses of -tegnologie is daar drie produksiefases, naamlik preproduksie, produksie en postproduksie, wat deur agt gedefinieerde stappe gedek word, soos skematies in Figuur 1 uiteengesit word. Alle laagvervaardigingsprosesse begin aanvanklik met die ontwerp van 'n 3D-model wat met behulp van rekenaargesteundeontwerpsagteware geskep word, en wat die onderdeel se afmetings verteenwoordig. Die ontwerpte 3D-model word in 'n stereolitografie (STL-) lêerformaat gestoor, wat die rekenaargesteunde ontwerp insluit en as basis vir die berekeninge van elke deel (skyfie) van die onderdeel dien. Elke skyfie verteenwoordig veelvuldige tweedimensionele (2D-) lae van die ontwerpte onderdeel wat geproduseer moet word. Die STL-lêer word na die betrokke laagvervaardigingsmasjien gestuur en alle voorbereiding vir die vervaardiging van die onderdeel word vooraf deur die laagvervaardigingsoperateur gedoen. Die beplande onderdeel word dan laag-vir-laag in die gekose materiaal vervaardig. Die verskillende lae word terselfdertyd, na gelang hulle gevorm word, aanmekaar geheg totdat die 3D-onderdeel volledig gebou is. Na gelang van die tipe proses of tegnologie, sowel as die tipe laagvervaardigingsmateriaal, is daar ook verskeie postproduksiestappe, wat die afwerking en masjinering van 'n geproduseerde onderdeel insluit, om die onderdeel/produk finaal af te rond (Gibson, et al., 2015).

Laagvervaardiging word wêreldwyd beskou as 'n ontwrigtende tegnologie "disruptive technology" en as een van die sleuteltegnologieë in die Vierde Industriële Revolusie (4IR), maar hierdie innoverende tegnologie het ook sekere nadele. Laagvervaardiging word tans nie op 'n groot skaal vir massaproduksie toegepas nie en dit word toegeskryf aan die hoë produksiekoste wat daarmee gepaard gaan (Chen, et al., 2017). Dit is egter besig om redelik vinnig toe te neem, en word as die "toekomstige fabriek" beskryf – veral vir massaproduksie van komplekse onderdele.

Goeie voorbeelde van laagvervaardigingsmaatskappye is *Striker* (vervaardiging van prosteses) en *Material Solutions* in Worcester, Verenigde Koninkryk (VK), wat deur SIEMENS gefinansier is en massaproduksie van turbienlemme vir SIEMENS vervaardig. Ten spyte van die toename in die gebruik van laagvervaardiging internasionaal, asook in Suid-Afrika, blyk dit dat beroepsgesondheid en -veiligheid by laagvervaardiging nog nie ten volle ondersoek is nie (Davies 2018; Du Preez, et al., 2018; Stefaniak, et al., 2021).

Die bydrae van hierdie artikel tot die literatuur is om die algemene gebruiker, die voornemende laagvervaardigingsoperateur en selfs die ervare laagvervaardigingsoperateur bewus te maak van die moontlike risiko's wat met laagvervaardiging verband kan hou. Die artikel bevat ook waardevolle inligting in Afrikaans vir beroepshigiëniste om die proses van laagvervaardiging beter te kan verstaan om sodoende effektiewe beheermaatreëls en advies in praktyk te kan voorsien.

Die identifisering van relevante literatuur vir hierdie artikel het begin met die nagaan van 'n bestaande literatuurdatabasis wat die outeurs reeds beskikbaar gehad het. Sleutelwoorde vanuit hierdie publikasies is gebruik om literatuursoektogte uit te voer. Scopus; Web of Science en Pubmed is as soekenjins gebruik. Insluitingskriteria was soos volg: 1) publikasies en boeke asook ewekniebeoordeelde (*peer-reviewed*) vaktydskrifte in Engels (geen Afrikaans is tans beskikbaar nie); 2) sleutelwoorde en

Figuur 1: 'n Skematiese voorstelling van die agt generiese laagvervaardigingstappe (Gibson, et al., 2015; Junk & Tränkle, 2011).

sinonieme soos "*additive manufacturing*" is eerstens gesoek, gevolg deur elke spesifieke proseskategorieë *"powder bed fusion (PBF), direct energy deposition (DED), binder jetting, material jetting, vat photopolymerisation, material extrusion and sheet lamination"*, waarna daar gekyk is na beskikbare literatuur rakende gesondheidsrisiko's; 3) industriële werksplekke en laboratoriums met laagvervaardigingsmasjiene; en 4) gevallestudies spesifiek oor laagvervaardiging. Uitsluitingskriteria was soos volg: 1) nie-ewekniebeoordeelde (*non-peer-reviewed*) publikasies of boeke; 2) observasiestudies sonder instrumentasie; en 3) gevalle waar daar geen beskrywing van die proseskategorie of prosesmateriaal was nie.

Die geskiedenis van laagvervaardiging

Die ontstaan van laagvervaardiging dateer terug na die vroeë 1980's, met die eerste suksesvolle onderdeel wat in 1983 deur Charles Hull gebou (gedruk) is. In 1986 het Charles Hull aangesluit by 'n maatskappy genaamd *3D Systems* in Suid-Carolina in die Verenigde State van Amerika (VSA). Die maatskappy *3D Systems* was die eerste maatskappy wat laagvervaardiging gekommersialiseer het deur die eerste laagvervaardigingsmasjien in 1987 te verkoop. Sedert die vestiging van laagvervaardiging het die proseskategorieë, tegnologieë, die laagvervaardigingsmateriale en verskeie toepassings deurlopend ontwikkel (Wohlers & Caffrey, 2015; Wohlers, et al., 2017). Die toepassing van laagvervaardiging in die ontwerp en ontwikkeling in amper elke verbruikersproduk denkbaar dui op die voordeel wat laagvervaardiging bied – veral waar sekere produkte voorheen as onmoontlik beskou is om deur tradisionele vervaardigingsprosesse vervaardig te word (Wohlers & Caffrey, 2015; Wohlers, et al., 2017).

Laagvervaardiging maak feitlik enige ontwerp moontlik; ongeag die kompleksiteit van die ontwerp wat vervaardig moet word. Wêreldwyd word laagvervaardiging veral gebruik vir die produksie van komplekse lugvaart- en motoronderdele; sowel as vir die vervaardiging van pasiëntspesifieke mediese prosteses (Chen, et al., 2017). Die vermoë van laagvervaardiging om onderdele op aanvraag te produseer; het verseker dat laagvervaardiging 'n prominente tegnologie in die vervaardigingsbedryf geword het. Kleiner 3D-drukkers is ook vir die algemene publiek beskikbaar; en dus is laagvervaardiging nie slegs vir die industrie beskore nie; maar ook algemene gebruikers (Chen, et al., 2017; Gibson, et al., 2010; Kellens, et al., 2017; Wohlers & Caffrey, 2015).

'n Oorsig van laagvervaardiging in Suid-Afrika

Die eerste laagvervaardigingsmasjien deur *3D Systems* het sy debuut in 1991 in Suid-Afrika gemaak, gevolg deur twee "*Stratasys Fused Deposition Modeling"- ("FDM"-)* laagvervaardigingsmasjiene wat in 1994 deur die Wetenskaplike en Nywerheidsnavorsingsraad (WNNR) aangekoop is. Dit is gevolg deur 'n industriëlevlak stereolitografiemasjien (SLA 5000) wat in 1996 deur WNNR aangekoop is. Hierdie tegnologie is van 1996 tot 1999 deur die *Time Compression Technology Centre* van WNNR aan die Suid-Afrikaanse industrie bekend gestel. Daarna, vanaf 2000 tot 2005, is dit in die Nasionale Produkontwikkelingsentrum van WNNR gehuisves.

Verskeie laagvervaardigingsmasjiene is sedert 1996 deur die Sentrale Universiteit vir Tegnologie (SUT), Vrystaat aangekoop, wat in daardie stadium saam met die WNNR en Universiteit van Stellenbosch (US) die leiding op die gebied van navorsing en ontwikkeling in laagvervaardiging in Suid-Afrika geneem het. Na aanvanklike aankoop van 'n *"Sanders"* wasdrukker en 'n sterelitografiemasjien was die SUT die eerste instansie om verskeie lasersinteringmasjiene aan te koop. Gedurende dieselfde tydperk het die US in verskeie weergawes van die "*Z-Corp"*-masjiene (ontwikkel vanaf 'n MIT-patent) belê. SUT het aanvanklik lasergebaseerde prosesse vir die vorming van sandgietvorms en -kerne asook verskeie polimere deur middel van toegepaste navorsing aan die bedryf bekend gestel, terwyl SUT en US ook die eerste instansies in Suid-Afrika was wat lasergebaseerde metaallaagvervaardigingsnavorsing en ontwikkeling vir industriële en mediese toepassings aangepak het (De Beer, 2011).

In 2011 is 'n projek deur navorsers van die WNNR en spesialiste van *Aerosud* van stapel gestuur om die wêreld se grootste titaanpoeierlaagvervaardingsmasjien te ontwikkel. Die projek genaamd Aeroswift se eerste onderdele is in 2016 suksesvol gedruk. Die 2 000 mm x 600 mm x 600 mm-vermoë het ten doel om onderdele vir die lugvaartbedryf te produseer (Campbell, 2021). In 2019 is 'n maatskappy genaamd *Aditiv* gestig deur Suid-Afrikaanse ingenieurs, wat die interne ontwerp van 'n masjien genaamd die *Hyrax* ontwikkel het. Die *Hyrax* kan met lae-volume materiaal gebruik word, maar kan steeds ook metaalonderdele van hoë waarde produseer. Die *Hyrax* bied aan ingenieursmaatskappye en myne die geleentheid om 'n eg Suid-Afrikaanse laagvervaardigingsmasjien teen 'n baie laer koste te koop as gevolg van die werk van kundige laagvervaardigingsingenieurs in Suid-Afrika.

As gevolg van die bewese sukses en nuwe toepassingsmoontlikhede, veral navorsings- en ontwikkelingstoepassings, het verskeie ander universiteite, naamlik Noordwes-Universiteit (NWU), die Vaal-Universiteit van Tegnologie (VUT), Universiteit van die Witwatersrand en die Universiteit van Kaapstad (UK), die Durbanse Universiteit van Tegnologie (DUT), Nelson Mandela Metropolitaanse Universiteit, Tshwane-Universiteit van Tegnologie (TUT) en die Universiteit van Johannesburg (UJ) ook in laagvervaardigingstegnologieë begin belê. Die opleidingsprogramme wat by hierdie instansies beskikbaar is, sluit meestal laagvervaardiging by die Meganiese Ingenieurswese-grade of diplomas in. Die Meganiese Ingenieurswese-program bied opleiding in ingenieurswetenskap en kreatiewe ontwerp aan.

