

Guideline för bearbetning och slutförande av AM- komponenter



Författare: David Franklin (SWERIM), Eric Redegren (SWERIM), Markus Uhlirsch (SWERIM), Mikael Wistrand (3M),
Medel från: Det strategiska innovationsprogrammet Metalliska material, en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten.

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	3
Inledning	4
Design	5
Spänningar	5
Orientering.....	5
Stödstruktur	5
Optimering.....	5
Material – Pulvers egenskaper med avseende på AM tillverkning	7
Inköp av pulver	8
Printer-metod.....	9
Värmebehandling	10
Avspänningsglödning	10
HIP	10
Lösning, släckning och värmebehandling	10
Bearbetning	11
Borttagning av byggplatta	13
Positionering och fixturering	13
Slipning	14
Val av slipskiva	14
Slipmedel.....	14
Kornstorlek.....	14
Hårdhet	15
Struktur/porositet.....	15
Bindemedel.....	15
Fräsning och svarvning.....	16
Bearbetningsrekommendationer.....	17
Hårda och nötningsbeständiga material.....	17
Slipning	17
Fräsning	17
Referenser.....	18

Inledning

Denna guideline har skapats genom forskningsprojektet Machining of AM components (MacAM) som har finansierats av Vinnova, Energimyndigheten och Formas inom ramen för det strategiska innovationsprogrammet Metalliska Material. Projektet har genomförts av metallforskningsinstitutet SWERIM tillsammans med företag från den svenska industrin.

Denna guideline riktar sig framför allt till företag och personer som tänker implementera Additiv Manufacturing (AM) i sin produktion, med kunskap och information om de olika steg i AM processen som behöver beaktas för att en komponent skall kunna tillverkas och slutföras. Större delen av guidelinen är tillägnad bearbetning av AM komponenter och vilka utmaningar som finns inom detta. Avslutningsvis finns det ett kapitel om bearbetningsrekommendationer för hårda och nötningsbeständiga AM material.

De företag och personer som har deltagit i projektet är Swerim AB (David Franklin/Ulrika Brohede), Sandvik Coromant AB (Sinuhé Hernández), VBN Components AB (Kristoffer Cederferm/Ulrik Beste), 3M Svenska AB (Mikael Wistrand, Torbjörn Skepp, Mats Johansson)

Med ett särskilt tack till Manufacturing Guide (Hans Bergmark) för användning av bildmaterial.

Design

Designen av en AM komponent är det steg i processen som har störst påverkan på de kommande stegen i tillverkningen. Om alla påföljande operationer som krävs för att slutföra komponenten beaktas så är sannolikheten större att den modell som tillverkas kommer att kunna skapas inom en rimlig budget.

I Tabell 1 finns en checklista som bör beaktas under designen av komponenten för att alla faktorer som kan påverka tillverkningen ska finnas med i CAD modellen.

Spänningar

Spänningar uppkommer naturligt när material hettas upp och sedan svalnar, detta sker en, eller ett flertal gånger i AM-printning med metaller. När metallen värms upp så expanderar volymen för att sedan dra ihop sig vid avsvälning, framför allt avsvälningen är geometriskt styrd genom hur värmen leds bort ur materialet. Olika delar av komponenten kommer att få olika spänningar bland annat beroende på hur lång tid det tar för lagret att svalna.

Spänningarna kan minskas eller styras genom olika mönster för nedsmältningen av materialet [REN17].

Diskutera olika printningsmönster med maskintillverkare och materialtillverkare för er applikation.

Orientering

Orienteringen av komponenten under printningen har ett stort inflytande på ytfinheten av biten. Horisontella/vertikala ytor blir finare än icke horisontella/vertikala ytor, detta ger en direkt inverkan på både ytans utseende och behovet av stödstruktur. Orienteringen bör sättas för att få den stabilaste printningen med så lite stödstruktur som möjligt. När ett lager i pulverbädden smälts så stöds den underifrån av föregående lager, om det blir överhäng från det föregående lagret så kommer detta stöd att saknas. Olika printningsmetoder samt olika material kommer att bete sig olika vid överhäng av modellen, samt vid vilka vinklar på modellen som räknas som överhäng. Stora överhäng kräver extra stödstruktur för att inte hela komponenten skall vrida sig på grund av spänningar eller tyngden som inte får stöd av den underliggande pulverbädden.

- Eftersträva att designa självstödande komponenter (minska behovet av stödstruktur).
- Orienteringen kommer påverka byggtid och kostnad.
- Komplexa geometrier kan vara svåra att orientera och kan behöva designas om.

Stödstruktur

Stödstruktur skall i största mån undvikas då det tillkommer ytterligare kostnader i form av borttagning och det extra material som går åt för att bygga dessa strukturer. Vid vissa tillfällen kommer det inte att gå att undvika stödstruktur, som nämnts i orientering så finns det olika krav på när stödstruktur krävs men i de flesta fall så krävs det när lutningen överstiger 45° [MacAM].

Stödstruktur kan utnyttjas för att leda bort värme bättre, vilket kan krävas vid olika geometriförändringar av komponenten.

Det finns ett antal olika varianter av stödstruktur som kan utnyttjas i olika beredningsprogram för AM tillverkning, hitta det program som passar era applikationer bäst.

Vid borttagning av stödstruktur kan synliga spår ofta bli kvar på ytan, försök att undvika att placera stödstruktur på synliga kosmetiska ytor som inte skall bearbetas.

- Undvik hög stödstruktur
- Undvik lutningen som överstiger 45°
- Designa stora hål så att de inte kräver stödstruktur
- Planera den stödstruktur som krävs så att den enklast möjligt går att bearbeta bort

