



Institutt for materialteknologi

Mikrostruktur i AM Scalmalloy

Med varierende prosessparametere

Microstructure in AM Scalmalloy

With varied processing parameters

Forfattere:

Andreas Narmo
Benjamin G. Odden
Karl Oddvar Brander Pettersen

Intern veileder:

Roald Lilletvedt

Eksterne veiledere:

Sandeep Singh Klair
Dr. Øyvind Frigaard

Prosjektnummer: IMA-B-18-2023

Innleveringsdato: 20.05.2023

Gradering: Åpen

Oppdragsgiver: FFI

Sammendrag

I denne oppgaven ble effekten av forskjellige prosessparametere i laser powder bed fusion (LPBF) med Scalmalloy undersøkt. Målet med oppgaven var å lage en metode for å undersøke hvordan forskjellige prosessparametere påvirker Scalmalloy i LPBF. Hardhet, porøsitet, og smeltebadsstørrelse ble analysert, hvor noen mulige korrelasjoner viste seg. Lasereffekten hadde begrenset innvirkning på hardheten, men høyere effekt kunne føre til større smeltebad. Det er vanskelig å trekke noen konklusjoner i porøsitetsmålingene, men de viser en mulig korrelasjon mellom minkede lasereffekt og mindre porer. Det ble ikke observert forventede defekter, som balling og keyholing.

Oppgaven gir innsikt i effekten av prosessparametere på mikrostrukturen i 3D-printet Scalmalloy og legger et grunnlag for videre forskning som kan bidra til å forbedre prosessen og oppnå mer optimale materialegenskaper i fremtidig 3D-printede metallkomponenter.

Abstract

In this study, the effect of different process parameters in laser powder bed fusion (LPBF) with Scalmalloy was investigated. The aim of the project was to develop a method for examining how different processing parameters affect Scalmalloy in LPBF. Hardness, porosity, and melt pool size were analysed, revealing some potential correlations. Laser power had limited impact on hardness, but higher power could lead to larger melt pools. The porosity measurements were inconclusive, but indicates a possible correlation between reduced laser power and fewer pores. Additionally, expected defects, such as balling and keyholing, were not found.

This study provides insight into the effect of process parameters on the microstructure of 3D-printed Scalmalloy and has laid a foundation for further research that can help improve the process and achieve more optimal material properties in future 3D-printed metal components.

Forord

I denne rapporten har vi undersøkt sammenhengen mellom varierende prosessparametere og materialegenskapene til AM Scalmalloy. Hensikten med dette arbeidet var å få en grunnleggende forståelse for hvordan varierende prosessparametere påvirker materialegenskapene. Arbeidet med å analysere prøvene ble utført på materiallaben ved NTNU Trondheim campus Kalvskinnet.

Vi har fått mye god konstruktiv tilbakemelding og mange gode innspill fra veiledere og labteknikerne på utforming av rapporten og bruk av laben.

Vi vil derfor rette en stor takk til alle som har hjulpet oss i arbeidet med denne oppgaven. Først og fremst vil vi takke Roald Lilletvedt, Sandeep Singh Klair og Dr. Øyvind Frigaard for god veiledning og gode innspill. Vi ønsker også takke Andrey Kosinskiy, Dr. Rania Hendawi og Marit Elinda Olaisen Odden for veiledning og hjelp på materiallaben.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	ii
Abstract	ii
Forord	iii
Figuroversikt	2
Tabelloversikt	2
Symbolforklaring	3
1. Innledning	4
2. Teori	4
2.1 Legering av aluminium	4
2.2 Additiv tilvirkning	5
2.3 Bestemmelse av smeltebadsstørrelse	8
2.4 Anodisering av aluminium	9
2.5 Varmebehandling	9
3. Metode	10
3.1 Utstyr	10
3.2 Prøve ID, og standardparametere	10
3.3 Prøvepreparering	10
3.4 Analyse	12
4. Resultater	13
4.1 Hardhetsmåling	13
4.2 Porøsitetmålinger	14
4.3 Størrelse på smeltebad	16
5. Diskusjon	18
6. Konklusjon	20
7. Referanser	21
8. Vedlegg	24
8.1 Vedlegg 1: Hardhetsmålinger	24
8.2 Vedlegg 2: Porøsitetmålinger	26
8.3 Vedlegg 3: Smeltebadmålinger	30

Figuroversikt

Figur 1: Skjematisk tegning av LPBF prosessen	6
Figur 2: Eksempel på balling ved høyere laserhastigheter	7
Figur 3: Eksempel på keyhole defect	7
Figur 4: Testlinje med antall kryssninger	8
Figur 5: Elektropoleringsparametere	11
Figur 6: Anodisering steg 1	11
Figur 7: Anodisering steg 2	11
Figur 8: Stolpediagram som illustrer enkelte verdier fra tabell 4	13
Figur 9: Prøve B-250mm-2	14
Figur 10: Prøve B-250mm-1	14
Figur 11: H-350W-1	14
Figur 12: H-1400mm-1	14
Figur 13: Stolpediagram som plotter gjennomsnittlig pore prosentandel (%)	15
Figur 14: Smeltebad i prøve B-250W	16
Figur 15: Smeltebad i prøve H-325W	16
Figur 16: Stolpediagram med gjennomsnittlig smeltebadsareal	17

Tabelloversikt

Tabell 1: Kjemisk sammensetning av Scalmalloy	4
Tabell 2: Vanlige defekter ved ulike parameternivå	6
Tabell 3: Betydningen av prøve ID	10
Tabell 4: Standardparametere	10
Tabell 5: Gjennomsnittet av hardhetsmålinger	13
Tabell 6: Gjennomsnittsverdier for porøsitetmålinger	15
Tabell 7: Gjennomsnittsstørrelse på smeltebad bestemt med Heyns lineal intercept metode	16
Tabell 8: Standardavvik og konfidensintervall for dimensjonene til smeltebad	17

Symbolforklaring

AM: Additive manufacturing, eller additiv tilvirkning

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAD: Computer Aided Design

CRM: Critical Raw Materials

DED: Direct energy deposition

EBM: Electron beam melting

FFI: Forsvarets Forsknings Institutt

HV: Hardness Vickers

LMD: Laser metal deposition

LoF: Lack of fusion

LPBF: Laser powder bed fusion

SEM: Scanning electron microscope

SLM: Selective laser melting

1. Innledning

Additiv tilvirkning er en stadig viktigere produksjonsform som åpner for hurtig produksjon av spesialiserte deler med kompliserte geometrier uten lange prosesskjeder. Noen eksempler på dette er medisinske implantater som er tilpasset pasienten og komplekse komponenter i flyindustrien som er lettere og mer effektive. AM metoder som LPBF kan benyttes for hurtig produksjon med en rekke materialer med effektiv materialbruk. Scalmalloy er en høystyrke aluminiumslegering som er laget spesielt for bruk i additiv tilvirkning.

Selv om Scalmalloy kan ha svært gode egenskaper, kan additiv tilvirkning forårsake en rekke defekter i mikrostrukturen. Disse defektene kan påvirke materialets styrke, hardhet og utmattingsegenskaper. Det foregår mye forskning på disse feilene og hvordan de kan unngås. Vanlige feil som kan oppstå i AM er porøsitet, balling og keyholing. Studier har vist en sammenheng mellom forekomst av disse defektene og varierende prosessparametere i LPBF. I denne rapporten undersøkes det hvordan hardhet, porøsitet og smeltebadsstørrelse påvirkes av endring i laserhastighet og lasereffekt innenfor prosessvinduet.

2. Teori

Scalmalloy er en aluminiumslegering utviklet av APWorks for additiv tilvirkning, til bruk i luft og romfart. Scalmalloy inneholder i tillegg til aluminium både scandium og magnesium og er ifølge produsenten den eneste AM prosesserbare legeringen som kan konkurrere med 7000 serie aluminium [1] [2]. 7000 serien er en serie med aluminiumslegeringer leget med sink som har den høyeste styrken av aluminiumslegeringer som er kommersielt tilgjengelig [3]. Scalmalloy leveres i pulverform som består av sfæriske elementer. Disse elementene har en størrelse hovedsakelig mellom 20 til 63 μm [4]. Standard hardhet for Scalmalloy er 180 målt med HV 0.3 [5].

2.1 Legering av aluminium

Det er veldig få aluminiumslegeringer med høy styrke som kan brukes i LPBF. Dette er grunnet sprekkdannelse under størkneprosessen. Ved å legge til legeringselementene zirkonium (Zr) og scandium (Sc) kan man eliminere denne typen sprekkdannelse, og samtidig øke styrken til materialet. Som vist i tabellen under inneholder Scalmalloy en del av begge disse elementene, samt andre for å øke styrken. [6]

Tabell 1: Kjemisk sammensetning av Scalmalloy [7]

ELEMENT	Mg	Sc	Zr	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Ti	O	V
WT%	(min)	4.00	0.60	0.20	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	(max)	4.90	0.80	0.50	0.80	0.40	0.40	0.25	0.10	0.15	0.05

Scalmalloy inneholder en stor del magnesium (Mg), mellom 4.0 og 4.9 wt%. Dette legeringselementet er direkte korrelert med økt flytegrense og strekkfasthet [8, p. 18]. Legeringselementet er også kjent for å øke deformasjonsmotstand til aluminium [9].