Ten spyte van innoverende toepassings deur die genoemde instansies was daar aanvanklik 'n beperkte opname van die tegnologie, wat toegeskryf kan word aan die konserwatiewe ingesteldheid van die tradisionele vervaardigingsbedryf in Suid-Afrika. Met die groei in belangstelling in dié tegnologie is daar in die jaar 2000 besluit om die *"Rapid Product Development Association of South Africa"* (RAPDASA) te stig, ten einde aan die Suid-Afrikaanse laagvervaardigingsbedryf plaaslike en inter-

nasionale blootstelling te bied. Eksponensiële groei in die gebruik van industriële laagvervaardigingsmasjiene sowel as intreevlak-3D-drukkers het eers in die tydperk tussen 2010 en 2017 plaasgevind (Greyling, et al., 2017). Tans bestaan RAPDASA uit akademici, navorsers van navorsingsinstansies soos die WNNR en regerings- en bedryfsrolspelers en het dit ten doel om volhoubare ontwikkeling van laagvervaardiging in Suid-Afrika te verseker, met verskeie internasionale erelede. RAPDASA word steeds elke jaar in Suid-Afrika aangebied en bied aan kongresgangers die geleentheid om na beide nasionale en internasionale gassprekers te luister.

Navorsing in die Suid-Afrikaanse titaanmetaalindustrie

Van 2011 tot 2020 was Suid-Afrika, naas Australië, die grootste produsent van onverwerkte titaanerts ter wêreld (Du Preez, et al., 2011; OEC 2022). Tot op hede word die titaan as 'n konsentraat met 'n hoë persentasie titaandioksied (TiO_2) uitgevoer en alle titaanmetaal word as 'n toegevoegdewaardeproduk of as 'n titaanmetaalpoeier vir gebruik in laagvervaardiging terug ingevoer (Du Preez, 2014; Greyling, et al., 2017). Dit het tot die ontstaan van die Titaanbevoegdheidsentrum (*Titanium Centre of Competence*) gelei, met as missie die ontwikkeling en kommersialisering van die tegnologieboublokke wat benodig word om 'n Suid-Afrikaanse titaanmetaalbedryf te vestig. Een van die leidende inisiatiewe van die Titaanbevoegdheidsentrum is die direkte vervaardiging van titaanpoeier uit titaantetrachloried. Die ontwikkeling en vervaardiging van titaanpoeier in Suid-Afrika skep 'n geleentheid vir die toename in laagvervaardiging van titaankomponente.

Met die groei en vooruitgang van laagvervaardiging in Suid-Afrika is die behoefte aan 'n Suid-Afrikaanse laagvervaardigingspadkaart deur RAPDASA op hul algemene jaarvergadering in 2012 uitgelig, en in 2013 het die Departement van Wetenskap en Innovasie (die destydse Departement van Wetenskap en Tegnologie) die ontwikkeling van so 'n padkaart geïnisieer (Du Preez & De Beer, 2015; Wohlers & Caffrey, 2015). Die ontwikkeling van die laagvervaardigingspadkaart het reeds teen die einde van 2013 begin en het tot 2015 geduur. Hierdie laagvervaardigingspadkaart moes as gids dien vir Suid-Afrikaanse rolspelers in die veld om ekonomiese geleenthede te identifiseer, tegnologiegapings uit te wys, navorsing- en ontwikkelingsprogramme te fokus en beleggingsbesluite te ondersteun. Die padkaart was bedoel om plaaslike maatskappye en nywerheidsektore in staat te stel om internasionale leiers op gekose gebiede van laagvervaardiging te word. Voor publikasie daarvan is die dokument hersien en omvorm in die Suid-Afrikaanse Laagvervaardigingstrategie, wat in 2016 gepubliseer is. Die hoofaanbevelings van die Suid-Afrikaanse Laagvervaardigingstrategie word in Figuur 2 saamgevat. Hierdie aanbevelings is gerig op kwalifisering van laagvervaardiging vir toepassing in die mediese veld, ruimtevaartbedryf, op militêre gebied, vir 'n impak in die tradisionele vervaardigingsektore, vir nuwe materiaal- en tegnologie-ontwikkeling en vir die ontwikkeling van klein, medium en mikro-ondernemings, asook programme om hulle te ondersteun. Die aanbevelings sluit ook die moontlikheid in van kapasiteitontwikkeling en maniere om opvoedkundige stelsels beter toe te rus. (Du Preez & De Beer, 2015). Die aanbevelings uit die Laagvervaardigingstrategie is tans steeds geldig.

Navorsing in die Suid-Afrikaanse mediese veld met betrekking tot laagvervaardiging

Die talle voordele wat laagvervaardiging bied, is van groot waarde in die mediese veld. Hierdie tegnologie het die vermoë om komplekse strukture te vervaardig wat andersins nie met tradisionele vervaardigingsmetodes moontlik sou wees nie. Die toepassing van laagvervaardiging in die mediese veld word gebruik vir chirurgiese beplanning, sny- en boorgidse, mediese

Onderdele vir mediese doeleindes en ruimtevaart
- Die gebruik van laagvervaardiging vir mediese en tandheelkundige implantate
- Die gebruik van laagvervaardiging vir mediese toestelle.
- Die produksie van onderdele vir ruimtevaart en militêre gebruik gebaseer op huidige kliënte en samewerkingsooreenkomste met die oorspronklike vervaardigers.

Laagvervaardiging met 'n impak op tradisionele vervaardigingsektore
- Verbeter doeltreffendheid van tradisionele vervaardigingsektore deur gereedskapontwikkeling en verbeterde ontwikkelingsiklusse.
- Opknapping van voorheen ondiensbare onderdele vir plaaslike industrieë deur middel van poeierdeponeringstegnologieë.

Nuwe laagvervaardigingsmateriale en -tegnologieë
- Ontwikkeling van laagvervaardigingstelsels.
- Ontwikkeling van materiale vir laagvervaardiging.
- Ontwikkeling van nuwe laagvervaardigingstegnologieë.

Ontwikkeling en ondersteuning van klein, medium en mikro-ondernemings
- Ontwikkeling van 'n laagvervaardigingsgebaseerde klein, medium en mikro-ondernemingsindustrieë in Suid-Afrika gebaseer op/versterk deur laagvervaardiging – byvoorbeeld implantate, juwele, prostetika en ortotika.

Die moontlikheid van kapasiteit ontwikkeling
Ontwerp en ontwerp optimalisering; pre-produksie; proses monitering en beheer; post-produksie; toetse en analises; dimensionele verifikasie en omgekeerde ingenieurswese; simulasies en modellering.

Opvoedkundige sisteem
Deur die opvoedkundige sisteem toe te rus; te bevorder en bewusmaking te skep.

Figuur 2: Aanbevelings van die Suid-Afrikaanse Laagvervaardigingstrategie (Du Preez & De Beer, 2015).

opleiding, ontwerp en ontwikkeling van apparate en instrumente, prostetika en ortotika, die ontwerp en vervaardiging van pasiëntspesifieke implantate, steiers/raamwerke vir weefselhersteltoepassings en geneesmiddelafleweringstelsels (Booysen, et al., 2019; Culmone, et al., 2019).

Hoewel toepassings van laagvervaardiging in die Suid-Afrikaanse mediese bedryf nog relatief nuut is, vind daar navorsing en ontwikkeling in die bedryf en by universiteite plaas om die gebruike van laagvervaardiging vir mediese toepassings uit te brei. Mediese toepassings van laagvervaardiging in die kommersiële sektor in Suid-Afrika fokus hoofsaaklik op mediese implantate en tandheelkunde. Die Departement Wetenskap en Innovasie het in 2012 die Navorsingsleerstoel vir Mediese Produkontwikkeling deur Laagvervaardiging aan die Sentrale Universiteit vir Tegnologie (SUT) in Bloemfontein se Sentrum vir Snelprototipering en vervaardiging (SSPV) toegeken (Alabi, et al., 2019). Die SSPV spesialiseer in die vervaardiging van titaanimplantate, prosteses, chirurgiese beplanningsmodelle en gidse, wat kommersieel in Suid-Afrika beskikbaar is. Die SSPV-fasiliteit is ook die eerste fasiliteit in Suid-Afrika en Afrika wat ISO (Internasionale Stamdaardeorganisasie) 13485-akkreditasie ontvang het vir laagvervaardiging van mediese toestelle. Hierdie implantate word vervaardig om pasiëntspesifiek te wees. Deur van byvoorbeeld magnetieseresonansiebeeld-geskandeerde (MRB-geskandeerde) en gerekenariseerdetomografie-skanderingsdata (GT-data) van 'n pasiënt gebruik te maak, kan 'n implantaat wat identies aan die beendefek is, ontwerp en vervaardig word om sodoende tyd, koste en ongemak vir die pasiënt te beperk. Ander rolspelers in die Suid-Afrikaanse mediese laagvervaardigingsbedryf is *Southern Implants* en *Metal Heart*, wat beide titaanimplantate aan die mediese sektor verskaf (Blackbeard, 2021; Timm, 2017).

Ander universiteite in Suid-Afrika doen ook navorsing en ontwikkeling wat fokus op laagvervaardigingstoepassings in die mediese veld, naamlik VUT, NWU en die Universiteit van Pretoria. Die UK, SUT en NWU fokus ook op navorsing en ontwikkeling van toepassings in tandheelkunde. Navorsing in weefselherstel en geneesmiddelafleweringtoepassings is ook 'n fokusarea van die NWU. Soortgelyke toepassings word ook deur die SUT nagevors, ten einde weefselgroei as deel van die ontwikkeling van prosteses te bevorder. Die onlangs gevestigde Instituut vir Biomediese Ingenieurswese by die US fokus op beenimplantate vir aanwending in die mediese bedryf.

Laagvervaardigingsproseskategorieë

Die sewe standaardlaag vervaardiging proseskategorieë (ISO/ASTM 2015) kan geklassifiseer word volgens die tipe produksie wat plaasvind en die fisiese vorm van die verskillende prosesmateriale wat gebruik word. Volgens Monzón et al. (2015) kan laagvervaardigingsprosesse gekategoriseer word volgens die prosesmateriale wat gebruik word, die deponeringstegniek (neerleggingstegniek) wat gebruik word en die wyse waarop die materiaal saamsmelt of stol. Vir die doel van hierdie literatuuroorsig word laagvervaardiging geklassifiseer volgens die fisiese vorm van die voermateriaal, naamlik poeiervorm, vloeistofvorm (polimeervloeistowwe en epoksieharse) en soliede vorm (filament- en metaaldraadmateriale (Bourell, et al., 2017; ISO/ASTM 2015; Short, et al., 2015; Venuvinod & Ma, 2004).