Optimering

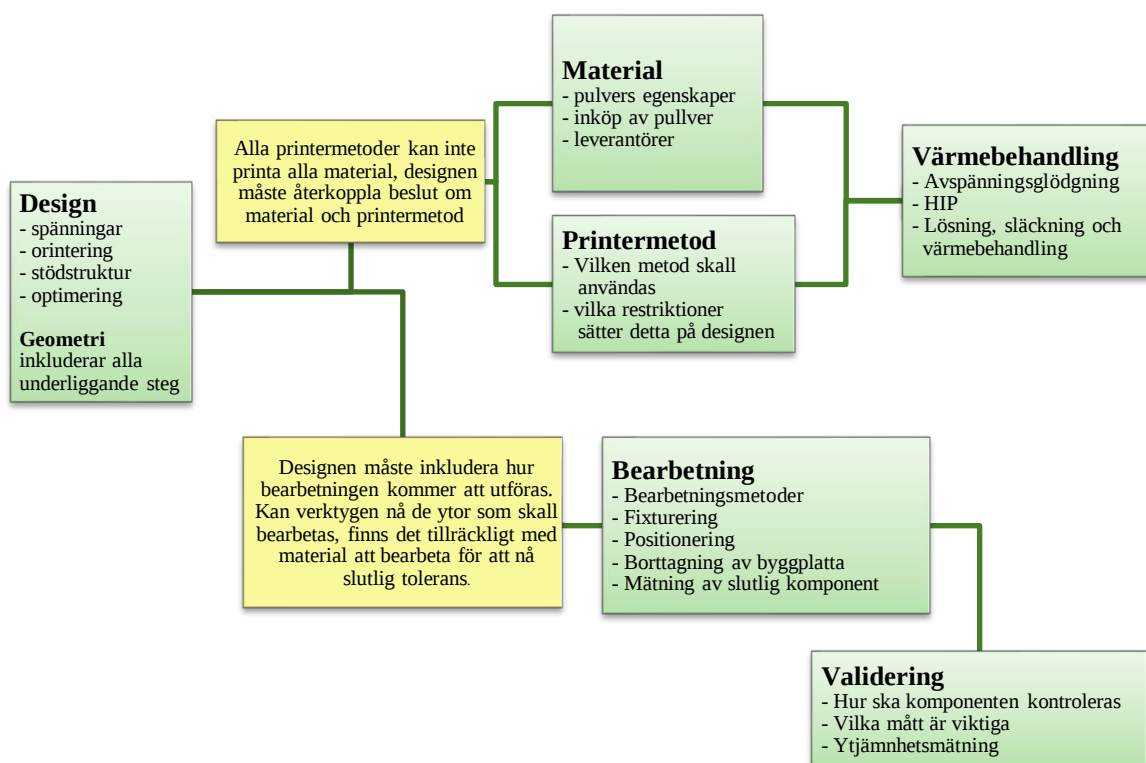
Optimeringsprogram för AM tillverkning skapar nya möjligheter för att förbättra komponenter och överföra tidigare maskinbearbetade delar till helt AM tillverkade motsvarigheter. Dessa program tar i beaktan vilka ytor som skall vara lastbärande och genom FEM analys rekommenderar de en ny design som ofta har ett organiskt utseende. Beroende på hur dessa program är utformade och hur mycket tid som läggs på gränsvärden vid analysen som skapar modellen så kan modellen behöva justeras ytterligare för att kunna byggas med så lite stödstruktur som möjligt.

- Optimera så att de funktionsytor som behöver bearbetas kan nås med de verktyg som krävs.
- Lägg till mer material på de ytor som kräver bearbetning
- Designa om modellen om det är för mycket stödstruktur.
- Gör modellen så tunnväggig som möjlig utan att påverka dess mekaniska egenskaper.

Under designen så är det mycket viktigt att beakta hur komponenten skall bearbetas och slutföras så att påföljande steg går att genomföra.

Se Tabell 1 för en checklista som bör gås igenom under designen.

Tabell 1, Flödesschema för de faktorer som bör beaktas under designen av AM komponenter



Material – Pulvers egenskaper med avseende på AM tillverkning

Egenskaperna hos metallpulverråvaran som används för pulverbaserad AM påverkar starkt kvaliteten på de byggda delarna [Voc19]. I pulverbäddsfusionsprocesser (PBF) appliceras olika pulverlager, varigenom pulvereenskaperna påverkar pulvrets spridningsbeteende [Daw15]. En högre packningstäthet och homogenitet hos pulverskikten kan resultera i mindre defekter, en bättre processtabilitet och en högre densitet av byggda komponenter, vilket i sin tur leder till bättre egenskaper hos de producerade komponenterna [Cao15], [Daw15], [Gib10].

Prediktering av pulverprestanda i AM-processer är komplex och endast delvis möjlig genom användning av konventionella testmetoder eftersom de inte kan återge pulverapplikationens natur i AM-maskinen ordentligt [Eyn15]. Resultaten av dessa olika mättekniker är svåra att jämföra eftersom de mäter pulvret i olika spänningssituationer [Kra09]. I följande avsnitt listas några tumregler för de viktigaste pulvereenskaperna:

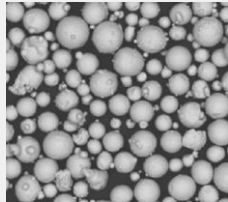
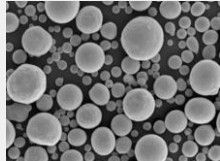
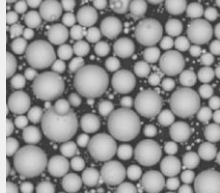
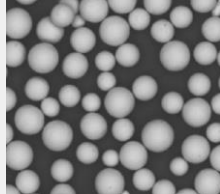
Tabell 2, Information om pulver

Rubrik	Beskrivning	källor
Allmänt	Tillräcklig spridning av prover och undvikande av kontaminering är en förutsättning för repeterbara resultat. Utgångsmaterialets egenskaper kan ändras under och efter en AM-byggprocess, så att återvinning inte alltid är ett alternativ av det ej printade materialet.	
Partikelstorleksfördelning (PSD)	Desto finare partiklarna är, desto mindre är: minsta skiktjocklek, minsta möjliga funktionsstorlek och ytjämnheten Grövre partiklar och pulver med en smalare PSD flyter ofta bättre. Pulver med bättre flytbarhet möjliggör en mer stabil rakning med bättre resultat. Grövre partiklar sprids ofta och packas bättre på grund av olika interpartikulära interaktioner jämfört med finare partiklar. Fina partiklar utgör särskilt hög risk för hälsa och säkerhet Fina partiklar är mer benägna att negativt påverka PBF-EB-processen Pulver med ett större partikelstorleksområde ökar pulverbäddens densitet och genererar tätare delar. Små partiklar kan fylla hålrummen mellan grövre partiklar, men ett överskott av finare partiklar kan leda till agglomerering, vilket försämrar packningen av pulverlagren Mätning av PSD: Laserdiffraktion, dynamisk bildanalys, siktning etc. Mätning av flytbarhet: Roterande trumanordningar (t.ex. Revolution Powder Analyzer), rheometer (viskositetsmätare), spridbarhetstest, tratt flödes hastighet, vilvinkel, skenbar och tappdensitet, skjuvceller etc. De flesta metoder har begränsad tillämplighet för pulver som används i AM processer.	[NiS7873] [Den18] [Daw15] [Wil11] [Yan17] [Ell16] [Spi09]
Partikelform (morfologi)	Mer sfäriska partiklar tenderar att flöda bättre och spridas och packas bättre än oregelbundet formade och ökar därigenom den slutliga densiteten av pulverlagren. Grova partikelytor eller mindre partiklar som fastnat på ytan av större partiklar (satellitpartiklar) kan under vissa omständigheter förbättra flytbarheten. Porer i partiklarna kan påverka materialegenskaperna. Stängd porositet kan leda till gasinneslutningar i delarna. Mätning: SEM (svepelektronmikroskop), dynamisk bildanalys etc.	[Sam15] [Ell16] [Niu99] [Kar99] [Daw15] [Che02] [Zhu17] [EPM19]
Kemisk sammansättning	Föroreningar kan påverka bearbetningen av pulvret, smältbeteendet och de kemiska och fysikaliska egenskaperna hos de tryckta delarna. Mätning: ICP, förbränning och fusionsteknik, GD-OES, etc.	[Sey12] [Ola15] [Tan15], [Kör16], [EPM19]
Övrigt	(magnetism, reflektionsförmåga, värmeledningsförmåga, etc.)	
Pulverhantering och lagring	Segregation, åldrande (ändrar fukttinnehåll och kemi), etc. kan påverka pulvereenskaperna Skyddsgas rekommenderas för att kontrollera fuktnivån och temperaturen Mätning: Karl-Fischer-titrering (fukttinnehåll) och kemiska metoder, se ovan, etc.	[EPM19]
Hälsö-, säkerhets- och miljöfrågor (icke uttömmande)	De nödvändiga åtgärderna i enlighet med gällande standarder och regler samt den senaste tekniken måste vidtas för att garantera en säker arbetsmiljö. Denna ansvarsfriskrivning är inte uttömmande. Pulver: Inandning, hud- eller ögonkontakt, metalltoxicitet etc. Bränder, dammexplosioner, kemiska reaktioner, halk etc. Maskiner: Lasrar, kvävning av inerta gaser, klämmriks, varma ytor, etc. Behov av korrekt pulverhantering under hålet AM-processkedjan inkl. avfallshantering, personlig skyddsutrustning (kläder, andning etc.)	