Scandium (Sc) er godt kjent for potensialet til å hjelpe med kornraffinering, som kan hjelpe til med å øke styrken til aluminium. Sc hjelper også med å øke styrken, duktiliteten, sveisbarheten og korrosjonsbestandigheten til Al-legeringer [10]. Tradisjonelt sett kan aluminium bare inneholde under 0.3wt% Sc, men ved å bruke produksjonsmetoder med økt kjølehastighet, som i LPBF, kan man øke Sc innholdet til > 1 wt%. Scalmalloy inneholder mellom 0.6 og 0.8 wt% Sc [8, p. 20]. Sc som legeringselement gir også utfordringer. Løseligheten til Mg minker betraktelig ved å legge til Sc [11]. I tillegg er Sc et kritisk råmateriale i Europa [12].

Zirkonium (Zr) er levert i aluminium for å forhindre rekrystallisering ved høye temperaturer. Det vil si at aluminiumslegeringer som inneholder Zr er termisk resistente. Disse legeringene vil derfor gå tilbake til sin opprinnelige kornstruktur etter det har blitt utsatt for høye temperaturer [13]. Dette kan være helt nødvendig i en LPBF prosess ettersom aluminiumen vil nå høye temperaturer for hvert lag som blir lagt. Den økte kjølehastigheten sørger for høye temperatursvingninger, og Zr er derfor et svært viktig legeringselement i Scalmalloy.

Mangan (Mn) i likhet med Mg er tilsatt aluminium for å øke styrken til legeringen. Mangan er kjent for å øke løsningsherdingsegenskapene til legeringen samt øke duktilitet og korrosjonsbestandighet [14].

Jern (Fe) og silisium (Si) er mulige forurensninger som alltid er tilstede i alle utenom de reneste aluminiumslegeringene. Ettersom smeltet aluminium er veldig reaktivt med både Fe og Si skal det veldig lite til før disse forurensningene blir irreversibelt lagt til i blandingen. Disse forurensningene kan komme fra metallet i smelteovnen, verktøy som ble brukt i produksjonsprosessen, skrapaluminium som blir tilsatt, eller fra malmen. I tillegg til å være skadelig for de mekaniske egenskapene til aluminium er disse forurensningene vanskelig og kostbart å fjerne fra blandingen [15].

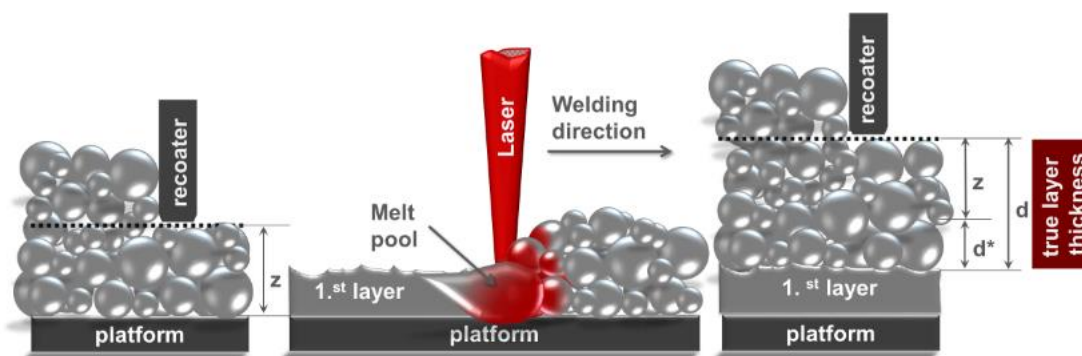
Si brukes også som et legeringselement i visse aluminiumslegeringer, og er derfor ønskelig i visse legeringer. Uavhengig av dette så er Si, som nevnt over vanskelig å fjerne. Dette fører til at i likhet med Fe så er Si nesten alltid til stede i aluminium.

2.2 Additiv tilvirkning

Additiv tilvirkning (AM), populært kalt 3d-printing, er en nyere type produksjonsteknologi som gjennom sine egenskaper har hatt stor påvirkning på en rekke industrier og deres produksjonsaktiviteter. Dette er i hovedsak på grunn av additiv tilvirkning sin mulighet til å lage komplekse geometrier uten spesialiserte verktøy [16]. Denne nye teknologien har blitt populær i de siste årene ettersom den gir stor produksjonsfrihet, både for typen komponenter som produseres og materialene som komponentene kan produseres av. Additiv tilvirkning kan benyttes for flere materialgrupper, både polymer, keramer og metaller. Det er derfor en rekke additive tilvirkningsprosesser, som alle er tilpasset de materialene som de skal produsere.

For metaller brukes gjerne AM-teknologier som Laser powder bed fusion (LPBF), electron beam melting (EBM) og Directed energy deposition (DED) som også kalles Laser metal deposition (LMD). En studie viser at Scalmalloy får bedre mikrostrukturelle egenskaper og 30% høyere utmattingsegenskaper ved å bli produsert i LPBF sammenlignet med LMD [17]. Scalmalloy produsert med LMD er også mer porøs og utsatt for balling.

Laser powder bed fusion, også kjent som selective laser melting (SLM), fungerer ved at en laser smelter bestemte områder av et pulverlag som bestemt av CAD (computer aided design) modellen. Dette gjør at pulveret smelter sammen og stivner på de ønskede områdene. Deretter legges det over et nytt pulverlag hvor prosessen repeteres til ønsket tredimensjonalt produkt er produsert [18]. Stegene i prosessen er illustrert i figur (1), hentet fra [8, p. 12].



Figur 1: Skjematisk tegning av LPBF prosessen [8, p. 12]

LPBF har en rekke fordeler, som at den fungerer på en stor rekke materialer og har en enkel produksjonsprosess. Produkter med kompliserte tredimensjonale geometrier har tradisjonelt krevet flere produksjonsprosesser, som støping, kutting og punching. I tillegg må disse ofte utføres av profesjonelle teknikere. Siden LPBF produserer hele produktet i en prosess fra pulver til ferdig produkt, forenkler det komplekse produksjonsprosesser, kutter ned på produksjonstid, og gir høy utnyttelsesgrad på materialet [18, pp. 404-407].

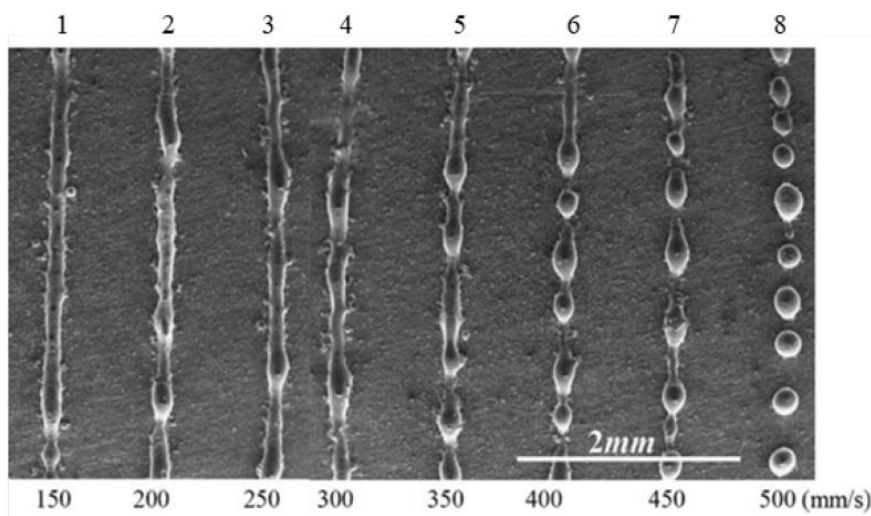
En av de større utfordringene rundt LPBF teknologi er porøsitet [A6,14]. Hvis parameterne i prosessen ikke er innenfor prosessvinduet vil det kunne oppstå en rekke uregelmessigheter som resultat av endret smeltebads dybde, bredde eller lengde. Slike ugunstige smeltebadsgeometrier kan føre til defektmekanismer som balling, porøsitet, LoF porer (lack of fusion), delaminering, sprekker og avvik fra den ønskede mikrostrukturen [19]. Tabell 2 viser vanlige defekter ved ulike parameternivå, hentet fra [19].

Tabell 2: Vanlige defekter ved ulike parameternivå [19]

Parameter	Parameternivå	Resulterende defekter
Lasereffekt	Høy	Sprekker, deformasjon og keyholepore formasjon
	Lav	Balling Lack of fusion porer (LoF)
Laserhastighet	Høy	Balling
	Lav	Termisk induuerte sprekker Porøsitet

En vanlig defekt i LPBF er balling. Dette er en defekt som forårsakes av at et smeltebad deles i flere sfæriske dråper før de størkner og fører til økt porøsitet og en ugunstig overflateruhet. Balling

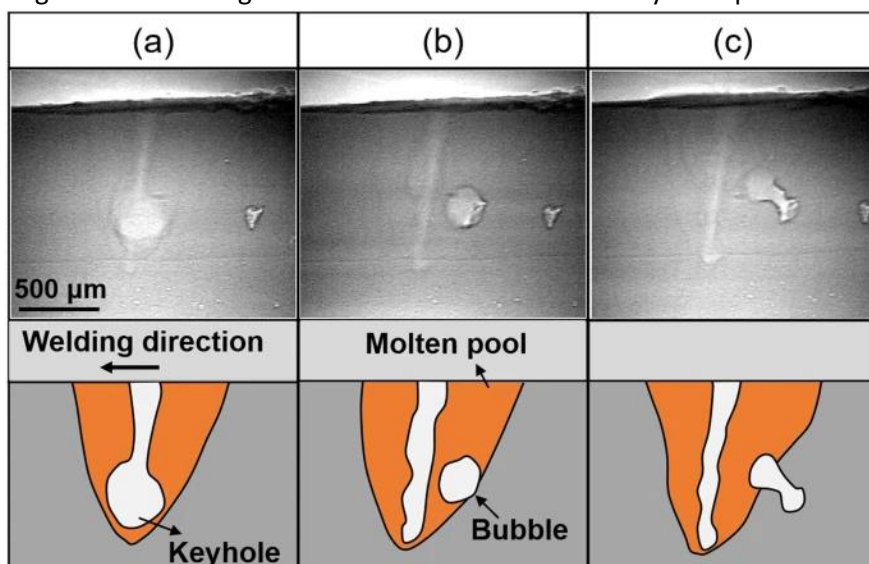
forekommer oftere ved høy laserhastighet og tykkere pulverlag som vises i Figur 2. Balling kan forhindres ved å begrense oksygeninnholdet i printerrommet til 0.1%. [20].