Tabel I: Die sewe standaardlaag vervaardiging proseskategorieë, -tegnologieë, fisiese vorms van die prosesmateriale en voorbeelde van materiale (Langefeld, 2013; Gibson, et al., 2015; ISO/ASTM 2015; Short, et al., 2015; Wohlers & Caffrey, 2015; Calignano, et al., 2017).

Illustrasie	Fisiese vorm van prosesmateriaal	Proseskategorie	Tegnologie	Tegnologie in SA beskikbaar	Materiale
	Poeiermateriaal	Poeierbedsamesmelting	Direkte metaallasersintering Selektiewe lasersmelting Selektiewe lasersintering Selektiewe hittesintering Elektronbundelsmelting	✓ ✓ ✓ ✓ ×	Metaalpoeiers Metaallallooie Polimere
	Poeier-/Soliede materiaal	Gerigte-energiedeponering	Lasergebaseerde tegnologieë Elektronstraaltegnologieë	✓ ✓	Metaalpoeiers Metaallallooie Metaaldraad
	Poeiermateriaal	Bindmiddelstraaltegniek	3D-drukwerk Inkstraaltegniek	✓ ✓	Metaallallooie Polimere Keramieke
	Vloeistofmateriaal	Materiaalstraaltegniek	Inkstraaltegniek Polimeerstraaltegniek	✓ ✓	Fotopolimere Wassoorte
	Vloeistofmateriaal	Fotopolimerisasie	Stereolitografie Digitale ligprosessering	✓ ✓	Ultraviolet-setbare hars Polimere Keramieke
	Soliede materiaal	Materiaalekstrusie	"*Fused Deposition Modelling (FDM)*"-tegnologie	✓	Polimere Metaalfilamente
	Soliede materiaal	Laaglamellering	Ultrasoniese laagvervaardiging Gelamelleerdevoorwerp-vervaardiging	× ×	Plaatmetaal Papier Plastieke

Die drie laagvervaardigingstegnieke word verder gesubklassifiseer in die sewe standaardproseskategorieë soos beskryf deur die *ASTM* 52900-standaard, tesame met verskeie tegnologieë en materiale wat in Tabel I opgesom word, gevolg deur meer gedetailleerde beskrywings.

Poeierbedsamesmelting

Poeierbedsamesmelting is die laagvervaardigingsproseskategorie waar 'n termiese energiebron selektief areas van 'n poeierbed saamsmelt (ISO/ASTM 2015). Na gelang van die tegnologie kan die termiese energiebron wat die poeierlaag smelt 'n laser of 'n elektronbundel wees. Daar is vyf poeierbedsamesmeltingstegnologieë, naamlik direkte metaallasersintering, selektiewe lasersmelting, selektiewe lasersintering, selektiewe hittesintering en elektronbundelsmelting (Gibson, et al., 2010).

Elke proses begin met die neerlegging van 'n dun laag poeier op 'n bouplatform. Gedurende produksie word 'n dun laag van die poeier met 'n roller of 'n staallem oor die bouplatform uitgesprei. Vervolgens beweeg die laserstraal/elektronbundel oor die poeieroppervlak en smelt selektief poeierdeeltjies aanmekaar om 'n tweedimensionele materiaallaag te vorm. Die geometrie van hierdie tweedimensionele laag word bepaal vanaf 'n rekenaargesteunde ontwerp van die voorwerp wat gebou word. Nadat die eerste laag voltooi is, sak die bouplatform met een poeierlaagdikte af, sodat 'n volgende poeierlaag op die vorige neergelê kan word. Terwyl die poeierdeeltjies van hierdie laag selektief aanmekaar gesmelt word, word die nuutgevormde laag terselfdertyd aan die vorige laag vasgesweis. Deur hierdie proses te herhaal, word 'n 3D-voorwerp uiteindelik gebou. Die oorblywende ongebruikte poeier, wat tydens produksie om die onderdeel versamel, kan herwin en weer gebruik word. Poeierbedsamesmeltingstegnologieë vind by baie hoë lokale temperature in 'n geslote sisteem in die laagvervaardigingsmasjien plaas. Argon word as beskermingsatmosfeer gebruik om oksidasie te voorkom en om die meganiese eienskappe van die onderdeel te behou (Calignano, et al., 2017; Herzog, et al., 2016; Wong & Hernandez, 2012; Zhang, et al., 2018).

Gerigte-energiedeponering

Gerigte-energiedeponering maak van polimere, keramiekmateriale en verskeie metale gebruik. Daarom word daar soms na dié kategorie as metaaldeponering verwys. Gerigte-energiedeponering is 'n meer komplekse laagvervaardigingsproseskategorie. Die masjien (drukker) se tuitvormige spuitkop kan in verskillende rigtings beweeg en spuit 'n dun straal metaalpoeier op 'n metaalbouplatform in die fokuspunt van 'n laserstraal in. Die laser smelt die poeier en so word 'n laag selektief gebou volgens die geometrie afkomstig van 'n rekenaargesteunde ontwerp. Soortgelyk aan die ander tegnologieë word 'n 3D-voorwerp opgebou (Bau, et al., 2020; Dutta & Froes, 2017; Gibson, et al., 2010).

Bindmiddelspuittegniek

Bindmiddelspuittegniek is 'n laagvervaardigingsproseskategorie waarin 'n vloeibare bindmiddel d.m.v. 'n laagvervaardigingsdrukkerkasset of bindmiddelhouer die bindmiddel selektief deur 'n enkele spuitstuk of 'n stel spuitstukke deponeer om sodoende die poeierlae selektief te bind. Bindingsmiddeldruppels vorm agglomerate (samevoegings of opeenhopings) wat die poeierpartikels aan dié van die vorige laag bind of saamvoeg, ná voltooiing van elke opeenvolgende laag wat gevorm word. Na voltooiing van 'n laag word nuwe materiaal eenvormig oor die bou-oppervlak deur middel van 'n roller of skraper (of kombinasie daarvan) neergelê (Xu, et al., 2014). Die selektiewe bind- en neerleggingstegnieke vind herhaaldelik plaas, totdat die produk voltooi is. Materiaal wat in dié prosesse gebruik word, sluit metale, polimere en keramieke in (Calignano, et al., 2017).

Materiaalspuittegniek

Soortgelyk aan die bindmiddelspuittegniek funksioneer die materiaalspuittegniek deur gebruik te maak van druppels fotosensitiewe hars wat deur 'n enkele spuitstuk of 'n aantal spuitstukke op 'n bouplatform gespuit word en sodoende op 'n selektiewe basis die fotosensitiewe of selfs hittesensitiewe harslaag neerlê. Deur blootstelling aan 'n lig- of hittebron word die hars verhard om 'n soliede laag te vorm. Volgens 'n soortgelyke laag-op-laag-proses soos reeds beskryf is, word die produk of reeks produkte gevorm (Calignano, et al., 2017; Gibson, et al., 2010). Dié proses se voordeel is dat dit verskillende lae produkte in 'n groter volume kan bou, en sodoende 'n baie kompeterende produksietyd bied (Harris, et al., 2015).

Fotopolimerisasie

Fotopolimerisasie is 'n laagvervaardigingsproseskategorie waar 'n vloeibare fotopolimeriese harsmateriaal in 'n houer selektief deur liggeaktiveerde polimerisasie verhard word. In hierdie geval word ook meestal 'n laserstraal gebruik om die polimeerlagie volgens die rekenaargesteunde ontwerp op die bouplatform te vorm. Nadat die eerste lagie verhard is, word die bouplatform inkrementeel met een laagdikte ondertoe beweeg en 'n volgende laag vloeibare hars deur 'n lem oor die vorige lagie gesprei. Hierdie lagie word selektief deur die laser verhard en terselfdertyd aan die vorige lagie geheg. Deur herhaling van die proses word die 3D-produk gebou. Fotopolimerisasie behels 'n komplekse chemiese reaksie wat die vloeibare laagvervaardigingsmateriaal ondergaan om 'n soliede onderdeel te vorm (Calignano, et al., 2017).

Materiaalekstrusie

Materiaalekstrusie is 'n laagvervaardigingsproseskategorie waar die materiaal deur 'n tuitvormige spuitkop (ISO/ASTM 2015) geëkstrueer word om 'n filament te vorm, wat selektief op 'n bouplatform neergelê word. Materiaalekstrusiedrukkers word in twee kategorieë verdeel, naamlik alleenstaande kleiner drukkers wat bo-op verbruikers se lessenaars kan pas, en die oorspronklike industriële weergawes, wat groter is, maar ook industriëlegraadmateriale (ingenieurspolimere) kan prosesseer – dikwels teen baie hoër temperature, asook met groter akkuraatheid (Roberson, et al., 2013; Wu, et al., 2020). Die prosesmateriaal word in verskillende lae gedeponeer deur die tuitvormige spuitkop van die masjien wat die temperatuur

verhoog tot net onder die smeltpunt en veroorsaak dat die prosesmateriaal versag. Termoplastiekmateriale soos akrielnitrielbutadieenstireen (ABS), polimelksuur (PLA), nylon en polikarbonaat word meestal gebruik. Metaalfilamente kan ook gebruik word deur die tuitvormige spuitkop aan te pas om voorsiening te maak vir die hoë temperature waarteen metale geëkstrueer word.

Laaglamellering

Laaglamellering maak gebruik van velle papier, plastiek of metaalplate, met inbegrip van titaan-, aluminium-, koper- en vlekvrystaalplate, wat met mekaar verbind word om 'n onderdeel te vorm (ISO/ASTM, 2015). Die lae word met mekaar verbind deur 'n ultrasoniese sweistegniek, drukking en hitte of gomtegnieke wat toegepas word om materiale saam te voeg. Gewoonlik word 'n lasersnyproses gebruik om die verskillende lae te sny volgens geometrie wat deur rekenaargesteunde ontwerp bepaal is (Calignano, et al., 2017).