Inköp av pulver

Pulverproduktionen påverkar råmaterialet och därmed komponentegenskaperna. De viktigaste produktionsvägarna för AM-pulver sammanfattas i Tabell 3.

Tabell 3, Pulverproduktion

Metod / PSD	SEM bild (Ti64)	Fördelar/nackdelar för AM
Gas atomisering (inkl.EIGA) Ca. 0-500 µm [Daw15]	 [Daw15]	+ Mestadels sfäriskt pulver [Daw15] + Brett utbud av legeringar [Daw15] + EIGA kan bearbeta reaktiva pulver [Daw15] + atomisering under vakuum är möjligt - Innehåller satelliter [Med16] - Kan innehålla innesluten gas [Med16], vilket kan orsaka kvarvarande porositet i delarna
Centrifugal atomisering Ca. 0-600 µm [Daw15]	 [Den19]	+ Jämnare yta än gasatomisering [Med16] + Mycket få satelliter [Med16] - Ibland långsträckta partiklar [Med16] - Burken innehåller innesluten gas [Med16], vilket kan orsaka kvarvarande porositet i delarna
Plasma atomisering Ca. 0-200 µm [Daw15]	 [Daw15]	+ Mycket sfäriska pulver [Daw15] + Ingen inre porositet [Med16] - Behöver råvara som tråd eller pulver [Daw15] - Dyrt
Plasma roterande elektroprocess (PREP) Ca. 0-100 µm [Daw15]	 [Daw15]	+ Mycket sfäriska pulver [Med16] + Ingen inre porositet [Med16] + Inga satelliter [Kör16] - Låg produktivitet [Daw15] - Dyrt [Daw15]

Pulver kan anskaffas från leverantörer av AM-utrustning, tredjepartsleverantörer eller pulver-atomiserare [Daw15]. Ett urval av fördelar och nackdelar hos varje leverantör sammanfattas i Tabell 4

Tabell 4, Fördelar och nackdelar med att skaffa pulver från olika leverantörer [Daw15]

Leverantör	Fördelar (urval)	Nackdelar (urval)
AM Maskintillverkare	Standardmaskinsparametrar tillhandahålls och redo att användas för denna sats	Potentiellt högre kostnader
	Pulvret är "beprövat"	Begränsat urval av material
	Support vid byggproblem	Brist på spårbarhet
Validerad tredjepartsleverantör (Köper stora mängder från tillverkare och insistera på kvalitet som krävs för AM)	Pulver från hela pulverindustrin kan väljas	Brist på stöd från maskintillverkaren om en konstruktion misslyckas
	Olika "batch" storlekar	Potentiellt högre kostnader
	Pulvret är "beprövat"	Brist på spårbarhet
Pulvertillverkare	Potentiellt lägre kostnader	Brist på stöd från maskintillverkaren om en konstruktion misslyckas
	Val av legering och tillverkningsprocess	Ingen garanti för att materialet kommer att producera en framgångsrik byggnad
	Högre spårbarhet	Pulver kanske inte uppfyller AM-standarderna

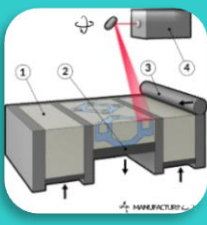
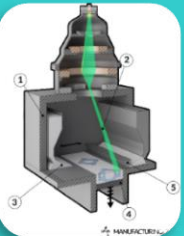
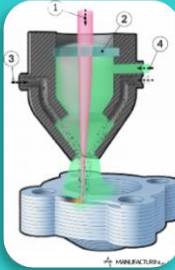
Printer-metod

Utvecklingen inom AM medför att nya maskiner och metoder uppstår som ökar produktivitet, utskrifts kvalitet och flexibilitet hela tiden. Den största andelen tekniker och maskiner finns inom segmentet pulverbäddsfusion, därefter kommer tillsats med tråd [AM21]. De lite mer ovanliga teknikerna använder material i form av (plåt, stång, fiber och pellets) dessa metoder baseras ofta på olika svetsprocesser.

Tabell 5 innehåller de vanligaste kommersiellt använda metoderna med de mest överskådliga fördelarna och nackdelarna i respektive metod.

- PBF-LB (Powder Bed Fusion – Laser Beam) (pulverbäddsfusion – laserstråle)
- PBF-EB (Powder Bed Fusion – Electron Beam) (pulverbäddsfusion – elektronstråle)
- Binder Jetting (bindemedelsstrålning)
- DED (Direct Energy Deposition) (direkt energideposition)

Tabell 5, Fördelar och nackdelar i kommersiellt vanliga AM metoder

	PBF-LB	PBF-EB	Binder Jetting	DED	Källor
					
Energikälla	Laser	Elektronstråle	Ugn	Laser, elektronstråle eller Ljusbåge	[Voc19]
Materialstorlek	Pulver 10-60 µm	Pulver 50-150 µm	Pulver < 25 µm	Pulver 44-150 µm Tillsatsstråd varierande storlek	[Voc19] [Nam18 - DED]
Atmosfär	Argon eller kväve	Vakuüm ¹	Luft	Skyddsgas eller vakuum ¹	[Dig20]
Ytjämnhet ²	0	-	+	-	
Upplösning	+	-	++	-	[Dig20]
Komponentstorlek (+ = större volym)	+	+	-	++	[Dig20]
Komponentens komplexitet	++	++	++	+3	[Dig20], [EPM19]
Produktivitet	0	+	+	++	[Dig20]
Fördelar	Brett utbud av maskiner finns tillgängliga	- Högre pulverbäddstemperatur möjliggör sprickfria delar av svårsvetsade legeringar - Vakuüm minimerar reaktioner och föroreningar	- Bäst upplösning och ytjämnhet - Ingen stödstruktur behövs	- Hög deponeringsgrad - Perfekt för reparation - Kan producera mycket stora delar	[AMF18], [EPM19]
Nackdelar	Restspänningar kräver värmebehandling	- Låg upplösning - Dålig yt-finish - Sintring av oanvänt pulver	- Sekundära processer efter utskrift krävs - Liten komponentstorlek - Ofta begränsade mekaniska egenskaper	- Låg upplösning - Dålig yt-finish - Begränsad delkomplexitet	[AMF18], [EPM19]

¹ Elektronstråleapplikationer kräver en vakuumkammare. Detta ger också en arbetsmiljö med hög renhet.