Figur 2 Eksempel på balling ved høyere laserhastigheter [21]

En annen studie som undersøkte balling og porøsitet i AM AZ61 magnesiumlegering observerte at porøsitet i overflaten og balling ble forverret ved høy laserhastighet. Årsaken til dette var at høyere laserhastighet ga lavere energitettighet og lavere temperatur i smeltebadene. Dette førte til høyere overflatespenning og viskositet, som gjorde at det smeltede materialet ikke ble like jevnt fordelt. Studien konkluderte med at den optimale laserhastigheten for denne legeringen var 300mm/s [20]

Under enkelte betingelser (høy lasereffekt og lav laserhastighet) kan metaldamp skape trykk som dytter ned i smeltebadet, som gir en dyp og tynn defekt som illustreres i Figur 3. Denne defekten er kjent som keyholing på grunn av den nøkkelhulllignende geometrien [19]. En studie av Wang, Lu et al. [22] fant at keyholing er avhengig av prosessparameter, og en simulering viste at keyholing kan begrenses eller til og med forhindres ved å redusere trykket i printekammeret.



Figur 3 Eksempel på keyhole defekt [23]

2.3 Bestemmelse av smeltebadsstørrelse

For å kunne si noe om effekten til parameterendringer på Scalmalloy trengs standardiserte tester. Med tanke på mikrostruktur kan ASTM standarden E112-13 benyttes. Denne standarden inneholder en rekke standard testmetoder for å bestemme gjennomsnittlig kornstørrelse:

Sammenligningsprosedyren, planimetrisk (Jefferies) prosedyre og intercept prosedyrer. Disse metodene er ment for å bestemme kornstørrelse i metalliske materialer, men kan også benyttes til å bestemme gjennomsnittlig korn-, krystall- eller cellestørrelse for ikke-metalliske materialer som har metallignende strukturer. På grunn av prosedyrens geometriske basis kan de brukes til kornstørrelsesestimering uavhengig av type metall eller legering. Prosedyrene i E112-13 kan kun brukes til å bestemme kornstørrelse i planet, og kan ikke brukes til å bestemme gjennomsnittlig størrelse til korn i tre dimensjoner. Metodene som er beskrevet i E112-13 er kun anbefalte testmetoder, og bør ikke benyttes for å definere eller etablere grenser for akseptable resultater. [24]

Metodene som beskrives i E112-13 er kun gyldig for å bestemme gjennomsnittlig kornstørrelse i materialer som kun, eller hovedsakelig, består av en fase. For flerfaseprøver må spesielle hensyn tas. Hvis metodene gir varierte eller motsigende svar skal den planimetriske metoden benyttes som referanse i alle tilfeller. I tilfeller hvor korn ikke er likeaksede bør målinger foretas i hvertfall to retninger. [24]

Heyns lineal intercept metode, som er Interceptprosedyren som er beskrevet i ASTM E112-13, er basert på å telle antall korn eller korgrenser som skjæres av en testlinje. Et eksempel på dette er illustrert i Figur 4. Antallet kryssninger benyttes til å beregne gjennomsnittlig lineær avskjæringlengde. Presisjonen til metoden er en funksjon av antall skjæringer som er telt. Det bør trekkes nok linjer til at 50 kryssninger kan telles for å gi høy nok presisjon på resultatene. [24] Linjene skal trekkes over minst 5 tilfeldig valgte felt.



Figur 4: Testlinje med antall kryssninger [20]

2.4 Anodisering av aluminium

Anodisering er en elektrokjemiskprosess som brukes for å produsere en oksidfilm på overflaten av metaller som aluminium og titan. Dette gjøres av flere forskjellige grunner som korrosjonsbeskyttelse, estetikk, eller for å fremheve kornstrukturen. Anodiseringsprosessen innebærer å senke en metallbit i en elektrolytisk løsning og påføre en elektrisk strøm gjennom den for å danne en oksidfilm på overflaten av metallet. Det er imidlertid mulig å oppnå forskjellige resultater avhengig av elektrolyttvalg. Et eksempel på dette er anodisering av aluminium med Barker's reagens (HBF_4). Dette fører ikke til dannelse av en oksidfilm på overflaten, istedenfor er resultatet en ru overflate. Det er denne resulterende overflaten som gjør kornstrukturen synlig i polarisert lys. [25]

2.5 Varmebehandling og herding

Varmebehandling er en produksjonsprosedyre for metaller og legeringer som innebærer oppvarming, opprettholdelse av høy temperatur og avkjøling av materialet for å gi det ønskede mekaniske egenskaper. Man kan oppnå visse mikrostrukturer som gir spesifiserte egenskaper ved å kjøre mange slike programmer etter hverandre. Hver enkelt varmebehandlingsprosess er ofte navngitt etter den ønskede strukturen eller egenskapen, som homogenisering, bainittherding og rekrytallasjon. I en studie av mekaniske egenskaper og mikrostrukturelle effekter av varmebehandling for Sc- og Zr-modifisert Al-Mg-legeringer, ble det basert på resultatene konkludert med at den mest optimale varmebehandlingen for å oppnå maksimal materialhardhet er å holde prøven på en temperatur mellom 325°C og 350°C i rundt 5 timer med en utfellingsherdings tid på 4t til 10 timer. [26]

Utfellingsherding, også kjent som precipitation hardening, er en termisk behandlingsmetode som brukes til å øke styrken og hardheten til legeringer. Denne prosessen involverer kontrollert utfelling eller dannelse av svært små partikler i grunnmaterialet til legeringen. Disse partiklene, som kan være av forskjellige typer, som intermetalliske forbindelser eller metalliske forbindelser, bidrar til å hindre bevegelse av dislokasjoner og dermed øke materialets styrke og hardhet [27, p. 394]. For Scalmalloy utfelles Al_3Sc i korn grensene. Studier viser at det er vanskelig, om ikke umulig, å se hvilken herdingsmekanisme som gir det største styrkebidraget for denne legeringen [28].

3. Metode

3.1 Utstyr

- Hardhetsmåler Duramin-40
- Innstøpningsapparat Citopress-30
- Autopoleringsapparat Saphir 550
- Poleringsapparat Saphir 360
- Poleringsapparat Saphir 350
- Lysmikroskop Eclipse-MA200
- Ultralydbad USC100T
- Elektropoleringsapparat LectroPol-5

3.2 Prøve ID, og standardparametere

Det ble printet to sett med 16 prøver i en SLM280HL LPBF maskin. Prøvene ble printet med forskjellige prosessparametere, hvor lasereffekten og laserhastigheten ble endret på. Prøvene har en ID som sier hvilke parametere som ble brukt på prøven og hvor. H står for hatch, som vil si at midten av prøven hadde de spesifiserte parameterne. B står for border, og betyr at kanten av prøven hadde de spesifiserte parameterne. XXXmm indikerer at laserhastigheten ble kjørt med XXXmm/s. XXXW indikerer at lasereffekten ble kjørt med XXX. Tabell 3 viser en oversikt over disse symbolenes betydning. Der parameterne ikke ble endret var de satt til standarden fra FFI som vist i tabell 4, som er utgangspunktet for prosessvinduet.

Tabell 3: Betydningen av prøve ID

H	Hatch
B	Border
XXXmm	Laserhastighet
XXXW	Lasereffekt

Tabell 4: Standardparametere

Hatch effekt	375W
Hatch hastighet	1200mm/s
Border effekt	300W
Border hastighet	450mm/s

3.3 Prøvepreparering

Varmebehandling

Etter at alle prøvene ble printet ble de varmebehandlet for å utherde spenningene i prøvene. Det ble kjørt følgende varmebehandlingsprosedyre:

- 3°C / min fra romtemperatur til 325 °C
- Holder 325°C i 2 timer
- Skrur av varmestyringen og lar hele systemet kjøles ned til romtemperatur

Opplysning fra FFI:

Denne varmebehandlingen stemmer ikke med teorien, men er den som ble gjort. Varmebehandlingen ble gjennomført ved FFI sitt verksted og manglende logging førte til at denne feilen ikke ble fanget opp før det var for sent. Korrekt varmebehandlingsprosedyre blir nevnt i kapittel 2.5.