Vaardighede van die laagvervaardigingsoperateur

Die laagvervaardigingsproses is nie 'n enkele dissipline nie, dus word dit as 'n spesialisveld beskou, en die operateur vervul die taak van 'n tegnikus, ontwerper en ingenieur (Elliott & Love, 2016; Gibson, et al., 2015). Die proses van laagvervaardiging is kompleks en vereis spesifieke opleiding en praktiese vaardighede om van die mees gespesialiseerde toerusting ter wêreld te gebruik. Tradisionele vervaardiging sluit groter produksie en meer operateurs in, terwyl die meeste laagvervaardigingsprosesse slegs 'n enkele operateur benodig.

Laagvervaardigingsmateriale

Laagvervaardigingsmateriale word deur die *ASTM* gedefinieer as die grondstowwe wat tot die bouproses (produksieproses) toegevoeg word (ISO/ASTM 2015). Die oorspronklike materiale wat vir laagvervaardiging beskikbaar was, was beperk en het bestaan uit polimere, wassoorte, keramiek en papiermateriale (Gibson, et al., 2010). Na gelang die tegnologie ontwikkel het, het daar 'n wye verskeidenheid van laagvervaardigingsmateriale beskikbaar geword, in so mate dat materiale nou as poeiervormig, vastestofvormig of vloeistofvormig geklassifiseer kan word (Chohan & Singh, 2017; Graff, et al., 2016; Lakhdar, et al., 2021; Short, et al., 2015). Die eienskappe van laagvervaardigingsmateriale in poeier-, vastestof- of vloeistofvorm het 'n beduidende invloed op die prosesdoeltreffendheid en die gehalte van die finale produk. Die laagvervaardigingsoperateur word blootgestel aan 'n verskeidenheid gevaarlike chemiese stowwe in soliede, poeier- en vloeistofvorm, en selfs in die vorm van dampe. Gevaarlike chemiese stowwe word gedefinieer as enige toksiese, skadelike, korroderende, irriterende stof of mengsel van stowwe wat 'n beroepsblootstellingslimiet het, of nie het nie, en wat 'n gesondheidsgevaar vir mense inhou. Die fokus van hierdie literatuuroorsigartikel is meestal verskillende metaalpoeiers en titaan, maar sluit ook 'n oorsig in van die bekendste polimere, naamlik ABS en PLA, sowel as keramiekprosesmateriale.

Metaalallooipoeiers

Daar is 'n wye verskeidenheid metaalpoeiers wat kommersieel beskikbaar is vir metaallaagvervaardiging. Die prominentste daarvan sluit is verskeie vlekvrystaalpoeiers, aluminiumallooi-, nikkelallooi- en kobaltchroompoeiers, suiwer titaan en titaanallooie (Gibson, et al., 2010; Wohlers & Caffrey, 2015). 'n Allooipoeier is 'n chemiese mengsel van meer as een metaal. Die meeste metaallaagvervaardigingspoeiers kan herwin en weer gebruik word, dus kan poeiers as "nuwe" (soos verskaf vanaf die vervaardiger) of reeds gebruikte (herwinde) poeiers in die bedryf gebruik word.

Titaanallooipoeiers

Titaan word beskryf as 'n liggewigoorgangsmetaal, is die negendevolopste element in die aardkors en word uit die minerale soos rutiel en ilmeniet geëkstraheer (Peters, et al., 2003; Prasad, et al., 2015). Titaan is 'n korrosiebestande materiaal wat sterker is as vlekvrystaal (Dutta & Froes, 2017) en wat versoenbaar is met menslike weefsel. Dit het die hoogste spesifieke sterkte (sterkte-tot-digtheid-verhouding) van alle metale. Daarom word dit beskou as een van die belangrikste en mees gevorderde materiale wat wye toepassing vind in die lugvaartbedryf (insluitend ruimtevaart). Suiwer titaan en Ti6Al4V is bioversoenbaar en word in 'n aantal mediese implantate soos tande, heupe en knieë gebruik (Donachie, 2000; Peters, et al., 2003; Prasad, et al., 2015).

Die twee allotropiese kristalstrukture van titaan staan bekend as die alfa- (α-) en beta- (β-) fases van die metaal (Calignano, et al., 2017; Donachie, 2000). Die alfastruktuur verwys na die heksagonaal diggepakte kristalstruktuur van titaan en die betastruktuur verwys na die liggaamsgesentreerde kubiese struktuur van titaan. Wanneer titaan met verskeie elemente gelegeer word, ontstaan drie klasse allooie, naamlik alfa-, alfa-beta- en beta-allooie, elk met hul eie kenmerkende eienskappe. In die laagvervaardigingsbedryf word verskeie titaanallooie met metale soos aluminium, chroom, koper, yster, mangaan, tin, molibdeen en vanadium geproduseer (Davis, 2001; Froes, 2015; Goso & Kale, 2011). Ti6Al4V word meestal tydens laagvervaardiging gebruik en is saamgestel uit 6% aluminium, 4% vanadium, 0,3% yster en 0,2% suurstof, terwyl die oorblywende persentasie titaan is.

Staal

Daar bestaan verskillende grade staal, elkeen fisies en chemies uniek (Gardner, et al., 2010; Goswami, et al., 2022). Staal bestaan hoofsaaklik uit yster en koolstof, maar die hoeveelheid koolstof, sowel as addisionele legeringselemente, bepaal die verskillende staalgrade. Staal is 'n algemeen gebruikte ingenieursmateriaal. Prominente stale wat vir laagvervaardiging gebruik word, is vlekvrystaal, gereedskapstaal, marouderstaal en laekoolstofmartensietstaal (Herzog, et al., 2016).

Vlekvrystaal

Vlekvrystaal bestaan uit ongeveer 30% chroom as hooflegeringselement, en 'n minimum van 50% yster, terwyl ander

metale soos nikkel, molibdeen, koper, titaan en aluminium soms bygevoeg word wanneer die staal oor spesifieke eienskappe moet beskik (Davis, 1994; Lo, et al., 2009). Vlekvrystaal is bekend vir hoë korrosieweerstand en duursaamheid en word daarom in 'n verskeidenheid laagvervaardigingsprodukte gebruik (Baddoo, 2008).

Gereedskapstaal

Gereedskapstaal word meestal gebruik vir die vervaardiging van gereedskap en gietvorms waar sterkte en hardheid nodig is vir 'n komponent om optimaal te funksioneer. Gereedskapstaal is 'n kombinasie van koolstof en verskeie legeringselemente soos chroom, molibdeen en vanadium. Die *American Iron and Steel Institute* klassifiseer gereedskapstaal in groepe op grond van hulle eienskappe, soos die toepassing van die onderdeel, hittebehandeling en legeringselemente (Roberts, et al., 1998).

Laekoolstofmartensietstaal

Laekoolstofmartensietstaal bevat yster en 18-25% nikkel en word vervaardig deur staal te verhit in die austenitiese fase, gevolg deur die verkoeling van die staal om die martensietmikrostruktuur te vorm. Die verharding van martensietstaal vind plaas deur die neerslag van molibdeen en titaan. Die veroudering van martensietstaal word bepaal deur die tipe hittebehandeling wat die staal ondergaan (Niendorf, et al., 2015). Laekoolstofmartensietstaal bied goeie korrosiebestandheid, verleen hardheid aan 'n onderdeel en kan maklik verwerk en gesweis word (Li, et al., 2014; Wang, 2003).

Aluminiumallooie

Aluminium is 'n liggewig-, pletbare metaal wat met koper, mangaan, magnesium en sink gelegeer kan word. Aluminium word veral gebruik tydens selektiewe lasersmelting en word aangewend in 'n wye aantal industriële sowel as verbruikersprodukte omrede dit maklik gegiet en gemasjineer kan word en korrosiebestand is (Calignano, et al., 2017; Elserougy, et al., 2015).

Kobaltchroomallooie

Kobaltchroomallooie bevat bykomende legeringselemente soos molibdeen en nikkel en word gebruik vir die vervaardiging van gasturbines, mediese implantate soos knievervangings en tandheelkundige herstelwerk (Gibson, et al. 2010; Sing, et al. 2016). Kobaltchroom was die oorspronklike legeringsmetaal wat vir tandheelkunde gebruik is (Hermenae, et al., 2011). Kobaltchroom word grotendeels in selektiewe lasersmelting gebruik.

Nikkelbasisallooie

Die vernaamste nikkelallooi vir laagvervaardigingskomponente staan bekend as *Inconel*, wat geklassifiseer word as 'n superlegering element (Kracke, 2010). Die term superlegering word gebruik wanneer daar na 'n metaalallooi verwys word wat spesifiek oor eienskappe beskik soos die sterkte van die materiaal, die vermoë om oksidasie te weerstaan en die vermoë van die onderdeel om te vervorm tydens hittebehandeling (Gibson, et al., 2010). Verskeie nikkelallooie bevat legeringselemente soos aluminium, titaan of chroom.

Polimere

Polimere kan maklik vervorm en verwerk word en bestaan uit organies saamgestelde verbindings wat koolstof as die essensiële element bevat (Venuvinod & Ma, 2004). In laagvervaardiging word daar gebruik gemaak van polimere wat as termoplastiekmateriale bekend staan en wat maklik met verskillende bykomende materiale gemeng kan word. Termoplastiekmateriale kan onderskei word van termosetmateriale deur die wyse waarop die materiaal op hitte reageer. Termoplastiekmateriale kan verhit word, tot 'n vloeistof vervorm, verkoel en weer verhit word. Tydens laagvervaardiging word termoplastiek meestal as soliede filamente gebruik om verhit te word en ondergaan dit dan beide fisiese en chemiese verandering (Stefaniak, et al., 2017). Die twee mees algemene termoplastiekmateriale wat vir laagvervaardiging gebruik word, is ABS en PLA.

Akrielnitrielbutadieenstireen (ABS)

ABS is 'n duursame, produksiegraadtermoplastiek met 'n petroleumbasis wat kommersieel in verskillende kleure vir gebruik in verskeie bedrywe beskikbaar is, en dit kan ook met polikarbonaat gemeng word. ABS kan optimaal by hoë temperature gebruik word vir laagvervaardiging en hoewel dit nie bioafbreekbaar is nie, is dit herwinbaar (Calignano, et al., 2017; Gibson, et al., 2010; Wojtyla, et al., 2017). Die voordeel van ABS vir laagvervaardiging is dat die lae baie goed met mekaar verbind, wat die vinnige vervaardiging van ABS-onderdele moontlik maak. Die enigste nadeel van ABS is dat gedurende die produksie van groter onderdele die materiaal in so mate kan vervorm dat dit nie meer met die bouplatform in lyn is nie en 'n gebrande plastiekreuk veroorsaak (Bharti & Singh, 2017). Die grootste verskil tussen ABS- en PLA-3D-drukkers is die temperature waarby die materiale tydens laagvervaardiging smelt en vervorm (Stephens, et al., 2013).