² Beroende på komponentens orientering och ytornas lutningsvinkel.

³ Inga tunna galler strukturer eller smala interna håligheter som kylkanaler [EPM19]

Värmebehandling

Efterbehandling av AM komponenter är lika viktigt som själva byggprocessen för att komponenten skall hålla för dess tilltänkta ändamål. Beroende av pulveregenskaper, byggprocess och syfte med komponenten så kommer det att finnas olika krav på värmebehandling, i många fall så är en viktig del att skapa rätt mikrostruktur i komponenten vilket påverkar de mekaniska egenskaperna [WES19].

Generella värmebehandlingsprocesser som används vid AM tillverkning är avspänningsglödning, (HIP) hot isostatic pressing och specifika behandlingar beroende på legeringen som används.

Avspänningsglödning

Som tidigare nämnt, skapas spänningar vid uppvärmning och kylning av metaller. Dessa spänningar kan få en komponent att ändra geometri vid bearbetning, när ytan förändras av bearbetningen så kan inbyggda spänningar vidare deformera komponenten. Vid höga spänningar kan borttagandet av byggplattan även medföra att geometrin ändras.

Av denna anledning kan avspänningsglödning behöva genomföras, denna process måste utföras på sådant sätt att oönskad rekristallisation eller fastransformation undviks.

HIP

HIP eller varm isostatisk pressning genomförs som behandling för att avlägsna ej yt-brytande porositet som kan uppstå under AM processen. Denna process är inte nödvändig för alla AM komponenter men används för högpresterande eller säkerhetskritiska delar som kräver ett homogent material ur hållfasthetssynpunkt.

HIP genomförs med en temperatur mellan $0.8\text{--}0.9 \times T_M$ (smälttemperaturen) som beror av materialet [Swerim]. Det pålagda trycket är jämnt fördelat över hela komponenten vilket medför en homogen krympning med målet att fylla ut de porer som finns. Den tredje parametern som är tid gör det möjligt att kontrollera diffusionseffekter och korntillväxt [WES19].

Den krympning som uppstår, beror på hur stor andel porositet som finns i material innan HIP genomförs.

Lösning, släckning och värmebehandling

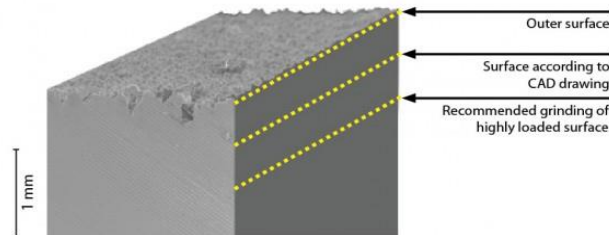
Upplösningsbehandling och släckning kan krävas av metalliska material som tidigare genomgått olika värmecykler som resulterat i missgynnsamma metalliska strukturer. Dessa kan uppstå vid HIP då svalningshastigheten inte är tillräckligt snabb för att skapa de faser som eftersträvas.

För att skapa den mikrostruktur som komponenten kräver för dess ändamål så används även åldring och anlöpning. Dessa processer är legeringsspecifika och kan dessutom skilja sig från värmebehandlingar som görs av samma legering i traditionella metoder [WES19].

- Diskutera med materialleverantören vad som krävs för behandlingar av den specifika legeringen.
- Vilka värmebehandlingar krävs för att komponenten skall uppnå sitt syfte och hur påverkar dessa designen av tunnväggig struktur eller andra geometriska mått.

Bearbetning

Vid bearbetning av AM-komponenter finns det ett flertal faktorer som måste beaktas och planeras för innan utskriften har genomförts. Beroende på vilken utskriftsmetod, material och värmebehandling som används så kommer komponenten få olika egenskaper både i matrisen och på ytan i form av mikrostruktur, restspänningar, ytjämnhet och hårdhet. Komponentens funktionsytor definieras av ytor med speciella krav för en viss funktion, tex. låg friktion eller passform för montering där höga toleranser för ytjämnhet definieras i designsteget. Dessa funktionsytor behöver bearbetas till den angivna toleransen vilket därmed kräver att mer material adderas till dessa ytor så att bearbetningen kan genomföras. Beroende av materialegenskaperna kommer olika bearbetningsdjup att rekommenderas från 0.5 till 1 mm för att säkerställa att alla yt-defekter avlägsnas, se Figur 1 [VBN, 2019].

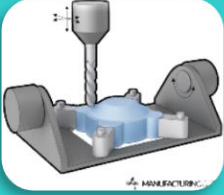
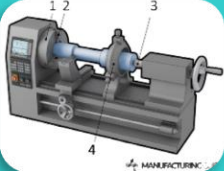
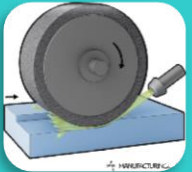


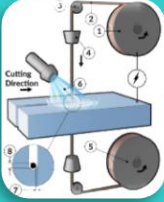
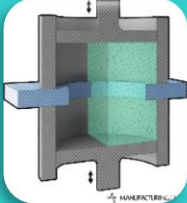
Figur 1, planerad bearbetningsdjup från ytan av en AM tillverkad komponent, från VBN 2019.

För de funktionsytor som skall tas fram ur en komponent så är slipning ofta den metod som används vid AM tillverkade komponenter, men även fräsning och svarvning används när komponentens geometri och material tillåter detta. Även tråd-gnistning eller sänk-gnistning kan utnyttjas för att säkerställa höga toleranser i komplicerade geometrier.