Innstøping

Alle 16 prøvene ble innstøpt i Aka-Resin Phenolic SEM for enklere håndtering. Innstøpningsmassen inneholder grafitt, og skal derfor lede strøm. Ettersom massen ikke hadde tilstrekkelig elektrisk ledningsevne, ble bakenden på alle prøvene boret ut og hullene ble fylt med aluminiumsfolie.

Sliping/ polering

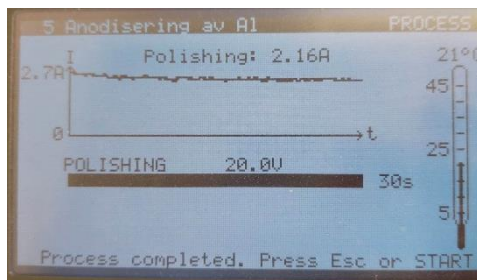
Prøvene ble etter innstøping slipt i flere steg fra som begynte med P800 korning, deretter med P1200 korning, også P4000 korning. Etter sliping ble prøvene finslipt i flere steg. I det første steget ble det brukt en slipeskive av typen Aka-Largan 9 med DiaDuo 15 μ m poleringsveske. Deretter ble det brukt en slipeskive av typen Aka-Allegran 3, med DiaDuo 3 μ m poleringsveske. Til slutt ble det brukt en poleringsdisk med oksidpoleringsveske 0,2 μ m.

Anodisering

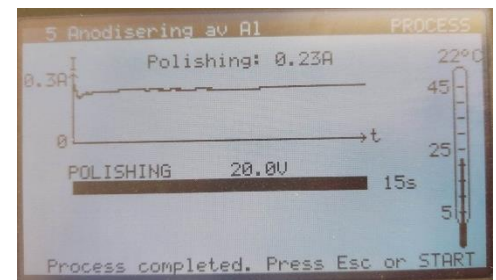
Etter polering ble prøvene anodisert med HBF₄ i en LectroPol-5 elektropolerinsmaskin. Dette ble gjennomført i 2 steg per prøve, med samme parametere utenom tid. Det første steget varte i 30 sekunder, hvor katoden var plassert på aluminiumen som var lagt bak prøven. Det andre steget varte i 15 sekunder, hvor katoden var plassert i epoksyen. Figur 5 viser anodiseringsparameterne og Figur 6 og 7 viser anodiseringsstegene.



Figur 5: Elektropoleringsparametere



Figur 6: Anodisering steg 1



Figur 7: Anodisering steg 2

Lysmikroskopi

Alle prøvene ble avbildet i Lysmikroskop Eclipse-MA200. Det ble først tatt 10 bilder av hver prøve med 10x forstørrelse før anodisering, og deretter 10 bilder av hver prøve med 20x forstørrelse og polarisert lys etter anodisering. Kombinasjonen anodisert prøve og polarisert lys ga gode og tydelige grenser mellom smeltebadene som kom tydelig frem i lysmikroskopet.

Hardhetsmåling

Det ble kjørt hardhetsmålinger, seks i border, og seks i hatch. Alle prøvene ble kjørt med HV2 Vickers 2kgf. Målingene i border ble kjørt i et sikksakk mønster mellom 2 linjer. 0,5mm mellom hver linje, 3 punkter per linje, og 1mm avstand mellom punktene på hver linje. Målingene i hatch ble kjørt i en rett linje, med 1mm mellom hvert punkt.

3.4 Analyse

Porøsitetmåling

Porøsitetmålingene ble gjort med et program som heter MIPAR. I dette programmet ble det laget en oppskrift som kunne kjøres på alle 170 mikroskopbildene av prøvene. Programmet fjernet målestokken på bildet for at den ikke skulle regnes med som en pore. Deretter ble kantene av prøvene detektert for at de ikke skulle regnes med i porøsiteten. Så ble porer detektert ved å velge de mørkeste delene av bildet. Programmet telte og målte arealet av alle porene som ble detektert. Etter å ha kjørt programmet ble alle bildene manuelt gjennomgått for å rette opp i eventuelle feil programmet gjorde.

Smeltebadanalyse

For å bestemme størrelsen på smeltebadene ble Heyn lineal intercept metoden benyttet som den er beskrevet i ASTM E112-13 [24]. På flere mikroskopbilder ble linjer trukket, og antall krysninger mellom smeltebad ble telt. Linjelengden og forstørrelsen ble justert for å gi et stort nok antall krysninger til at resultatet kan ansees som representativt for området hvor parameterendringen vil ha påvirkning. Strekene ble trukket på fem tilfeldig valgte områder av prøven, i to forskjellige retninger for å kompensere for at smeltebadene ikke er likeaksede. Fra disse målingene ble gjennomsnittslengden til smeltebadene i begge retninger beregnet. Disse verdiene ble deretter brukt til å beregne et gjennomsnittlig areal. Standardavvik og konfidensintervall for de ulike lengdemålingene ble beregnet.

4. Resultater

4.1 Hardhetsmåling

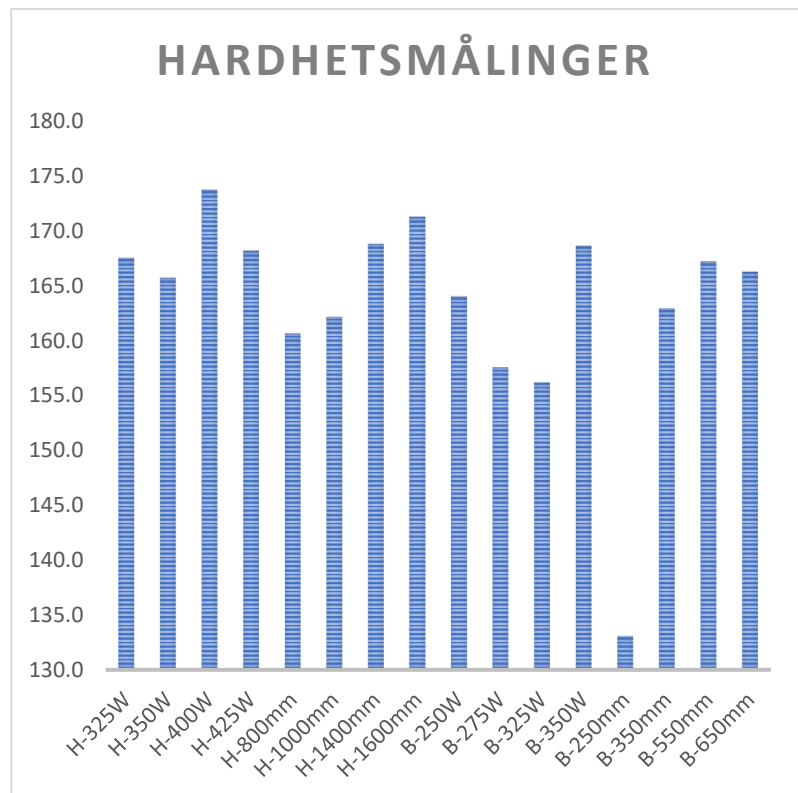
Tabell 5 viser et gjennomsnitt av hardhetsmålinger i hatch og border. Hver verdi i tabellen er et gjennomsnitt av 6 verdier. Resten av verdiene er vedlagt i vedlegg 1. Hardhetsmålingene er målt med Vickers 2kgf.

Hardhetsmålingene viser mindre variasjoner i hardhet ved forskjellige parametere. Gjennomsnittet av alle borderprøvene er 159.3, og gjennomsnittet av alle hatchprøvene er 166.6, som gir et totalt gjennomsnitt på 163. Standard hardhetsverdier for Scalmalloy er 180 ved HV0,3 [5].

Figur 8 illustrerer hardhetsmålingene vist i tabell 5. Her bruker H prøvene hatchverdiene, og B prøvene borderverdiene. I settet H-XXXmm øker hardhetene i både hatch og border ved økt printerhastighet. Den samme trenden kan bli sett i settet B-XXXmm. Det er ingen tydelig korrelasjon mellom lasereffekt og hardhet.

Tabell 5: Gjennomsnittet av hardhetsmålinger

id	snitt border	snitt hatch
H-325W	178.6	167.5
H-350W	165.0	165.7
H-400W	152.3	173.7
H-425W	160.2	168.2
H-800mm	129.0	160.6
H-1000mm	156.0	162.2
H-1400mm	164.1	168.8
H-1600mm	168.2	171.3
B-250W	164.0	169.9
B-275W	157.5	166.9
B-325W	156.2	164.1
B-350W	168.6	171.9
B-250mm	133.1	141.1
B-350mm	162.9	164.7
B-550mm	167.2	178.3
B-650mm	166.3	171.4

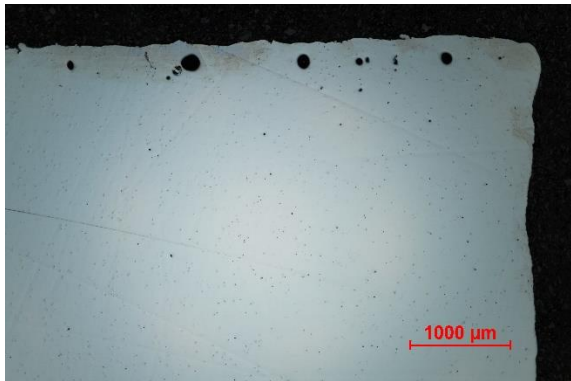


Figur 8: Stolpediagram som illustrer enkelte verdier fra tabell 5

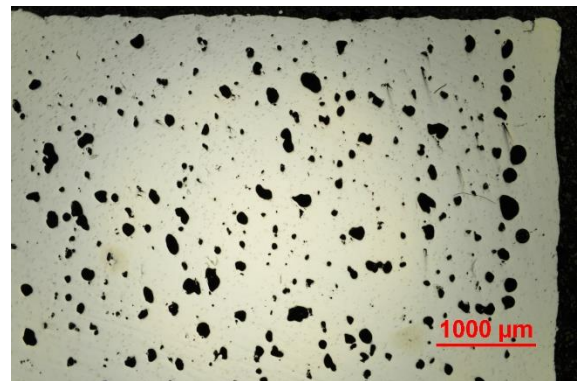
4.2 Porøsitetmålinger

Tabell 6 viser målinger av porøsitet på alle prøvene. Fullt datasett ligger vedlagt i vedlegg 2. Hvert datapunkt i tabell 6 er et gjennomsnitt av 10 datapunkter. Antall porer er hvor mange porer som ble telt per prøve uavhengig av størrelsen. Poreareal vil si arealet porene tar opp per prøve, og poreprosentandel er hvor stor andel av bildet porene tar opp. Poreprosentandelene fra tabell 6 er illustrert i Figur 13 som stolpediagram.