Polimelksuur (PLA)

PLA word vervaardig uit plantgebaseerde materiale en is dus bioafbreekbaar, en dit kan 'n biopolimeer genoem word (Steinle, 2006; Yi, et al., 2016; Mendes, et al., 2017). PLA is 'n sterk en hoogs elastiese termoplastiek, dis brosser as ander plastieke en dit verloor 'n mate van molekulêre gewig tydens hittebehandeling (Garlotta, 2001; Farah, et al., 2016; Wojtyla, et al., 2017). Soortgelyk aan ABS verbind PLA-lae baie goed met mekaar en kan dit teen 'n hoë drukspoed gebruik word, maar dit veroorsaak 'n organiese reuk tydens drukwerk (Bharti & Singh, 2017; Calignano, et al., 2017).

Keramiekprosesmateriale

Keramiekprosesmateriale kan onderverdeel word volgens hul 1) tegniese/strukturele eienskappe (slytasie-onderdele, snygereedskap, enjinkomponente en biokeramieke), 2) elektriese keramiekeienskappe (kapasitors, isolators, substrate, geïntegreerdestroombaanpakkette, piëso-elektries, magnete en

supergeleiers), 3) keramiekbedekkings (enjinkomponente, snygereedskap) en 4) chemiese verwerking (filters, membrane, katalisators en katalisatorsteune) (Jang, et al., 2020; Jiang, et al., 2021). Gepubliseerde literatuur wat met keramiek as laagvervaardigingsprosesmateriaal verband hou, was tot dusver beperk tot spesifiek laagvervaardigingsprosesse, maar daar is baie navorsing wat tans gedoen word om keramiekprosesmateriale deel te maak van mediese laagvervaardingstoestelle (Jang, et al., 2020; Wang, et al., 2019).

Beroepsblootstelling gedurende laagvervaardiging

Laagvervaardiging word beskou as 'n vervaardigingstegnologie wat in proses is om te transformeer na 'n meer toeganklike gebruikersvriendelike tegnologie vir toepassing in skole, universiteite en verskeie vervaardigingsbedrywe (Bours, et al., 2017; Herrick & Klein, 2016). Dit is van kritieke belang vir die operateur van enige laagvervaardigingsmasjien, van die ingenieur tot die algemene gebruiker, om bewus te wees van potensiële gesondheidsrisiko's wat met hierdie tegnologie verband hou. Na gelang van die tipe laagvervaardigingstegnologie kan blootstelling aan verskeie prosesmateriale tydens enige van die preproduksie-, produksie- en postproduksiefases plaasvind (Chohan & Singh, 2017; Graff, et al. 2016; Petretta, et al., 2019; Stefaniak, et al., 2021; Roth, 2019).

Preproduksie

Die preproduksiefase van laagvervaardiging begin met die digitale ontwerp van 'n onderdeel of komponent, gevolg deur die opstel van die sagteware om die onderdele te produseer. Tydens preproduksie word die laagvervaardigingsmasjien ná die vorige produksiefase skoongemaak en vind voorbereiding vir die volgende produksiefase plaas. Die operateur hanteer alle prosesmateriale self en voer ook self die fisiese take ter voorbereiding van die produksiefase uit. Dit is juis as gevolg hiervan dat die operateur moontlike beroepsblootstelling kan ervaar (Chohan & Singh, 2017; Gibson, et al., 2010; Junk & Tränkle, 2011).

Produksie

Gedurende die produksiefase is die deur van die groter industriële laagvervaardigingsmasjiene geseël totdat die produk se bou gefinaliseer is. Die meerderheid kleiner intreevlakdrukkers is glad nie gesluit nie en alle beweegbare onderdele kan gesien word. Sommige van hierdie kleiner drukkers is ook nie aan enige ekstraksiestelsels gekoppel nie (Floyd et al. 2017). Die drukkers word ook vrylik in kantore gebruik en die laagvervaardigingsoperateur is meestal in noue kontak met die drukker. In industriële werksomgewings is die groter masjiene in afsonderlike vertrekke en sal laagvervaardigingsoperateurs gewoonlik aanvanklik 15 tot 20 minute in die vertrek deurbring, waarna hulle gereeld van tyd tot tyd die vordering van die onderdeel wat gebou word, sal gaan moniteer (Herrick & Klein, 2016; Zhang, et al., 2017).

Tydens die produksie van 'n metaallaagvervaardigingsonderdeel word 'n konsep soortgelyk aan sweiswerk toegepas, wanneer metaalpoeier deur die samesmelting van die poeier in lae verbind word. Die enigste verskil tussen laagvervaardigingsproduksie en gewone sweiswerk is dat laagvervaardiging 'n binnenshuise proses is, terwyl sweiswerk meestal in die oopte (buite) plaasvind (Floros, 2018; Zelinski, 2017). Die metaaldampe wat tydens die produksiefase gegenereer word, kan vergelyk word met sweisdampe, wat ook uit yster, aluminium, titaan, nikkel en chroom bestaan. Die gevaar bestaan dat die laagvervaardigingsoperateur blootgestel word aan metaaldampe wat tydens die produksiefase vrygestel word. Nie alle industriële laagvervaardigingsmasjiene is toegerus met ekstraksieventilasiestelsels nie, terwyl sekere industriële laagvervaardigingsmasjiene addisionele ekstraksie vereis (Stephens, et al., 2013). Daar is 'n aantal gepubliseerde studies wat reeds aangedui het dat ultrafyn partikels en vlugtige organiese stowwe gedurende die produksiefase by die gebruik van *"FDM"*-drukkers vrygestel word (Azimi, et al., 2016; Kim, et al., 2015; Stephens, et al., 2013).

Postproduksie

Alle geproduseerde/vervaardigde onderdele vereis 'n mate van postproduksie en afronding. Dit word gewoonlik deur die operateur self gedoen, wat kan lei tot addisionele blootstelling aan gevaarlike chemiese stowwe (Bours, et al., 2017; Gibson, et al., 2010; Graff, et al., 2016; Wohlers & Caffrey, 2015). Na gelang van die tipe tegnologie wat gebruik word om 'n onderdeel te produseer is daar 'n wye verskeidenheid postproduksieaktiwiteite wat kan plaasvind. Metaalpostproduksie verskil egter baie van polimeerpostproduksie en daarom sal die blootstelling van die operateur ook verskil.

Postproduksie van metaalonderdele

Metaalonderdele se postproduksie behels die verwydering van die surplus poeier of steunstrukture vanaf die geproduseerde onderdeel (Bours, et al., 2017; Graff, et al., 2016). Nadat die produksie van 'n metaalonderdeel voltooi is, sal die operateur die oorblywende poeier wat om die onderdeel vorm in oorloopdromme afvee, wat oormatige stof in die werksplek kan genereer (Elliot & Love, 2016; Graff, et al., 2016). Die bouplatform waarop die onderdeel gebou (gevorm) word, sal deur die laagvervaardigingsoperateur uit die masjien verwyder word en poeier wat nog in die metaalonderdeel se strukture vassit, sal verwyder word deur die onderdeel te stofsuig. Wanneer 'n onderdeel met steunstrukture gebou word, moet hierdie steunstrukture as deel van die finale afronding van die onderdeel van die geboude onderdeel en die bouplatform af verwyder word. Na gelang van die aard van die onderdeel sluit die finale afrondingsprosesse die volgende in: skuur, skaaf, masjinering, elektroplatering en slyping van die finale produk, wat dikwels deur die operateur self uitgevoer word. Die operateur maak ná produksie die laagvervaardigingsmasjien skoon deur binne-in die masjien en om die werksareas te stofsuig (Elliot & Love, 2016; Kumbhar & Mulay, 2016). Die hoë konsentrasies van die laser- of elektronenergiebron wat tydens die produksiefase van metaalonderdele gebruik word, veroorsaak 'n hoë termiese gradiënt, wat tot resspanning (residu- of oorblywende spanning) in die finale onderdele kan lei (Li, et al., 2018; Teixeira, et al., 2020; Van Zyl, et al., 2016). Resspanning word veroorsaak deur die unieke

termiese siklus wat metaallaagvervaardigingsonderdele ondergaan, en 'n oormaat resspanning kan die strukturele integriteit van 'n onderdeel affekteer (Teixeira, et al., 2020). Resspanning kan verminder word deur addisionele hittebehandelings tydens die produksiefase of as postproduksie-hittebehandeling van gedrukte onderdele toe te pas (Becker, et al., 2015; Teixeira, et al., 2020; Van Zyl, et al., 2016).

Postproduksie van polimeeronderdele

Ná voltooiing van 'n polimeeronderdeel (termoplastiekonderdeel) se produksiefase word die gedrukte onderdeel met 'n handskraper van die bouplatform verwyder. In teenstelling met metaalonderdele word nie alle polimeeronderdele met steunstrukture gebou nie. Die tipe steunmateriaal wat vir polimeeronderdele gebruik word, verskil van die materiaal wat vir die gedrukte onderdeel self gebruik word. Dit kan in sommige gevalle met die hand verwyder word, of met 'n chemiese stof. Termoplastiekonderdele se postproduksie sluit in die skoonmaak van die geproduseerde onderdeel met organiese oplosmiddels en asetoon- of chloroformpolering (Bours, et al., 2017; Calignano, et al., 2017). Die asetoonpoleringsproses word vir ABS-onderdele gebruik en chloroformpolering word vir PLA-onderdele gebruik. Die toepaslike oplosmiddel word in 'n houer en die gedrukte onderdeel word op 'n platform geplaas wat bo die oplosmiddel hang. Die houer word dan verseël sodat die oplosmiddel verhit kan word en dampe vrystel. Hierdie poleringsprosesse word gebruik wanneer 'n onderdeel met 'n gladde afwerking vereis word (Neff, et al., 2016).