För övriga ytor som inte är direkta funktionsytor så kan annan bearbetning som inte är lika noggrann användas beroende på tillämpning. Sådana metoder kan vara kemisk vibrations slipning, blästring med olika typer av media eller interna kylkanaler och hål kan bearbetas med slipande flödesbearbetning (abrasive flow machining)

Tabell 6, vanliga bearbetnings-metoder

Bearbetning av funktionsytor		
Metod	Beskrivning	Fördelar/Nackdelar
Fräsning 	Fräsning är en användbar bearbetningsmetod som är väl lämpad för bearbetning av komplexa ytor med CNC maskiner. Att mäta in en fysisk komponent mot den CAD modell som maskinen skall följa är den mest komplicerade delen av denna process.	+ Standardoperation med bred kompetens inom industrin. + Komplicerade geometrier kan bearbetas i en fleraxlig fräs. + Hög noggrannhet. - Krävs en stabil fixturering för att minimera vibrationer. - kan bli dyrt om avancerade skär används som går sönder vid vibrationer eller intermittert bearbetning i den råa printade ytan. - Svårt att mäta in nollpunkten av CAD modellen i den verkliga komponenten.
Svarvning 	Om geometrin i en AM komponent tillåter rotationssymmetrisk bearbetning så är svarvning en mycket bra metod. Även här är fixtureringen en viktig del då backarna på en svarv kan få svårt att få grepp på en allt för rå yta.	+ Standardoperation med bred kompetens inom industrin. + Hög noggrannhet - Krävs en stabil fixturering för att minimera vibrationer. - Långa och smala komponenter riskerar att skapa vibrationer under bearbetning
Planslipning 	Planslipning använder slipskivor av olika sammansättningar beroende på vilket material som skall slipas. Slipskivan kan röra sig i ett plan med en noggrann matning i Z-led. Planslipning kan användas för att skapa en funktionsyta eller referensyta på komponenten för vidare bearbetning.	+ Hög noggrannhet - Beroende av geometrin så kan det vara svårt att få komponentens yta att ligga parallellt med slipskivan. - Det kan krävas praktiska tester för att optimera en slipprocess (dvs slipskiva och parametrar) för ovanliga AM legeringar - Fixturering kan vara utmanande för icke magnetiska material.

Fleroperationsslipning 	Fleroperationsslipning använder abrasiva slipverktyg med fleraxliga rörelser för bearbetning av komplexa geometrier. Detta är en vanlig process vid färdigställande av AM komponenter men har begränsningar i hur komplexa ytor som kan bearbetas då slipskivan måste ha geometrisk åtkomst.	+ Hög noggrannhet + Kan bearbeta flera ytor i samma uppspänning - Svårt att mäta in nollpunkten av CAD modellen i den verkliga komponenten om en komplex geometri finns. - Kan vara svårt att hitta rätt slipskiva för ovanliga AM legeringar.
Trådnistning 	Den tråd som skär i materialet används som elektrod och en gnista går mellan tråden och anoden (komponenten) och material avlägsnas från båda. Tillämpas ofta för att avlägsna byggplatta men kan med fördel användas för att bearbeta plana funktionsytor, flera passager över samma yta ökar ytjämnheten.	+ Hög noggrannhet. + Inget fysiskt tryck på komponenten, låga fixtureringskrav. + Mycket liten värmepåverkan eller mekanisk påverkan av ytan. + Skär i alla elektriskt ledande material - Svårt att mäta in nollpunkten av CAD modellen i den verkliga komponenten om en komplex geometri finns. - tidskrävande
Sänknistning 	I stället för en tråd som elektrod så tillverkas ett negativ av den form som skall skapas. Detta medför att perfekta invändiga 90° hörn kan skapas. Även gnistning av gängor kan utföras i alla elektriskt ledande AM material.	+ Mycket komplexa ytor kan bearbetas + Inget fysiskt tryck på komponenten, låga fixtureringskrav. + Mycket liten värmepåverkan eller mekanisk påverkan av ytan. + Skär i alla elektriskt ledande material - Svårt att mäta in nollpunkten av CAD modellen i den verkliga komponenten om en komplex geometri finns. - tidskrävande
Bearbetning av icke toleranssatta ytor		
Blästring 	Blästring använder sig av ett blästringsmedel som i hög hastighet träffar ytan och därmed plastiskt deformerar denna. Hur stor deformation det blir på ytan beror av vilket media man använder. Mycket vanlig för att jämna till ytan och ta bort rester efter AM processen. blästringsmedel som används (glas, keramer, sand, metall)	+ Enkel och flexibel process (kan byta blästringsmedel) + Billig. + Snabb. - Begränsad åtkomlighet, endast yttertor. - Endast en komponent i taget. - Det finns även en hälsorisk vid fint pulver i luften.
Vibrationstrumling 	Trumling använder ett abrasivt medium som komponenterna sänks ner i. Behållaren sätts i vibration vilket leder till att komponenternas ytor nöts ner av det abrasiva mediet. Beroende på material och tillämpning så finns det olika abrasiva medier att använda samt vätskor som ökar effekten.	+ Enkel och flexibel process (kan byta abrasivt media) + Kan ta flera komponenter åt gången. - Begränsad åtkomlighet, endast yttertor - Inte lämpligt för fina och tunnväggiga strukturer.
Flödeshening AFM 	Genomgående hål kopplas till två cylindrar som trycker ett abrasivt medium med hög viskositet genom håligheten. Denna metod lämpar sig bra för att polera kylkanaler i AM tillverkade komponenter	+ Kan användas för komplicerade geometrier. - Begränsad till genomgående hål

Borttagning av byggplatta

Tidigare har det nämnts att inbyggda spänningar kan få komponenten att deformeras när byggplattan tas bort, säkerställ att detta inte kommer att ske innan borttagning genomförs. Beroende på legering så kan det räcka med en bandsåg för att avlägsna byggplattan men vid hårdare legeringar eller geometrier som kan få sågbladet att vika av så kan trådnistning med fördel användas.

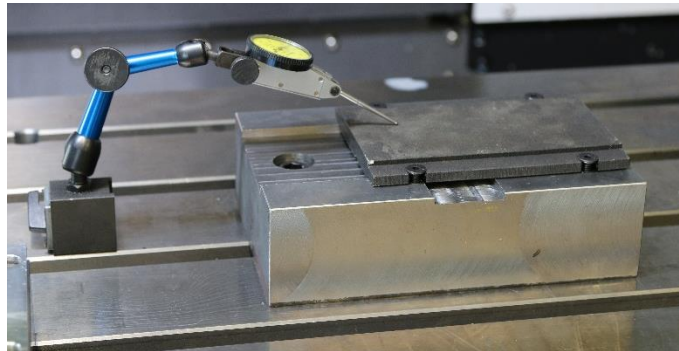
Byggplattan kan även användas för fixturering om komponenten behöver bearbetas och geometrin inte tillåter någon yta för smidig fixturering.

Positionering och fixturering

Ett av de större problemen vid bearbetning av AM komponenter är när en underleverantör av bearbetningen får en AM-komponent utan att ha varit involverad i designen. Extra material adderas för att kunna bearbetas ner till slutliga toleranser medan ritningar och CAD-modeller visar på den färdiga komponenten. Det finns alltså inga referensytor som överensstämmer mellan den fysiska komponenten och ritningarna. Detta problem skapar ofta onödiga extrakostnader för en AM-komponent. [Swe20]

Anledningen till att använda AM tillverkning är ofta för att utnyttja de komplexa ytor som kan skapas, dessa ytor är ofta mycket svåra att fixturera mot. Det finns speciallösningar för att fixturera mot konkava och konvexa ytor men de är ofta dyra och variationer i ytans topografi efter AM-processen kan medföra att vibrationer uppstår. Överväg att lägga till fixtureringsytor och geometrier som kan belastas under bearbetningen av funktionsytor för att därefter bearbetas bort.