Prøve B-250mm-1 og B-250mm-2 er prøver som er laget med like parametere, men likevel har veldig forskjellige målinger i porøsitet. B-250mm-1 blir i hovedsak sett på som en uteligger i datasettet. Figur 9 og 10 viser oversiktsbilde av disse prøvene.



Figur 9: Prøve B-250mm-2



Figur 10: Prøve B-250mm-1

B prøvene har de størst poreprosentandel med et gjennomsnitt på 1.6%, men lavest antall porer med et gjennomsnitt på 170.1. H prøvene derimot har vesentlig lavere poreprosentandel på 0.9%, men har et høyere antall porer på 340.1. Verdiene indikerer en mulig korrelasjon mellom lavere lasereffekt og mindre pore prosentandel.

Prøvene som viser de beste resultatene, minst og færrest porer er:
B-250mm-2, B-275W-1, H-1400mm-1, H-350W-1

Figur 11, og 12 viser prøver H-350W-1, og H-1400mm-1, hvor H-350W er en av prøvene med få porer, mens H-1400mm-1 er en av prøvene med mange små porer.



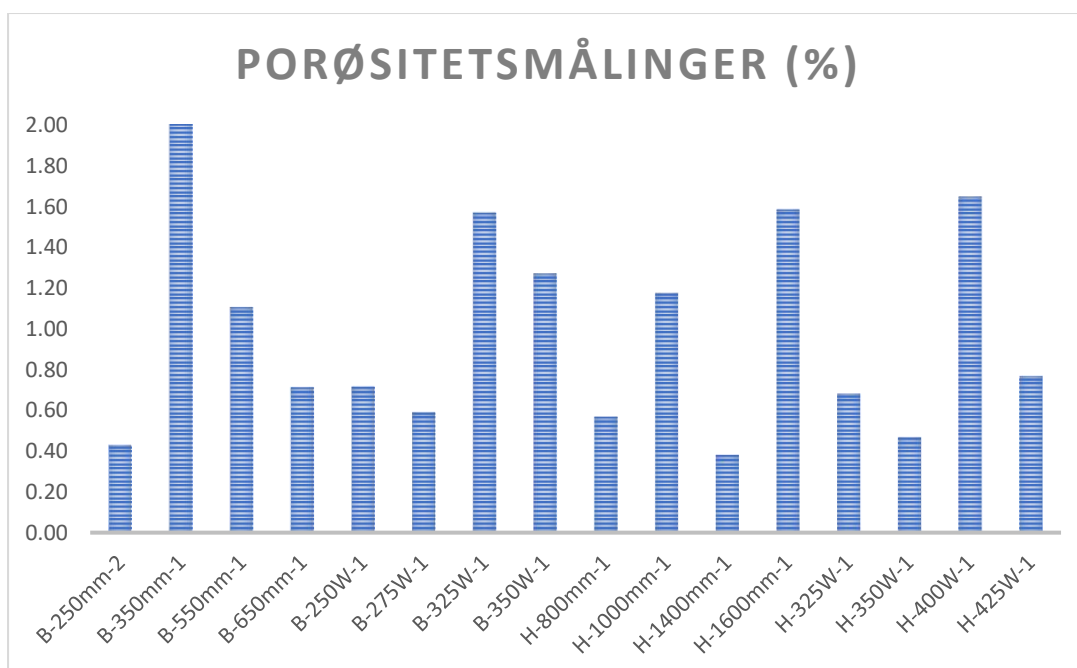
Figur 11: H-350W-1



Figur 12: H-1400mm-1

Tabell 6: Gjennomsnittsverdier for porøsitetmålinger

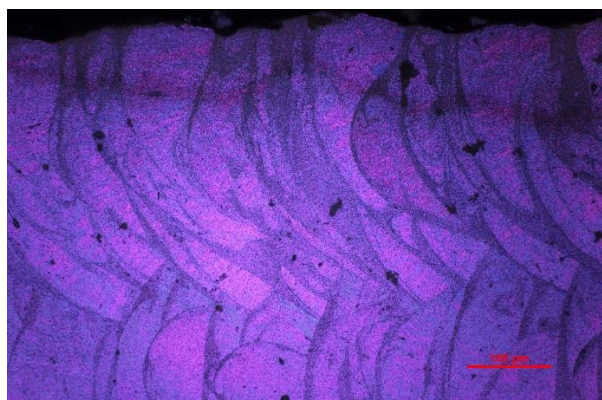
ID	Gjennomsnittlig antall porer	Gjennomsnittlig poreareal (μm^2)	Gjennomsnittlig poreprosentandel (%)
B-250mm-2 10x	124.8	184.3	0.43
B-250mm-1 10x	236.2	1491.1	5.77
B-350mm-1 10x	92.1	1128.5	2.05
B-550mm-1 10x	291.7	251.0	1.10
B-650mm-1 10x	245.9	223.1	0.71
B-250W-1 10x	144.3	288.5	0.72
B-275W-1 10x	119.0	279.4	0.59
B-325W-1 10x	152.0	410.3	1.57
B-350W-1 10x	125.3	640.5	1.27
H-800mm-1 10x	84.6	430.2	0.57
H-1000mm-1 10x	486.8	145.5	1.17
H-1400mm-1 10x	91.3	436.6	0.38
H-1600mm-1 10x	601.5	129.9	1.58
H-325W-1 10x	334.1	125.3	0.68
H-350W-1 10x	256.6	135.8	0.47
H-400W-1 10x	505.5	166.3	1.58
H-425W-1 10x	350.4	147.7	0.77



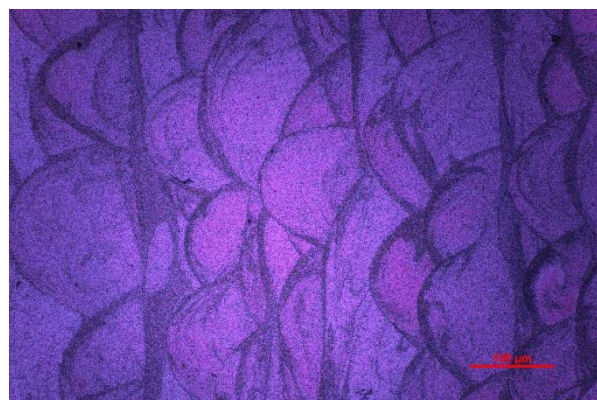
Figur 13: Stolpediagram som plottes gjennomsnittlig poreprosentandel (%)

4.3 Størrelse på smeltebad

Etter anodisering med Barkers reagens ble smeltebadsgrensene synlig i polarisert lys. Figur 14 og 15 viser hvordan smeltebadene typisk så ut i border og i hatch.



Figur 14: Smeltebad i prøve B-250W

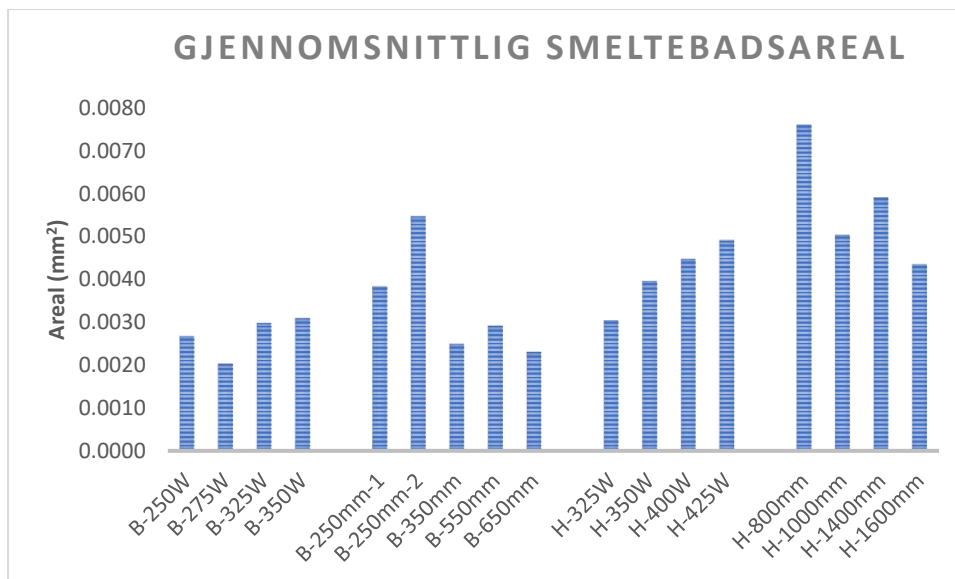


Figur 15: Smeltebad i prøve H-325W

Tabell 7 viser gjennomsnittlig størrelse på de ulike prøvene som bestemt ved Heyns lineal intercept metoden. Gjennomsnittet er beregnet ut fra antall kryssninger i fem mikroskopbilder med 10x-20x forstørrelse per prøve. Snittarealet er beregnet basert på antagelsen om at smeltebadene har elliptisk geometri. Figur 16 viser smeltebadsarealene i et stolpediagram.