Blootstellingsroetes

Primêre blootstellingsroetes sluit dermale en inasemingsroetes in. Die risiko vir elke roete sal verskil na gelang van die prosesmateriaal en proseskategorie (Du Plessis, et al., 2022). Die deeltjiegrootte van 'n partikel bepaal of 'n partikel inasembaar is en, indien wel, waar dit moontlik in die respiratoriese stelsel gedeponeer kan word (Maynard & Kuempel, 2015 Stephens, et al., 2013). Partikels kan volgens fraksiegroottes geklassifiseer word, naamlik inasembare, torakale of respireerbare partikels. Inasembare partikels is die fraksie partikels wat ingeasem word deur die mond en/of neus en die liggaam binnedring tot in die boonste lugweë. Torakale grootte partikels is die fraksie partikels wat ingeasem word en verder as die larinks kan penetreer, terwyl respireerbare partikels in die alveolêre deel van die longe gedeponeer word (Brown, et al., 2013; CEN 1993; Petretta, et al., 2019; ISO 1995). Ultrafyn partikels is die fraksie partikels wat oor 'n deursnee van minder as 100 nm beskik (Bari, et al., 2015; Stone, et al., 2017 Viitanen, et al., 2017). Ultrafyn partikels kan tydens verskillende laagvervaardigingstegnologieë vrygestel word. Ultrafyn partikels kan in die nasale, trageale, brongiale en alveolêre dele van die longe gedeponeer word. Daar is toenemende bekommernis oor blootstelling aan ultrafyn partikels en die potensiële akute en chroniese gesondheidseffekte wat met blootstelling aan hierdie partikels verbind word. Daar bestaan slegs 'n beperkte aantal studies wat die laagvervaardigingsoperateur se blootstelling aan ultrafyn partikels gedurende die produksiefase van laagvervaardiging ondersoek het. Ultrafyn partikels word moontlik gegenereer in werksplekke waar prosedures hoë temperature en meganiese prosesse behels (Du Preez, et al., 2018; Floyd, et al., 2017; Kim, et al., 2015; Stephens, et al., 2013). Die inaseming van ultrafyn partikels kan lei tot akute lugweginflammasie, verlaagde longfunksie, verhoogde asma simptome en chroniese blootstelling aan ultrafyn partikels, met gevolglike chroniese obstruktiewe pulmonale toestande.

Gesondheidseffekte wat met laagvervaardiging verband hou

Die inaseming van materiale wat gedurende laagvervaardiging gebruik word, kan respiratoriese irritasie asook neus- en keelirritasie veroorsaak. Met die toename in die verskeidenheid materiale wat tydens laagvervaardiging gebruik word, bestaan daar 'n gesondheidsrisiko vir die operateur (Gao, et al., 2015; Short, et al., 2015). Daar is beperkte inligting in veiligheidsdatablaaie en geen riglyne vir die veilige uitvoering van laagvervaardigingstake in gebruikersgidse nie. Wanneer daar beperkte inligting vir die operateur beskikbaar is, kan dit moontlik 'n valse indruk van sekuriteit bied, terwyl daar in werklikheid moontlike gesondheidsrisiko vir die laagvervaardigingsoperateur bestaan.

Gepubliseerde gesondheidseffekte wat met laagvervaardiging verband hou

Na die beste van die outeurs se kennis is daar is tans slegs agt studies wat gesondheidseffekte gerapporteer het wat met laagvervaardiging verband hou, soos opgesom in die onderstaande tabel (Tabel II). Insluitingskriteria vir studies in dié afdeling was gevallestudies, gekontroleerde studies (waaronder laboratoriumstudies met proefdiere) en gerapporteerde gesondheidseffekte by laagvervaardigingsoperateurs. Studies met selkulture is nie ingesluit nie. Vier van hierdie studies het die potensiële gesondheidseffekte tydens materiaalekstrusie van ABS as prosesmateriaal ondersoek, twee ander het epoksiehars as prosesmateriaal ondersoek, en die oorblywende twee studies het nylon en verskeie ander prosesmateriale bestudeer.

Die gevallestudie deur House et al. (2017) het bevind dat 'n 28-jarige laagvervaardigingsoperateur asma ontwikkel het as gevolg van die vrystelling van partikels wat deur *"FDM"*-drukkers tydens die produksie van ABS as prosesmateriaal gegenereer is. Die operateur se werksarea het tien *"FDM"*-drukkers in 'n klein spasie van ongeveer 85 m^3 bevat. Drie maande ná die operateur se simptome het hy van prosesmateriaal verander en ook die getal drukkers na vyf verminder, waarna hy 'n verbetering in sy simptome begin ervaar het. Stefaniak et al. (2017) was die eerste studie wat die kardiovaskulêre funksie van rotte tydens blootstelling aan ABS gedurende materiaalekstrusie ondersoek het, en dit het bevind die blootstelling tot akute hipertensie gelei het. Die rotte is vir een uur aan ABS in 'n laboratoriumgebaseerde studie blootgestel.

Daar was ook 'n studie op rotte wat aangedui het dat rotte pulmonale en sistemiese toksisiteit tydens inaseming van ABS-prosesmateriaal ontwikkel het (Farcas, et al., 2020). In die studie deur Johannes et al. (2016) is chroniese hipersensitiewe

pneumonie gediagnoseer by 'n laagvervaardigingsoperateur, wat aan blootstelling aan nylonpoeier gedurende poeierbed-samesmelting toegeskryf is.

Beide Chang et al. (2004) en Creytens et al. (2017) se fokus was op epoksieharse as prosesmateriaal en daar is bevind dat dit tot allergiese kontakdermatitis kan lei (Chang, et al., 2004; Creytens, et al., 2017). In die studie deur Chang et al. (2004) is bevind dat die operateur kontakdermatitis op beide hande asook die vingerpunte ontwikkel het. In die twee gevalle waarna Creytens et al. (2017) gekyk het, is daar bevind dat die eerste pasiënt allergiese kontakdermatitis op die gewrig, hande en voorarm ontwikkel het, wat verder na die gesig, nek, ore, bene en buik versprei het. Die tweede pasiënt (operateur) vanaf dieselfde laagvervaardigingsmaatskappy het allergiese kontakdermatitis op die agterkant van die hande ontwikkel, wat later na die voorarm en buik versprei het (Creytens, et al., 2017).

'n Studie deur Chan et al. (2018) het deur vraelyste data ingesamel van altesaam 46 werkers wat met verskeie polimere soos PLA, ABS en nylon werk. Daar is bevind dat 57% van die deelnemers wat vir meer as 40 uur per week gewerk het verskeie simptome ervaar het, waaronder asma, allergiese rinitis, nasale drukking, hoes en jeukende neuse en oë van die simptome was. Die studie deur Gümperlein et al. (2018) het die teenoorgestelde as Chan et al. (2018) bewys, waar geen beduidende veranderinge in spirometriese, nasale of urinêre inflammatoriese biomerkers waargeneem is nie. Die 13 manlike en 13 vroulike proefpersone is vir ongeveer 'n uur tydens materiaalekstrusie aan ABS/PLA blootgestel. Daar was slegs 'n klein toename in gedeeltelik uitgeasemde stikstofoksied (FeNO), wat toegeskryf is aan eosinofiliese longinflammasie as gevolg van die blootstelling aan ultrafyn partikels (Gümperlein, et al., 2018).

Nuwe innoverende laagvervaardigingsmasjiene en proses-materiale bied 'n uitdaging aan beroepshigiëniste om behoorlike standaarde/beheermaatreëls vir alle laagvervaar-digingsoperateurs op te stel. Daar is talle studies wat bevestig dat daar blootstelling plaasvind tydens verskeie laagver-vaardigingsprosesse, maar ongelukkig bestaan daar tans nie opleidingsvoorskrifte spesifiek vir laagvervaardiging nie (Graff, et al., 2017; Ljunggren, et al., 2019; Stefaniak, et al., 2021). Laagvervaardigingsinstansies en laagvervaardigingswerks-plekke kan die toepaslike wetgewing raadpleeg, wat die volgende bepaal: Regulasie 3 van die Suid-Afrikaanse Regulasies op Gevaarlike Chemiese Stowwe (2021) bepaal dat 'n werkgewer moet verseker dat 'n werker – in die geval waar die laag-vervaardigingsoperateur moontlike blootgestel kan word aan 'n gevaarlike chemiese stof (prosesmateriaal) – die nodige opleiding ontvang. Volgens Regulasie 4 van hierdie Regulasies het die werker (laagvervaardigingsoperateur) ook die verant-woordelikheid om die opdragte van 'n werkgewer vir die voorkoming van vrystelling en gevolglike blootstelling aan stowwe te volg, die korrekte persoonlike beskermende toerusting te dra, behoorlike huishoudingsprosedures in die werkplek te volg, en om te hou by die inligting en opleiding wat deur die werkgewer verskaf word.

Beperkings

1. Beperkings in die literatuur sluit dikwels in dat studie-populasies nie baie groot is nie, wat toegeskryf kan word aan die feit dat laagvervaardiging 'n spesialisveld is en slegs een of twee operateurs op 'n slag benodig.
2. Die tempo waarteen laagvervaardigingprosesmateriale en masjinerie ontwikkel word, maak dit moeilik om konstante data-insameling uit te voer.
3. Standaardisering van data-insameling is nodig om studies beter met mekaar te kan vergelyk.
4. Elke instansie of omgewing waar 'n masjien gebruik word, verskil ten opsigte van grootte, ventilasie en beskikbare persoonlike beskermende toerusting en daarom is dit feitlik onmoontlik om 'n enkele stel gepaste beheermaatreëls te hê.
5. Studies met metaalpoeiers is meestal verbruiker-/pasiënt-spesifiek, met hoë koste daaraan verbonde, dus kan daar nie altyd herhaaldelik onderdele gedruk word om operateurblootstelling te toets nie.
6. Nie alle proseskategorieë en materiale is al ondersoek nie.

Toekomstige studies

1. Poeierkarakterisering van elke prosesmateriaal beskikbaar in Suid-Afrika kan gedoen word.
2. Studies kan gedoen word oor insette rakende beheermaat-reëls in 'n vroeë stadium tydens die ontwikkeling en produksie van laagvervaardigingsmasjiene in Suid-Afrika.

Tabel II: Gepubliseerde gesondheidseffekte van verskillende proseskategorieë met verskeie materiale.

Proseskategorie	Gerapporteerde gesondheidseffek	Proses-materiaal	Verwysings
Fotopolimerisasie	Allergiese kontakdermatitis	Epoksieharse	Chang, et al., 2004
Poeierbedsamesmelting	Chroniese hipersensitiewe pneumonie	Nylon	Johannes, et al., 2016
Materiaalekstrusie	Werkverwante asma	ABS	House, et al., 2017
*	Allergiese kontakdermatitis	Epoksieharse	Creytens, et al., 2017
Materiaalekstrusie	#Akute hipertensie	ABS	Stefaniak, et al., 2017
Verskeie prosesse	Respiratoriese simptome, waaronder asma en allergiese rinitis	Verskeie materiale	Chan, et al., 2018
Materiaalekstrusie	Eosinofiliese longinflammasie	ABS, PLA	Gümperlein, et al., 2018
Materiaalekstrusie	# Pulmonale en sistemiese toksisiteit	ABS	Farcas, et al., 2020

[*]Geen verwysing na die spesifieke proseskategorie in die studie nie.
[#]Studie met rotte.