Under fixtureringen så rekommenderas det att lägga en mikrometer mot ytan som skall bearbetas och knacka på komponenten i x, y och z riktning för att säkerställa att komponenten inte rör sig se Figur 2. Är komponenten tunnväggig och vibrationer uppstår i en riktning men inte i andra så kan en fixtur med ett tryck mot motsatt sida användas för att skapa en form av trepunkts böj vilket minskar vibrationerna. [MacAM]



Figur 2, knack-test av AM-komponent innan bearbetning [MacAM]

Genom att diskutera med leverantören av bearbetningen så kan lösningar tas fram som minimerar problemen.

- Lägg till referensytor som sedan bearbetas bort i modellen, oftast så krävs det referensytor för både X, Y och Z.
- Placera referensytor på byggplattan och behåll byggplattan för fixturering.
- Lägg till fixtureringsytor på komponenten vid behov.

Slipning

Slipning är en mycket vanlig och användbar metod för att bearbeta AM-komponenter då processen är mycket exakt där både små och stora skärdjup kan skapas med hög kontroll på spåntjockleken. Slipverktyg är baserade på abrasiva mineraler som skär i materialet, samt ett bindande material med en specifik porositet. Under slipningen blir partiklarna nötta och bryts bort från det bindande materialet i slipverktyget. Mineralerna i verktygen består vanligtvis av: aluminiumoxid (Al_2O_3), kiselkarbid (SiC), kubisk bornitrid (CBN) och diamant (D) [Sch11], [3M].

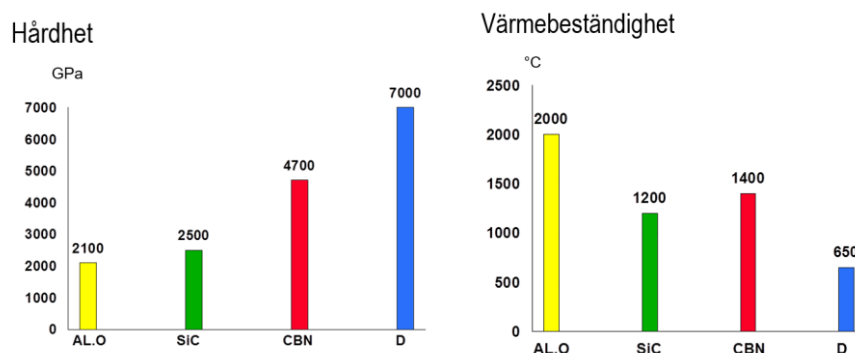
Val av slipskiva

Vid val av slipskivor så finns det ett flertal faktorer som spelar in

- Typ av slipmedel (dvs abrasiv mineral).
- Kornstorlek på slipmedlet.
- Hårdhetsgrad (våldigt mjuk, mjuk, medel-hård, hård).
- Struktur/porositet (tät eller öppen struktur).
- Bindemedel.

Slipmedel

De egenskaper som utmärker de vanligaste slipmedlen är att de är hårda, har skärande eggar en god värmebeständighet samt har en kemisk beständighet. Slipmedlen har olika hårdhet, diamant och CBN tillhör de hårdaste och är även dyrast. De konventionella slipmedlen aluminiumoxid och kiselkarbid har i jämförelse en lägre hårdhet men är billigare. En annan viktig egenskap är värmebeständighet och där klarar aluminiumoxid högst värme i slipzonen utan att dess hårdhet påverkas negativt, i motsats till diamant som är känsligare för höga temperaturer Figur 3 [3M].



Figur 3, Vanliga slipmedels hårdhet och värmebeständighet. [3M]

Vid bearbetning av AM material så passar vanligtvis slipskivor innehållande CBN slipmedel bra samt även olika typer av sintrade aluminiumoxider som är tuffare och därmed ger en högre avverkningsförmåga.

Kornstorlek

Valet av kornstorlek beror främst på vilken ytjämnhet som krävs för den slipade ytan.

Krävs en fin ytjämnhet, dvs ett lågt värde på t.ex. ytjämnhetsparametern R_a , på detaljen bör man välja en finkornigare slipskiva. Vill man i stället prioritera en snabbare avverkning av materialet i stället för en fin ytjämnhet väljer man en grovkornigare slipskiva [3M]. AM material har ofta en grov obearbetad yta som först måste slipas bort. Beroende på ytans beskaffenhet, kan man behöva anpassa slipskivans kornstorlek och/eller exempelvis slipa i två steg för att säkerställa att kraven på detaljens ytjämnhet uppnås.

Hårdhet

Applikationens kontaktyta mellan slipskiva och arbetsstycke styr valet av slipskivans hårdhet.

Stor kontaktyta vid t.ex. planslipning kräver vanligtvis en mjukare slipskiva för att skivan skall fungera på ett optimalt sätt i slipprocessen och inte generera slip problem.

Vid rundslipning där kontaktytan är mindre, blir därmed slipkrafterna på varje slipkorn högre, där krävs en hårdare slipskiva för att klara belastningen på ett kontrollerat sätt.

Hårdheten på en slipskiva betecknas med en bokstav där en bokstav i början på alfabetet anger en mjukare slipskiva dvs en slipskiva som innehåller en mindre andel bindemedel och mer luftporer jämfört med längre fram i alfabetet [3M] Figur 4. Vid hårdare typer av AM material så väljer man med fördel en lite mjukare skiva för att få en slipskiva som är mer aggressiv och avverkar materialet bättre. Använder man en för hård skiva får man lätt problem med att skivan ”studsar” dvs inte skär i materialet på ett korrekt sätt.

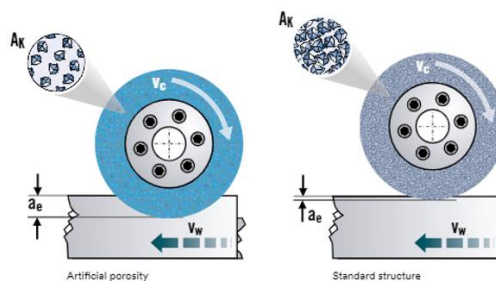
Mycket lös	Lös
E F G	H I J
Medium	Hård
K L M	N O P
Mycket hård	Extremt hård
Q R S	T U W

Figur 4, Hårdhet hos slipskivor [3M]

Struktur/porositet

Applikationens kontaktyta styr även valet av slipskivans struktur.

En stor kontaktyta behöver oftast kompenseras med en högre porositet för att inte riskera att skapa för låga skärkrafter som bara trubbar till slipkornen, detta kan generera bränningar dvs att materialet får en termisk påverkan. Högporösa slipskivor används exempelvis vid djupslipning en planslipapplikation som kännetecknas av stora skärdjup och därmed stora kontaktytor [3M]. Även vid slipning i AM material är det viktigt att man använder slipskivor som har en öppnare struktur, för att motverka att slipkornet blir trubbigt.