Tabell 7: Gjennomsnittsstørrelse på smeltebad bestemt med Heyns lineal intercept metoden

Prøve	Gjennomsnittlig lengde i Byggeretning(mm)	Gjennomsnittlig lengde normalt på byggeretning(mm)	Gjennomsnittlig areal (ellipse) (mm ²)
B-250W-1	0,0742	0,0459	0,0027
B-275W-1	0,0555	0,0467	0,0020
B-325W-1	0,0707	0,0536	0,0030
B-350W-1	0,0554	0,0711	0,0031
B-250mm-1	0,0740	0,0659	0,0038
B-250mm-2	0,0914	0,0762	0,0055
B-350mm-1	0,0606	0,0523	0,0025
B-550mm-1	0,0694	0,0536	0,0029
B-650mm-1	0,0647	0,0454	0,0023
H-325W-1	0,1012	0,0382	0,0030
H-350W-1	0,1067	0,0472	0,0040
H-400W-1	0,1300	0,0438	0,0045
H-425W-1	0,1617	0,0387	0,0049
H-800mm-1	0,1631	0,0594	0,0076
H-1000mm-1	0,1313	0,0488	0,0050
H-1400mm-1	0,2012	0,0374	0,0059
H-1600mm-1	0,1584	0,0349	0,0043



Figur 16: Stolpediagram med gjennomsnittlig smeltebadsareal

For prøvene med varierende lasereffekt ser den gjennomsnittlige smeltebadstørrelsen ut til å øke med høyere effekt. Den samme korrelasjonen observeres for både hatch- og borderprøvene. Hatchprøvenes økning er omtrent dobbelt så stor som borderprøvene. Ved høyere laserhastighet er det målt mindre størrelse på smeltebadene, selv om noen av verdiene imellom den høyeste og laveste laserhastigheten fluktuerer noe. Tabell 8 viser standardavvik og konfidensintervall for de ulike målingene.

Tabell 8: Standardavvik og konfidensintervall for dimensjonene til smeltebad

Prøve	Standardavvik lengde i byggeretning	Standardavvik lengde normalt på byggeretning	konfidensintervall lengde i byggeretning	konfidensintervall for lengde normalt på byggeretning
B-250W-1	0,017	0,012	0,021	0,015
B-275W-1	0,009	0,022	0,011	0,027
B-325W-1	0,010	0,009	0,013	0,011
B-350W-1	0,011	0,008	0,014	0,010
B-250mm-1	0,012	0,004	0,015	0,004
B-250mm-2	0,027	0,025	0,034	0,031
B-350mm-1	0,012	0,008	0,015	0,010
B-550mm-1	0,016	0,009	0,020	0,011
B-650mm-1	0,004	0,006	0,005	0,007
H-325W-1	0,024	0,004	0,030	0,005
H-350W-1	0,026	0,007	0,033	0,009
H-400W-1	0,024	0,005	0,029	0,006
H-425W-1	0,049	0,007	0,061	0,008
H-800mm-1	0,013	0,009	0,016	0,012
H-1000mm-1	0,031	0,004	0,039	0,004
H-1400mm-1	0,046	0,002	0,057	0,002
H-1600mm-1	0,017	0,005	0,021	0,006

Konfidensintervallene har lave verdier, alle er under 0.1, men de har store variasjoner fra høyeste 0.061 til laveste 0,002.

5. Diskusjon

Det ble gjennomført hardhetsmålinger for å undersøke om det var en enkel korrelasjon mellom hardhet og laserparameterne til de 3D-printede Scalmalloyprøvene. Det var mulig å observere noen korrelasjoner ut fra disse målingene. Ved høyere laserhastigheter økte hardheten og smeltebadstørrelsen ble mindre. Årsaken til økningen i hardhet kan forklares ved at mindre korn øker styrken til metaller. Smeltebadstørrelsen kommer mest sannsynlig fra at LPBF har høy nedkjølningshastighet. Denne hastigheten vil øke ved høyere laserhastighet, etter som materialet ikke varmes av laseren like lenge.

Lasereffekten ser ut til å ha begrenset innvirkning på hardheten til prøvene. Uavhengig av lasereffekten har prøvene en gjennomsnittlig hardhet på rundt 163, med noen variasjoner. Dette kan skyldes at varmen aluminiumet smelter ved, har liten effekt på kornstørrelsen og smeltebad. Påvirkningen av lasereffekten kan ha blitt nøytralisert av den gjennomførte varmebehandlingen.

Et interessant punkt å fremheve er at gjennomsnittet av hardhetsmålingene ble målt til 163 (HV2), mens referanseverdien fra AP-Works er på 180 (HV0,3) [5]. Dette kan være et resultat av at AP-Works har målt hardheten med en last på 0,3kg. Ved lavere last kan hardhetsmålingen få utslag på mikrostrukturavhengige hardheter, som harde utfellinger. Studier har også vist at Sc- og Zr-modifisert Al-Mg-legeringer oppnår maksimal hardhet ved varmebehandling på rundt 5 timer [26]. Da prøvene brukt i denne oppgaven ble varmebehandlet i kortere tid, som beskrevet i kapittel 3.3, kan dette også være med på å forklare hvorfor hardhetsmålingene avviker fra produsentens spesifikasjoner.

Det ble også gjennomført porøsitetmålinger av samtlige prøver. Prøve B-250mm-1 blir behandlet som en statistisk uteligger ettersom porøsiteten var vesentlig høyere enn samtlige andre prøver. Uteliggeren hadde en porøsitet på 5.77%, mens gjennomsnittet ligger på 0.98%. Det ble derfor laget en ny prøve av reservesettet, B-250mm-2. Denne prøven er mer representativ med porøsitet på 0,43%. Uteliggeren kan ha forekommet av feil prosessparametere, eller muligens bare en feil i printeren. Uavhengig av hvor feilen kommer fra er det tydelig at prøven er en statistisk uteligger. Av denne grunn burde det ha vært flere prøver av hver enkelt parameter for å få statistisk gyldige resultater. Likevel viser B-250mm-1 at feil prosessparameter har store konsekvenser for kvaliteten til produktet.

Det er en mulig korrelasjon mellom synkende lasereffekt og minkende porer. Lav laserhastighet skal teoretisk gi mer porer [19], dette kan derimot ikke bli observert i datasettet. Mer data må til for å trekke noen konklusjoner. Derimot kan det være mer interessant og se på hvilke prøver som viser best resultater innen hvert sett. Dette kan indikere hvilke prosessparametere som er mest gunstige ovenfor porøsitet. Prøvene B-250mm-2, B-275W-1, H-1400mm-1, og H-350W-1 har lavest porøsitet, og det kan derfor være interessant og se nærmere på disse for å finne mer optimale prosessparametere. Parameterne brukt på disse prøvene er også nære standardparameterne som vist i tabell 4.

Størrelsen på smeltebadene ble beregnet ved bruk av Heyns lineal intercept metoden, som beskrevet i kapittel 3.4. ASTM E112-13 beskriver metoder for beregning av kornstørrelse, og er i utgangspunktet ikke tiltenk bruk i beregning av smeltebadsstørrelse. Heyns lineal intercept metode virker likevel å være anvendelig for denne oppgaven, ettersom den kan benyttes på kornstrukturer som ikke er likeaksede, slik som geometrien til smeltebadene på prøvene er.

Som sett i figur 14 og 15 i kapittel 4.3 kommer smeltebadene tydelig frem i lysmikroskopi med polarisert lys etter anodisering. Likevel er det noen områder som ikke er like lett å skille. Noen smeltebad glir over i hverandre og på grunn av de finkornede grensene kan de være vanskelig å skille, og dermed å telle. Derfor er det en usikkerhet rundt antall kryssninger per måling.

ASTM E112-13 beskriver tydelig kravene for at beregningene ved Heyns lineal intercept metoden skal være gyldige, altså at de har en relativ nøyaktighet (RA) på under 10 %. Flere av målingene hadde ikke lav nok RA til å innfri dette kravet. Dette betyr at gjennomsnittsårealeet til flere av prøvene ikke er veldig presise. Likevel viser disse arealene en korrelasjon som er i samsvar med teorien. Selv om de enkelte gjennomsnittsmålingene er noe unøyaktige kan korrelasjonen være gyldig.