3. Studies oor dermale blootstelling ontbreek nog en daar sal in die toekoms gekyk kan word na dermale blootstelling van die laagvervaardigingsoperateur, veral as daar met epoksieharse gewerk word.

Ten slotte

Terwyl dit duidelik is dat navorsing oor laagvervaardiging gefokus is op verbetering van die materiale, toepassing van die onderdele en ontwerpe, is daar steeds 'n leemte rakende ondersoek na die potensiële gesondheidsrisiko's van laagvervaardiging. Die groei en ontwikkeling van laagvervaardiging beteken dat alle rolspelers wat by laagvervaardiging betrokke is (met inbegrip van poeiervervaardigers sowel as verskaffers en operateurs van laagvervaardigingsmasjiene), noodsaaklike opleiding rakende hul gesondheid en die veilige uitvoering van take moet ontvang.

Hierdie literatuurstudie het 'n breë oorsig van laagvervaardiging en die gebruike daarvan in Suid-Afrika sowel as bewusmaking van beroepsgesondheid in die laagvervaardigingsbedryf ten doel gehad. Die vooruitsigte vir laagvervaardiging in Suid-Afrika sluit die ontwikkeling van opleidingsprogramme vir laagvervaardigingsoperateurs in ten einde veilig met grondstowwe en masjiene te kan werk. Die uitdaging lê egter daarin dat beheermaatreëls materiaal-, masjien-, prosesfase- en areaspesifiek moet wees.

Erkenning

Die skrywers bedank die Departement van *Wetenskap en Innovasie* (DSI) vir hul finansiële ondersteuning.

Mededingende belange

Die skrywers verklaar geen botsing van belange nie.

ORCID

S du Preez https://orcid.org/0000-0002-7468-3874
J du Plessis https://orcid.org/0000-0002-4835-7100
J Fourie https://orcid.org/0000-0001-9796-4153
D de Beer https://orcid.org/0000-0003-0175-9556

Datums

Ontvang: 23/06/2022
Aanvaar: 17/10/2022
Gepubliseer:

Bibliografie

Alabi, O., de Beer, D., Wichers, H., 2019, Applications of additive manufacturing at selected South African universities: promoting additive manufacturing education, *Rapid Prototyping Journal* 4, 752-764. https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2018-0216.

Afshar-Mohajer, N., Wu, C.Y., Ladun, T., et al., 2015, Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer, *Building and. Environment* 93, 293-301. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.013.

Azimi, P., Fazli, T., Stephens, B., 2017, Predicting concentrations of ultrafine particles and volatile organic compounds resulting from desktop 3D printer operation and the impact of potential control strategies, *Journal of Industrial Ecology*, 21,107-119. https://doi.org/10.1111/jiec.12578.

Baddoo, N.R., 2008, Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities, *Journal of Constructional Steel Research* 64, 1199-1206. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.011.

Bari, M.A., Kindzierski, W.B., Wallace, L.A., et al., 2015, Indoor and outdoor levels and sources of submicron particles (PM1) at homes in Edmonton, Canada, *Environmental Science and Technology* 49, 6419-6429. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01173.

Bau, S., Rousset, D,. Payet, R., et al., 2020, Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 17, 59-72. https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1696969.

Becker, T.H., Beck, M., Sceffer, C., 2015, Microstructure and mechanical properties of Direct metal Laser Sintered TI-6AL-4V, *South African Journal of Industrial Engineering* 26, 1-10. https://doi.org/10.7166/26-1-1022.

Bharti, N., Singh, S., 2017, Three-dimensional (3D) printers in libraries: Perspective and preliminary safety analysis, *Journal of Chemical Education* 9, 879-885. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00745.

Blackbeard, G., 2021, Southern implants in focus newsletter, January 2021. https://southernimplants.com/january-2021-southern-implants-in-focus-newsletter/.

Bourell, D., Kruth, J.P., Leu, M., et al., 2017, Materials for additive manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, 659-681. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009.

Bours, J., Adzima, B., Gladwin, S., et al., 2017, Addressing hazardous implications of additive manufacturing, *Journal of Industrial Ecology* 21, 25-36. https://doi.org/10.1111/jiec.12587.

Booysen, G., van der Merwe, A., de Beer, D., 2019, Additive manufacturing for sustainable custom-designed implants, *South African Journal of Industrial Engineering* 3, 21-31. https://doi.org/10.7166/30-3-2266.

Brown, J.S., Gordon, T., Price, O., et al., 2013, Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment, *Particle and Fibre Toxicology* 10, 1-12. https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-12.

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., et al., 2017, Overview on additive manufacturing technologies, *In Proceedings of the IEEE* 593-612. https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098.

Campbell, I., Bourell, D., Gibson, I., 2012, Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age, *Rapid Prototyping Journal* 18, 255-258. https://doi.org/10.1108/13552541211231563.

Campbell, R., 2021, Additive manufacturing in South Africa boosted by local technology developments, *Creamer Media's Engineering News.* https://www.engineeringnews.co.za/article/additive-manufacturing-in-south-africa.

CEN European Committee for Standardization (1993): Workplace atmospheres-size fraction definitions for measurement of airborne particles (Report No. BS EN 481). London, England, British Standards Institute.

Chan, F.L., House, R., Kudla, I., et al., 2018, Health survey of employees regularly using 3D printers, *Occupational Medicine* 68, 211-214. https://doi.org/10.1093/occmed/kqy042.

Chang, T.Y., Lee, L.J., Wang, J.D., et al., 2004, Occupational risk assessment on allergic contact dermatitis in a resin model making process, *Journal of Occupational Health* 46, 148-152. https://doi.org/10.1539/joh.46.148.

Chen, L., He, Y., Yang, Y., et al., 2017, The research status and development trend of additive manufacturing technology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89, 3651-3660. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9335-4.

Chohan, J.S., Singh, R., 2017, Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal* 23, 495-513. https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2015-0059.

Creytens, K., Gilissen, L., Huygens, S., et al., 2017, A new application for epoxy resins resulting in occupational allergic contact dermatitis: the three-dimensional printing industry, *Contact Dermatitis* 77, 349-351. https://doi.org/10.1111/cod.12840.

Culmone, C., Smit, G., Breedveld, P., 2019, Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review, *Additive Manufacturing* 27, 461-473. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.015.

Davies, S., 2018, Siemens invests £27m in 3D printing facility for UK-based materials solutions business, *TCT Magazine*. https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/siemens-27m-3d-printing-facility-materials-solutions.

Davis, J.R., 1994, Stainless Steels: ASM specialty handbook. Ohio: ASM International.

Davis, J.R., 200 Alloying: Understanding the basics. Ohio: ASM International., https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976.

Donachie, M.J., 2000, Titanium: a technical guide. Ohio: ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.tb.ttg2.9781627082693.

Du Plessis, J., Du Preez, S., Stefaniak, S.B., 2022, Identification of effective control technologies for additive manufacturing, *Journal of Toxicology and*

Environmental Health 25, 211-249. https://doi.org/10.1080/10937404.2022.2092569.

Du Preez, W., Damm, O., van Vuuren, D., 2011, Progress towards a titanium metal industry for South Africa, Paper presented at the 12th World Conference on Titanium, 19-24 June 2011, Beijing, China.

Du Preez, W., 2014, Beneficiation of South Africa's titanium resource, Presentation delivered at the Science Councils' Symposium, Central University of Technology, 17 September 2014, Bloemfontein, South-Africa.

Du Preez, W., de Beer, D., 2015, Implementing the South African additive manufacturing technology roadmap - The role of an additive manufacturing centre of competence, *South African Journal of Industrial Engineering* 2, 85-92. https://doi.org/10.7166/26-2-1179.

Du Preez, S., Johnson, A., LeBouf, R.F., et al., 2018, Exposures during industrial 3-D printing and post-processing tasks, *Rapid Prototyping Journal* 24, 865-871. https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0050.

Dutta, B., Froes, F.H., 2017, The additivemanufacturing (AM) of titanium alloys, *Metal Powder Report* 72, 97-106. https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062.

Elliot, A.M., Love, L.J., 2016, Operator burden in metal additive manufacturing. In Solid Freeform Fabrication 2016, Presentation delivered at the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. https://www.osti.gov/biblio/1333085.

Elserougy, S., Mahdy-Abdallah, H., Hafez, S.F., et al., 2015, Impact of aluminum exposure on lung, *Toxicology and Industrial Health* 31,73-78. https://doi.org/10.1177/0748233712468021.

Farah, S., Anderson, D.G., Langer, R., 2016, Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review, *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, 367-392. https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012.

Farcas, M.T., McKinney, W., Qi, C., et al., 2020, Pulmonary and systemic toxicity in rats following inhalation exposure of 3-D printer emissions from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament, *Inhal Toxicol* 32, 403-418. https://doi.org/10.1080/08958378.2020.1834034.

Floyd, E.L., Wang, J., Regens, J.L., 2017, Fume emissions from a low-cost 3-D printer with various filaments, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 14, 523-533. https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1302587.

Floros, N., 2018, Welding fume main compounds and structure, *Weld World* 62, 311-316. https://doi.org/10.1007/s40194-018-0552-3.

Froes, F.H., 2015, Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications. Ohio: ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmpa.9781627083188.

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., et al., 2015, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design* 69, 65-89. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001.

Gardner, L., Insausti, A., Ng, K.T., et al., 2010, Elevated temperature material properties of stainless steel alloys, *Journal of Constructional Steel Research* 66, 634-647. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.12.016.

Garlotta, D., 2001, A literature review of poly (lactic acid), *Journal of Polymers and the Environment* 9, 63-84. https://doi.org/10.1023/A:1020200822435.

Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010, Additive manufacturing technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9.

Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2015, Additive manufacturing technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3.

Goso, X., Kale, A., 2011, Production of titanium metal powder by the HDH process, *Journal fo the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 111, 203-210.

Goswami, S.S., Jena, S., Behera, D.K., 2022, Selecting the best AISI steel grades and their proper heat treatment process by integrated entropy - TOPSIS decision making techniques, *Materials Today: Proceedings* 60, 1130-1139. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.286.