Figur 5, Vid stora slipdjup krävs en mer porös struktur än vid grunda slipdjup [3M]

Bindemedel

De vanligaste bindemedlen är keramisk, bakelit, gummi, plast och metall.

För precisionsslipning med konventionella slipmedel är keramiska bindemedel vanligast förekommande. När det gäller CBN och diamant så används förutom keramiska bindemedel även bakelit och metallbindemedel av olika slag [3M]. Vanligtvis fungerar keramiska bindemedel bäst vid slipning i AM material, detta gäller både CBN- och aluminiumoxidslipmedel. Även andra bindemedel kan användas vid slipning av AM material, men de keramiska bindemedlen har mer friskärande egenskaper och har en öppnare struktur, vilket är positivt vid bearbetning av dessa materialtyper.

Fräsning och svarvning

Jämförande studier för skärande bearbetning av AM material mot dess traditionellt tillverkade legering har genomförts för flera material. I en studie av AISI H13 i traditionellt tillverkat material mot dess AM motsvarighet så framgår det tydligt att AM materialet är hårdare och ökar skärförlitningen [Mon16]. I en liknande jämförelsestudie av titanlegeringen Ti-6Al-4V så visade resultaten en ökad hårdhet hos det additivt tillverkade materialet vilket förklarades av en finare mikrostruktur. Däremot uppvisar den traditionellt tillverkade titanlegeringen högre skärkrafter under fräsningen och en ökad grovhet på ytan trots sin lägre hårdhet [Bon17]. Inom svarvning så har liknande studier gjorts [Bor14], [Pol17] där resultaten ger tydliga likheter där hårdheten är högre i AM materialen, skärförlitningen ökar men också att ytjämnheten efter bearbetning är bättre i AM materialet än i det traditionellt tillverkade materialet.

Vid skärande bearbetning i AM material ska man även betänka vilket skär man använder och dess optimala skärdjup. Generellt vill man bearbeta så lite som möjligt och därför är det pålagda extramaterialet som ska bearbetas mycket tunt. Radien på skären kräver ett visst skärdjup, om inte detta ges kan skäret nöta på ytan i stället för att skära i det, detta medför onödig värmeutveckling och slitage på skären.

Den intermittenta bearbetning som sker i en rå AM komponent kan skada hårda och spröda skär, keramiska eller CBN skär är typiskt sådana skär som löper en stor risk att haverera i början på ett ingrepp [MacAM]. Råheten påverkas av vilken bygghet som används, DED och därefter EBM ger oftast den grövsta ytan som därmed ger den mer intermittenta bearbetningen.

Material som är hårda och spröda löper större risk att få urflisningar på kanterna när skäret går ur ingrepp. Detta kan påverkas till viss del av byggriktningen men mestadels av materialet eller geometrin, skarpa kanter som inte ger stöd när skäret går ur ingrepp har högre chans att få urflisningar se Figur 6.



Figur 6, Urflisningar på en 90° kant vid utgång för skär. [MacAM]

I många fall går det att använda liknande skär för AM-tillverkade material som för traditionellt tillverkade material men räkna med högre slitage på skären.

- Bestäm hur en komponent skall bearbetas redan i designsteget, detta gör det enklare att bestämma den bearbetningsmån som ska adderas till geometrin.
- Välj verktyg och skäreppor som är designade för att motstå chipping.
- Räkna med ett högt slitage på skäreppor.

Bearbetningsrekommendationer

Här finns specifika rekommendationer för olika AM-material som har testats i anslutning till denna guideline.

Hårda och nötningsbeständiga material.

I projektet MacAM som står till grunden för denna guideline så testades hårda och nötningsbeständiga material från VBNs Vibenite® material.

Material	Beskrivning	bearbetningsmetoder
Vibenite® 150	Höglegerat pulvermetallurgiskt stål med ett mångsidigt tillämpningsområde. Dess mikrostruktur utgörs av en finkornig järnmatris innehållandes små hårdmetallpartiklar som ger en hårdhet kring 58–64 HRC beroende på värmebehandling.	slipning
Vibenite® 290	Benämns som det hårdaste stålmaterial tillgängligt på marknaden, med en hårdhet på upptill 72 HRC. Mikrostrukturen består av en sammansättning av kobolt och finkornig hårdmetall som ger materialet, förutom en hög hårdhet, en hög slitstyrka och värmestålighet.	Fräsning Slipning
Vibenite® 480	Ett kobolt-krom legerat stål med höga halter av Wolfram och kol. Detta material klassas som en hårdmetall-hybrid då mikrostrukturen innehåller cirka 65% hårdmetallpartiklar vilket i kombination med dess materialkomposition ger egenskaper som hög hårdhet, värmestålighet och korrosionsbeständighet. På grund av sin hybridsammansättning lämpar sig Vibenite® 480 i applikationer där hårdmetall är för sprött och värmeståligheten hos snabbstål är för låg.	Fräsning slipning

Slipning

- Välj ett CBN hjul, med fördel så väljs ett med en öppen struktur t.ex. vitrified bonded CBN
- Sikta på större spåntjocklek, detta för att varje spåna ska innehålla så mycket hårdmetallpartiklar som möjligt, detta medger höga matningshastigheter och låga skärhastigheter.
För att öka spåntjockleken måste du:
 - Minska hjulets hastighet.
 - Öka matningshastigheterna.
 - Öka inmatningsdjupet.
- Börja med grundinställningarna nedan och försök vid behov öka spåntjockleken.
Startparametrar för slipning i Vibenite®-material:
 - Hjulets skärhastighet: 20 m/s
 - Matningshastighet: 30 mm/min
 - skärdjup: 4,5 mm
 - spåntjocklek h_m : 0,00011 mm
 - Materialavverkningshastighet Q'_w : 2,3 mm³/s mm

Fräsning

- Använd chipping resistent verktyg, den råa ytan skapar stora påfrestningar på skärebben vilket kräver att skärebben har designats för höga påfrestningar.
- Använd den lägsta skärdata som rekommenderas för skären, minska matningshastigheten vid problem.
- Använd skärvätska för att smörja skärzonen.
 - För Vibenite® 150 och 290 så kan pinnfräsen R215.H4-20050EAC06H 1610 rekommenderas för grovbearbetning av den råa ytan.
 - För finbearbetning av dessa material så kan R390-11 T3 08E-PL 1010 rekommenderas, detta skär slits fort men ger en mycket fin yta i hårda material.
 - För Vibenite® 480 som består av 65% hårdmetallpartiklar (karbider) så kan bara R390-11 T3 08E-PL 1010 rekommenderas, detta skär slits fort men skapar mycket fina ytor i hårda AM material.