Tabell 2 i kapittel 2.2 viser hvilke defekter som normalt oppstår ved ulike parametere og parameternivåer. Ut fra tabellen kan det antas at balling ville kunne observeres på prøvene med lav lasereffekt eller høy laserhastighet. Dette var ikke tilfellet da ingen slike feil var synlig på de relevante prøvene. Dette kan forklares med at laserhastigheten ikke var høy nok eller lasereffekten lav nok, ettersom alle parameterne fortsatt var innenfor prosessvinduet. Det kan også være et resultat av at printekammeret hadde lavt nok oksygenivå til å begrense fenomenet [20]. Borderprøven B-250W-1 hadde lavere porøsitet enn gjennomsnittet og ingen tegn til de forventede defektene. På prøvene med høyest lasereffekt ble det heller ikke observert keyholing, som er den forventede defekten ved denne parameteren. Begge B-250mm prøvene hadde høy porøsitet i border, noe som stemmer med teorien, som sier at lav laserhastighet kan forårsake porøsitet [19].

Den europeiske kommisjonen klassifiserte scandium som en CRM (Critical raw material) i 2020. 99% av materialet produseres i Kina, Russland, og Ukraina, og EU er 100% importavhengig av materialet [12]. Det er kjent at disse landene er geopolitisk ustabile per i dag (2023). Dette vil si at det kan være aktuelt og finne løsninger for å redusere scandiuminnholdet i aluminiumslegeringer. Dette er et felt det er aktiv forskning på, men viser seg å være vanskelig ettersom tilførselen av scandium reduserer fremkomsten av varme sprekker i LPBF prosesser [29].

Som nevnt i kapittel 3.3 ble anodiseringsprosessen kjørt 15 sekunder i epoksyen. Dette var i utgangspunktet et uhell, men det ga gode resultater i lysmikroskopet. Det ble også forsøkt å anodisere i lengre og kortere tider gjennom epoksyen, men 15 sekunder ga best resultater. Av den grunn ble samme metode benyttet på samtlige prøver. Det er en mulighet at samme resultater kan oppnås ved å beregne motstanden i prøven og hvor mye strøm som må påføres gjennom prøven for å få en strøm på 0.2A. Dette er omtrent hvor høy strømmen var under anodisering gjennom epoksyen.

Innstøpningsmassen (epoksyen) som ble benyttet i denne oppgaven var hardere enn forventet, noe som skapte utfordringer når det kom til å preparere prøvene. Utfordringene innebar at harde karbonpartikler forurenset og skadet prøven i poleringsprosessen ved å ripe opp overflaten, ettersom karbonpartiklene var hardere enn aluminiumet som ble testet. Løsningen ble å bruke spesifikke poleringsduker og å dra nytte av erfaringen og ekspertisen til labingeniørene ved NTNU. Epoksyen ble benyttet da den var egnet for bruk i SEM. Ettersom SEM ikke ble brukt i forsøkene, burde en annen mer egnet epoksy ha blitt valgt til bruk i forsøket.

6. Konklusjon

I denne oppgaven ble påvirkningen på mikrostrukturen ved ulike prosessparametere i 3D-printet Scalmalloy undersøkt. Det ble observert flere mulige korrelasjoner som trenger mer data for å stadfeste. Målingene peker mot at økt laserhastighet innenfor prosessvinduet kan føre til økt hardhet og mindre smeltebadsstørrelse. Lasereffekten hadde begrenset innvirkning på hardheten, men høyere effekt kunne føre til større smeltebad. Porositetsmålingene ga ingen definitive resultater, men de viser en mulig korrelasjon mellom mindre lasereffekt og mindre porer innenfor prosessvinduet. Det ble ikke observert typiske defekter som balling og keyholing.

Denne oppgaven har gitt innsikt i påvirkningen av ulike prosessparameter på mikrostrukturen i 3D-printet Scalmalloy. Resultatene har lagt et grunnlag for videre forskning som kan bidra til å forbedre prosessen og oppnå mer optimale egenskaper i fremtidige 3D-printede metallkomponenter.

7. Referanser

- [1] AP Works, «Scalmalloy,» AP Works, [Internett]. Available: <https://www.apworks.de/scalmalloy>. [Funnet 8 mai 2023].
- [2] Velo3D, «Scalmalloy,» Velo3D, [Internett]. Available: <https://velo3d.com/material-scalmalloy/>. [Funnet 8 Mai 2023].
- [3] Smith Metal, «7000 Series Aluminium,» Smith Metal, [Internett]. Available: <https://www.smithmetal.com/7000-series-aluminium-alloys.htm>. [Funnet 8 mai 2023].
- [4] C. N. Kuo, P. C. Peng, D. H. Liu og C. Y. Chao, «Microstructure Evolution and Mechanical Property Response of 3D-Printed Scalmalloy with Different Heat-Treatment Times at 325 °C,» 29 mars 2021. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/4/555>. [Funnet 19 mai 2023].
- [5] APworks, «Scalmalloy® Material Data Sheet,» APworks, Taufkirchen, 2021.
- [6] F. Belevi, R. Casati, C. Andrianopoli, F. Cuccaro og M. Vedani, «Journal of Alloys and Compounds,» 30 November 2022. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838822029103>. [Funnet 2 mai 2023].
- [7] M. Awd, J. Tenkamp, M. Hirtler og S. Siddique, «Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Scalmalloy® Produced by Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition,» Desember 2017. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/17>. [Funnet 2 mai 2023].
- [8] K. Schmidtke, «Qualification of SLM : additive manufacturing for aluminium,» Januar 2020. [Internett]. Available: <https://tore.tuhh.de/handle/11420/4251>. [Funnet 2 mai 2023].
- [9] Alcotec, «How and why alloying elements are added to aluminum,» 2012. [Internett]. Available: <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/qa/How-and-why-alloying-elements-are-added-to-aluminum.cfm>. [Funnet 2 mai 2023].
- [10] AZO materials, «An Overview Of Aluminium-Scandium (AlSc),» 10 februar 2014. [Internett]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10670>. [Funnet 2 mai 2023].
- [11] T. L. S., Advanced aluminum alloys containing scandium : structure and properties, Amsterdam: Gordon and Breach, 1998.
- [12] European Commission, «Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability,» 3 Septmeber 2020. [Internett]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>. [Funnet 2 mai 2023].
- [13] Lamifil, «The advantages of Aluminum Zirconium alloys,» [Internett]. Available: <https://lamifil.be/2022/06/the-advantages-of-aluminum-zirconium-alloys/>. [Funnet 2 mai 2023].

- [14] J. Martin, «Materials for engineering,» 2006. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/manganese-alloys>. [Funnet 2 mai 2023].
- [15] N. Belov, Iron in aluminum alloys : impurity and alloying element, London: Taylor & Francis, 2002.
- [16] A. Aversa og P. Fino, «Materials Development by Additive Manufacturing Techniques: Special Issue on Materials Development by Additive Manufacturing Techniques,» 25 juli 2020. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/books/book/3522-materials-development-by-additive-manufacturing-techniques>. [Funnet 2 mai 2023].
- [17] M. Awd, J. Tenkamp, M. Hirtler, S. Siddique, M. Bambach og F. Walther, «Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Scalmalloy® Produced by Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition,» 23 desember 2017. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/17>. [Funnet 2 mai 2023].
- [18] Y. Shi, Materials for additive manufacturing (3D printing technology series), London: Academic Press an imprint of Elsevier Huazhong University of Science and Technology Press, 2021.
- [19] V. Pandiyan, R. Drissi-Daoudi, S. Shevchik, G. Masinelli, T. Le-Quang, R. Loge og K. Wasmer, «Deep transfer learning of additive manufacturing mechanisms across materials in metal-based laser powder bed fusion process,» mai 2022. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013622000437>. [Funnet 2 mai 2023].
- [20] L. Ruidi, L. Jinhui, S. Yusheng, W. Li og J. Wei, Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process., INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2012.
- [21] W. Wang og S. Y. Liang, «Prediction of molten pool height, contact angle, and balling occurrence in laser powder bed fusion,» 19 Januar 2022. [Internett]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08633-8>. [Funnet 2 mai 2023].
- [22] L. Wang, Y. Zhang, H. Y. Chia og W. Yan, «Mechanism of keyhole pore formation in metal additivemanufacturing,» 27 Januar 2022. [Internett]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41524-022-00699-6>. [Funnet 2 mai 2023].
- [23] M. Miyagi, H. Wang, R. Yoshida, H. Kawakami og T. Shoubu, «Effect of alloy element on weld pool dynamics in laser welding of aluminum alloys,» 28 August 2018. [Internett]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-31350-4>. [Funnet 19 mai 2023].
- [24] ASTM, «Standard Test Methods for Determining Average Grain Size,» 17 November 2021. [Internett]. Available: <https://www.astm.org/e0112-13r21.html>. [Funnet 10 mai 2023].
- [25] G. F. Vander Voort, «Color Metallography,» 2004. [Internett]. Available: <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/38/chapter/487201/Color-Metallography>. [Funnet 10 mai 2023].
- [26] A. B. Spierings, K. Dawson, K. Kern, F. Palm og K. Wegener, «SLM-processed Sc-and Zr-modified Al-Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of heat treatment,» 31 Juli 2017.

[Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509317308559>.
[Funnet 2 mai 2023].