Graff, P., Stahlbom, B., Nordenberg, E., et al., 2016, Evaluating measuring techniques for occupational exposure during additive manufacturing of metals, *Journal of Industrial Ecology* 11, 120-129. https://doi.org/10.1111/jiec.12498.

Greyling, H., de Beer, D., du Preez, W., et al., 2017, A South African Additive Manufacturing Strategy, Global trends and South African opportunities. Presentation delivered at the 6th CSIR Conference. 5-6 October 2017, Pretoria, South Africa.

Gümperlein, I., Fischer, E., Dietrich-Gümperlein, G., et al., 2018, Acute health effects of desktop 3D printing (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and Polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers, *Indoor Air* 28(4), 611-623. https://doi.org/10.1111/ina.12458.

Harris, R.M., Williams, T.D., Waring, R.H., et al., 2015, Molecular basis of carcinogenicity of tungsten alloy particles, *Toxicology and Applied Pharmacology* 283, 223-233. https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.01.013.

Hazardous Chemical Agents Regulations (HCAR) (2021): Act 85 of 1993. Department of Labour (DOL). Available at:http://www.labour.gov.za/ documents/Health-and-safety-act-2021/index.html (accessed 19 10 September 2022).

Herrick, D., Klein, R., 2016, Emerging health and safety issues in makerspaces. Presentation delivered at the 1st International Symposium on Academic Makerspaces (ISAM), 24-27 September, 2017, Cleveland, Ohio, USA.

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., et al., 2016, Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia* 117, 371-392. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019.

House, R., Rajaram, N., Tarlo, S.M., 2017, Case report of asthma associated with 3D printing, *Occupational Medicine* 67, 652-654. https://doi.org/10.1093/occmed/kqx129.

International Organization for Standardizations/American Society of Testing Materials (ISO/ASTM) (2015). Additive Manufacturing - General principles - Terminology (ISO/ASTM 52900) [Standard] Geneva, Switzerland: ISO/ASTM.

Jang, S., Park, S., Bae, C.J., 2020, Development of ceramic additive manufacturing: process and materials technology, *Biomedical Engineering Letters* 10, 493-503. https://doi.org/10.1007/s13534-020-00175-4.

Jiang, C.P., Hentihu, M.F.R., Cheng, Y.C., 2021, Development of 3D slurry printing technology with submersion-light apparatus in dental application, *Materials* 14, 7873. https://doi.org/10.3390/ma14247873.

Johannes, J., Rezayat, T., Wallace, W.D., et al., 2016, Chronic hypersensitivity pneumonitis associated with inhaled exposure to nylon powder for 3-D printing: A variant of nylon flock worker's lung disease? Presentation delivered at the international American Thoracic Society conference, May 13-18, 2016, San Francisco, USA.

Junk, S and Tränkle, M., 2011, Design for additive manufacturing technologies: New applications of 3D-printing for rapid prototyping and rapidtooling. In Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Copenhagen, Denmark, 15-19 August 2011, pp. 12-18.

Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T.G., et al., 2017, Environmental dimensions of additive manufacturing, *Journal of Industrial Ecology* 21, 49-68. https://doi.org/10.1111/jiec.12629.

Kim, Y., Yoon, C., Ham, S., et al., 2015, Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation, *Environmental Science and Technology* 49, 12044-12503. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02805.

Kracke, A., 2010), Superalloys, the most successful alloy system of modern times - past, present and future. In Superalloy 718 and Derivatives: Presentation delivered at the 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. https://doi.org/10.7449/2010/Superalloys_2010_13_50.

Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., et al., 2021, Additive manufacturing of advanced ceramic materials, *Progress in Materials Science* 116, 100736. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736.

Langefeld, B., 2014, Additive manufacturing: A game changer in the manufacturing industry? Presentation deliverd at the 11th Rapid.Tech, 14-15 May 2014, Erfurt, Germany.

Li, Z., Zhang, R., Zha, Q., et al., 2014, Composition design of superhigh strength maraging stainless steels using a cluster model, *Progress in Natural Science: Materials International* 24, 35-41. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.01.010.

Li, C., Liu, Z.Y., Fang, X.Y, et al., 2018, Residual stress in metal additive manufacturing, *Procedia Cirp* 71, 348-353. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.039.

Ljunggren, S.A., Karlsson, H., Ståhlbom, B., et al., 2019, Biomonitoring of metal exposure during additive manufacturing (3D printing), *Safety and health at work* 10, 518-526. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2019.07.006.

Lo, K.H., Shek, C.H., Lai, J.K.L., 2009, Recent developments in stainless steels, *Material, Science and Engineering: R: Reports* 65, 39-104. https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001.

Maynard, A.D. and Kuempel, E.D., 2005, Airborne nanostructured particles and occupational health, *Journal of Nanoparticle Research* 7, 587-614. https://doi.org/10.1007/s11051-005-6770-9.

Mendes, L., Kangas, A., Kukko, K., et al., 2017, Characterization of emissions from a desktop 3D printer, *Journal of Industrial Ecology* 21, 94-106. https://doi.org/10.1111/jiec.12569.

Monzón, M.D., Ortega, Z., Martinez, A., et al., 2015, Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76, 1111-1121. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1.

Neff, C.M. and Trapuzzano, N.B., 2016, Crane: Impact of vapor polishing on surface roughness and mechanical properties for 3D printed ABS. In Solid Freeform Fabrication 2016, Paper presented at the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 2016. pp. 2295-2304.

Niendorf, T., Krooß, P., Somsen, C., et al., 2015, Martensite aging - Avenue to new high temperature shape memory P. alloys, *Acta Materialia* 89, 298-304. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.01.042.

OEC (Observatory of Economic Complexity), 2020. Titanium Ore in South Africa (2022). https://oec.world/en/profile/bilateral-product/titanium-ore/reporter/zaf.

Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C.H., et al., 2003, Titanium alloys for aerospace applications, *Advanced Engineering Materials* 5, 419-427. https://doi.org/10.1002/adem.200310095.

Petretta, M., Desando, G., Grigolo, B., 2019, 3D printing of musculoskeletal tissues: Impact on safety and health at work, *Journal of Toxicology and Environmental Health A* 16, 891-912. https://doi.org/10.1080/15287394.2019.1663458.

Prasad, S., Ehrensberger, M., Prasad-Gibson, M., et al., 2015, Biomaterial properties of titanium in dentistry, *Journal of Oral Biosciences* 57, 192-199. https://doi.org/10.1016/j.job.2015.08.001.

Rejeski, D., Zhao, F., Huang, Y., 2018, Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 19, 21-28. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019.

Roberson, D.A., Espalin, D., Wicker, R.B., 2013, 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model, *Virtual and Phys Prototyp* 8, 201-212. https://doi.org/10.1080/17452759.2013.830939.

Roberts, G., Krauss, G., Kennedy, R., 1998, Tool steels. Ohio: AMS International. https://doi.org/10.31399/asm.tb.ts5.9781627083584.

Roth, G.A., Geraci, C.L., Stefaniak, A., 2019, Potential occupational hazards of additive manufacturing, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 5, 321-28. https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1591627.

Short, D., Sirinterlikci, A., Badger, P., et al., 2015, Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal* 21, 105-110. https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2012-0111.

Sing, L.S., An, J., Yeong, W.Y., et al., 2016, Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs, *Journal of Orthopaedic Research* 34, 369-385. https://doi.org/10.1002/jor.23075.

Stefaniak, A.B, LeBouf, R.F., Yi, J., et al., 2017, Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional printer, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 14, 540-550. https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1302589.

Steinle, P., 2016, Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 13, 121-132. https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1091957.

Stephens, B., Azimi, P., Orch, E.Z., et al., 2013, Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers, *Atmospheric Environment* 79, 334-339. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.050.

Stone, V., Miller, M.R., Clift, M.J.D., et al., 2017, Nanomaterials versus ambient ultrafine particles: An opportunity to exchange toxicology knowledge, *Environmental Health Perspectives* 125, 1-17. https://doi.org/10.1289/EHP424.

Teixeira, O., Silva, F.J.G., Ferreira, L.P., et al., 2020, A review of heat treatments on improving the quality and residual stresses of the Ti-6Al-4V parts produced by additive manufacturing, *Metals* 10, 1006. https://doi.org/10.3390/met10081006.

Timms, S., 2017, IDC approves R17m deal to fund SA's first 3D metal printer. https://ventureburn.com/2017/04/idcs-r17m-deal-fund-sas-first-3d-metal-printer/.

Van Zyl, I., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., 2016, Residual stress in Ti6al4v objects produced by Direct Metal Laser Sintering, *South African Journal of Industrial Engineering* 27, 134-141. https://doi.org/10.7166/27-4-1468.

Venuvinod P.K., Ma, W., 2004, Rapid prototyping. Laser-based and other technologies. London, UK: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6361-4.

Viitanen, A.K., Uuksulainen, S., Koivisto, A.J., et al., 2017, Workplace measurements of ultrafine particles - A literature review, *Ann Work Expo Health* 61, 749-758. https://doi.org/10.1093/annweh/wxx049.

Wang, G., Yan, Y., Li, J., et al., 2013, Microstructure effect on hydrogen-induced cracking in TM210 maraging steel, *Materials Science and Engineering A* 586, 142-148. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.097.

Wang, J.C., Dommati, H., Hsieh, S.J., 2019, Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103, 2627-2647. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03669-3.

Wohlers, T., Caffery, T., 2015, Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Colorado: Wohlers Associates, Inc.

Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., et al., 2017, Wohlers report 2017: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Colorado: Wohlers Associates, Inc.

Wojtyła, S., Klama, P., Baran, T., 2017, Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 14, 80-85. https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489.

Wong, K.V., Hernandez, A., 2012, A review of additive manufacturing, *ISRN Mechanical Engineering* 16,1-10. https://doi.org/10.5402/2012/208760.

Wu, H., Fahy, W.P., Kim, S., 2020, Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing, *Progress Material Science*, 111, 1-47. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100638.

Yi, J., LeBouf, R.F., Duling, M.G., et al., 2016, Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 79, 453-465. https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1166467.

Zelinski, P., 2021, Metal AM: Is welding the way in? https://www.additivemanufacturing-.media/post/metal-am.

Zhang, Q., Wong, J.P.S., Davis, A.Y., et al., 2017, Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers, *Aerosol Scieince and Technology* 51, 1275-1286. https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1342029.

Zhang, Q., Pardo, M., Rudich, Y., et al., 2019, Chemical composition and toxicity of particles emitted from a consumer-level 3D printer using various materials, *Environmental Science and Technology* 53, 12054-12061. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04168.