Referenser

- [REN17] RENISHAW. 2017. Design for metal AM - a beginner's guide
<https://resources.renishaw.com/en/details/feature-article-design-for-metal-am-a-beginners-guide--111752>
- [Cao15] S. Cao, Y. Qui, X. Wie, H. Zhang; Experimental and theoretical investigation on ultra-thin powder layering in three dimensional printing (3DP) by a novel double-smoothing mechanism; *Journal of Materials Processing Technology* 220 (231 - 242); 2015.
- [Che02] W. Cheng, P. F. Dunn, R. M. Brach, Surface Roughness Effects On Microparticle Adhesion; *The Journal of Adhesion* 78; 929-965; 2002.
- [Daw15] J. Daves, R. Bowerman, R. Trepleton, Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain – Exploring the production and supply of metal powders for AM processes, *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 2015, 59, (3), 243–256,
<http://dx.doi.org/10.1595/205651315X688686>
- [Den19] N. Denmud, K. Baite, T. Plookphol, S. Janudom, Effects of Operating Parameters on the Cut Size of Turbo Air Classifier for Particle Size Classification of SAC305 Lead-Free Solder Powder
- [Den18] D. Deng, Additively Manufactured IN718: Microstructures and Mechanical Properties; Ph.D. thesis; Linköping University; 2018.
- [Ell16] A. M. Elliott, et al.; A Method for Measuring Powder Bed Density in Binder Jet Additive Manufacturing Process and the Powder Feedstock Characteristics Influencing the Powder Bed Density; *Proceedings 27th Solid Freeform Fabrication*; 2016.
- [EPM19] European Powder Metallurgy Association (EPMA), Introduction to Additive Manufacturing Technology – A guide for Designers and Engineers, 3rd edition, 2019.
- [Eyn15] M. Van den Eynde, L. Verbelen, P. Van Puyvelde, Assessing polymer powder flow for the application of laser sintering, *Powder Technology* 286 (151 – 155); 2015.
- [Gib10] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker; *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*; Springer; 2010.
- [Kar99] N. P. Karaptis, G. Egger, P.-E. Gygax, R. Glardon; Optimization of powder layer density in selective laser sintering; Lausanne, 1999.
- [Kör16] C. Körner; Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review; *International Materials Reviews* 61; 2016.
- [Kra09] M. Krantz; H. Zhang, J. Zhu; Characterization of powder flow: Static and dynamic testing; *Powder Technology* 194; 239-245; 2009.
- [Med16] F. Medina, B. Baughman, D. Godfrey, N. Menon; Optimizing EBM Alloy 718 Material for Aero-space Components; 2016.
- [NIS7873] A. Cooke, J. Slotwinski; Properties of Metal Powders for Additive Manufacturing: A Review of the State of the Art of Metal Powder Property Testing; NISTIR7873 – US Department of Commerce; 2012.
- [Niu99] H. J. Niu, I. T. H. Chang; Selective laser sintering of gas and water atomized high speed steel powders; *Scripta Materialia*; Vol. 41 No. 1, pp 25-23; 1999.
- [Ola15] E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno; A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure and properties; *Progress in Materials Science* 74, 401-477; 2015.
- [Sam15] W. J. Sames; Additive Manufacturing of Inconel 718 Using Electron Beam Melting: Processing, Post-Processing & Mechanical Properties; Texas A & M University; 2015.
- [Sey12] V. Seyda, N. Kaufmann, C. Emmelmann; Investigation of aging processes of Ti-6Al-4V powder material in laser melting; *Physics Procedia* 39; 2012.
- [Spi09] A. B. Spierings, G. Levy, Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades, *SFF Symposium*, 2009.
- [Tan15] H.P. Tang, M. Qian, N. Liu, X. Z. Zhang, G. Y. Yang, J. Wang; Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti-6Al-4V by selective electron beam melting; *JOM*, Vol. 67, No. 3; 2015.
- [Voc19] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback, Powders for powder bed fusion: a review; *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
- [Wil11] R. Wildman et al.; Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimization in selective laser melting process; *Research Gate*; 2015.

- [Yan17] L. Yan, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon, S. Wiener; Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production; Springer, 2017.
- [Zhu17] X. Zhu, Q. Zhang, C. Huang, Y. Wang, C. Yang, F. Wie; Validation of surface coating with nanoparticles to improve the flowability of fine cohesive powders; Particuology 30; 53 – 61; 2017.
- [AM21] AMPOWER Report 2021
<https://am-power.de/#report>
- [Voc19] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback, Powders for powder bed fusion: a review; Progress in Additive Manufacturing, 2019, <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
- [Nam18] S. Nam et al. Effect of Process Parameters on Deposition Properties of Functionally Graded STS 316/Fe Manufactured by Laser Direct Metal Deposition, Metals 2018, 8, 607; doi:10.3390/met8080607
- [Dig20] Digital Metal, Different AM Technologies, <https://digitalmetal.tech/home-digital-metal/am-metal-technologies/>, 2020-08-04
- [EPM19] European Powder Metallurgy Association (EPMA), Introduction to Additive Manufacturing Technology – A guide for Designers and Engineers, 3rd edition, 2019.
- [AMF18] AMFG, Metal 3D Printing: What is Direct Energy Deposition, <https://amfg.ai/2018/09/27/metal-3d-printing-what-is-direct-energy-deposition/> 2018-09-27.
- [WES19] Andrew Wessman, et al, Heat treatment of additively manufactured metal components GE Additive Technology Center, West Chester Township, Ohio
- [Swetim] kunskap från metalforskningsinstitutet SWERIM AB.
- [VBN19] VBN. 2019. *Delivery Condition*. Tillgänglig på: <https://vbncomponents.se/vibenite/delivery-condition/> (2019-07-05)
- [SWE20] Webinar: Machining of AM manufactured parts, Swerim 2020-05-18.
- [Sch20] Schneider, G. 2020. *Cutting Tool Applications Chapter 16: Grinding Wheels and Operations*. Tillgänglig på: <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/media-gallery/21135367/chapter-16-grinding-wheels-and-operations-cutting-tool-applications> (2021-06-04)
- [Mon16] Montevecchi, F., Grossi, N., Takagi, H., Scippa, A., Sasahara, H., Campatelli, G. 2016. *Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy*. Tillgänglig på: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116301895>
- [Bon17] Bonaiti, G., Parenti, P., Massimiliano, A., Kapoor, S. 2017. *Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V*. Tillgänglig på: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917302871>
- [Bor14] Bordin, A., Ghiotti, A., Bruschi, S., Facchini, L., Bucciotti, F. 2014. *Machinability Characteristics of Wrought and EBM CoCrMo Alloys*. Tillgänglig på: https://www.researchgate.net/publication/263049462_Machinability_Characteristics_of_Wrought_and_EBM_CoCrMo_Alloys
- [Pol17] Polishetty, A., Shunmugavel, M., Goldberg, M., Littlefair, G., Singh, R.K. 2017. *Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V*. Tillgänglig på: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302347>
- [MacAM] projektet MacAM som ligger till grund för denna guideline (Vinnova diariernr: 2019-03584)