- [27] W. D. Callister og D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering : an introduction*, Hoboken, N.J.: Wiley, 2020.
- [28] A. Spierings, K. Dawson, P. Uggowitzzer og K. Wegener, «Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al₃Sc particles and mechanical properties in Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys,» 15 februar 2018. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517310845>. [Funnet 16 mai 2023].
- [29] F. Beleli, R. Casati, C. Andrianopoli, F. Cuccaro og M. Vedani, «Investigation and characterization of an Al-Mg-Zr-Sc alloy with reduced Sc content for laser powder bed fusion,» 28 Juli 2022. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838822029103>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [30] M. Muhammad, P. Nezhadfar, S. Thompson, A. Saharan, N. Phan og N. Shamsaei, «A comparative investigation on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured aluminum alloys,» 1 februar 2021. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112321000256>. [Funnet 2 mai 2023].
- [31] M. Boutaous, X. Liu, D. A. Siginer og S. Xin, «Balling phenomenon in metallic laser based 3D printing process,» September 2021. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072921001769>. [Funnet 2 mai 2023].
- [32] Z. Ren, L. Gao, S. J. Clark, K. Fezzaa, P. Shevchenko, A. Choi, W. Everhart, A. D. Rollett, L. Chen og T. Sun, «Machine learning–aided real-time detection of keyhole pore generation in laser powder bed fusion,» 5 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.add4667>. [Funnet 2 mai 2023].
- [33] A. Martucci, A. Aversa, D. Manfredi, F. Bondioli, S. Biamino, D. Ugues, M. Lombardi og P. Fino, «Low-Power Laser Powder Bed Fusion Processing of Scalmalloy,» 26 april 2022. [Internett]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/9/3123>. [Funnet 2 mai 2023].
- [34] C. Marquez, J. D. Lopez, L. Gonzalez og J. Botana, «Study of the influence of laser energy density on the surface roughness of Scalmalloy® samples manufactured by DMLS technology,» 2021. [Internett]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1193/1/012036>. [Funnet 2 mai 2023].
- [35] L. Shuai og G. Hanjie, *Balling behavior of selective laser melting (SLM) magnesium alloy*, Materials, 2020.

8. Vedlegg

8.1 Vedlegg 1: Hardhetsmålinger

Prøve id	Border	Hatch
H-325W	168.3	171.5
	174.1	176.2
	176.2	175.0
	192.8	163.2
	177.00	165.0
	183.00	154.1
snitt	178.6	167.5

Prøve id	Border	Hatch
H-350W	165.0	172.1
	164.2	165.1
	163.8	165.0
	157.3	158.7
	180.5	158.7
	159.4	174.7
snitt	165.0	165.7

Prøve id	Border	Hatch
H-400W	165.8	166.7
	145.5	165.6
	140.3	179.4
	151.8	167.9
	128.6	176.4
	181.7	186.4
snitt	152.3	173.7

Prøve id	Border	Hatch
H-425W	150.1	171.1
	163.8	162.2
	169.7	170.5
	158.4	168.0
	158.3	170.1
	161.1	167.2
snitt	160.2	168.2

Prøve id	Border	Hatch
H-800mm	108.0	147.1
	118.1	166.3
	128.2	163.2
	128.7	162.0
	153.5	163.5
	137.2	161.7
snitt	129.0	160.6

Prøve id	Border	Hatch
H-1000mm	168.6	154.1
	157.2	167.9
	164.8	162.2
	135.2	160.5
	150.9	164.0
	159.2	164.2
snitt	156.0	162.2

Prøve id	Border	Hatch
H-1400mm	168.4	169.9
	162.5	178.5
	164.5	164.4
	159.4	166.3
	172.9	161.1
	156.8	172.6
snitt	164.1	168.8

Prøve id	Border	Hatch
H-1600mm	177.0	165.7
	147.1	168.7
	177.5	173.8
	174.3	173.4
	158.2	176.1
	175.2	170.0
snitt	168.2	171.3

Prøve id	Border	Hatch
B-250W	178.5	175.4
	146.0	165.7
	161.8	163.7
	167.4	170.3
	165.9	162.2
	164.4	181.8
snitt	164.0	169.9

Prøve id	Border	Hatch
B-275W	168.6	166.6
	146.6	162.3
	154.2	163.4
	147.5	170.9
	157.8	178.1
	170.5	160.0
snitt	157.5	166.9

Prøve id	Border	Hatch
B-325W	160.3	162.7
	155.4	164.7
	171	157.8
	163.8	170.4
	170.3	163.4
	116.2	165.5
snitt	156.2	164.1

Prøve id	Border	Hatch
B-350W	163.6	179.6
	166.2	171.0
	175.2	175.4
	174.4	164.0
	170.1	171.6
	162.3	170.0
snitt	168.6	171.9

Prøve id	Border	Hatch
B-250mm	101.7	147.5
	151.5	155.4
	157.0	152.8
	95.2	101.1
	158.4	141.4
	134.6	148.2
snitt	133.1	141.1

Prøve id	Border	Hatch
B-350mm	172.7	162.5
	158.5	173.6
	162.6	155.1
	159.5	163.1
	150.0	169.4
	174.2	164.6
snitt	162.9	164.7

Prøve id	Border	Hatch
B-550mm	168.4	173.1
	170.5	181.2
	168.3	185.9
	170.1	179.9
	164.4	165.1
	161.4	184.5
snitt	167.2	178.3

Prøve id	Border	Hatch
B-650mm	167.5	174.6
	165.2	176.7
	165.7	168.0
	165.8	173.4
	167.9	167.4
	165.5	168.3
snitt	166.3	171.4

8.2 Vedlegg 2: Porøsitetmålinger

Image	Antall porer	Pore areal (um ²)	Areal fraksjon (%)
B-250mm-2 1.jpg	119	452.3995	0.9357
B-250mm-2 2.jpg	64	47.6689	0.0735
B-250mm-2 3.jpg	136	165.8532	0.3996
B-250mm-2 4.jpg	157	72.1826	0.1879
B-250mm-2 5.jpg	155	72.5683	0.2516
B-250mm-2 6.jpg	119	100.3428	0.243
B-250mm-2 7.jpg	101	69.1385	0.1419
B-250mm-2 8.jpg	130	140.6563	0.3113
B-250mm-2 9.jpg	85	56.4458	0.0752
B-250mm-2 10.jpg	182	665.6419	1.6841
B-250mm-1 10x 1.jpg	158	1675.0535	6.0757
B-250mm-1 10x 2.jpg	200	1167.9107	4.9331
B-250mm-1 10x 3.jpg	249	1453.3133	7.2863
B-250mm-1 10x 4.jpg	315	706.7139	3.4957
B-250mm-1 10x 5.jpg	287	1307.7721	5.1946
B-250mm-1 10x 6.jpg	271	1201.4825	5.2581
B-250mm-1 10x 7.jpg	213	1636.351	4.6469
B-250mm-1 10x 8.jpg	235	2565.4365	10.8562
B-250mm-1 10x 9.jpg	212	2226.9341	7.595
B-250mm-1 10x 10.jpg	222	969.889	2.3636
B-350mm-1 10x 1.jpg	72	1190.9849	2.2391
B-350mm-1 10x 2.jpg	58	1801.7534	2.86433
B-350mm-1 10x 3.jpg	71	1355.0997	2.7429
B-350mm-1 10x 4.jpg	61	2202.1829	2.7094
B-350mm-1 10x 5.jpg	63	827.4814	1.3796
B-350mm-1 10x 6.jpg	96	519.9554	1.064
B-350mm-1 10x 7.jpg	179	702.3797	2.2599
B-350mm-1 10x 8.jpg	133	975.5074	1.9985
B-350mm-1 10x 9.jpg	95	827.4904	1.5653
B-350mm-1 10x 10.jpg	93	882.2863	1.666
B-550mm-1 10x 1.jpg	226	133.217	0.6118
B-550mm-1 10x 2.jpg	235	99.8068	0.3958
B-550mm-1 10x 3.jpg	286	262.6643	1.1352
B-550mm-1 10x 4.jpg	325	119.6704	0.6185
B-550mm-1 10x 5.jpg	336	376.9139	1.7206
B-550mm-1 10x 6.jpg	348	498.4267	2.3951
B-550mm-1 10x 7.jpg	311	538.2064	2.3604
B-550mm-1 10x 8.jpg	290	114.9261	0.491
B-550mm-1 10x 9.jpg	257	116.0415	0.4106
B-550mm-1 10x 10.jpg	303	250.62	0.9094
B-650mm-1 10x 1.jpg	257	154.4406	0.4128
B-650mm-1 10x 2.jpg	214	219.9834	0.7872
B-650mm-1 10x 3.jpg	288	160.3744	0.642
B-650mm-1 10x 4.jpg	276	180.6471	0.592

B-650mm-1 10x 5.jpg	232	106.8403	0.3224
B-650mm-1 10x 6.jpg	276	191.7274	0.7467
B-650mm-1 10x 7.jpg	218	429.0805	1.3482
B-650mm-1 10x 8.jpg	185	179.0621	0.3832
B-650mm-1 10x 9.jpg	275	517.752	1.5677
B-650mm-1 10x 10.jpg	238	90.6762	0.3191
B-250W-1 10x 1.jpg	138	155.1584	0.5124
B-250W-1 10x 2.jpg	139	180.887	0.5562
B-250W-1 10x 3.jpg	167	134.2686	0.4531
B-250W-1 10x 4.jpg	127	191.142	0.4616
B-250W-1 10x 5.jpg	117	333.4111	0.5765
B-250W-1 10x 6.jpg	139	243.4553	0.5539
B-250W-1 10x 7.jpg	131	71.7897	0.1918
B-250W-1 10x 8.jpg	176	984.5553	2.3782
B-250W-1 10x 9.jpg	173	475.1643	1.2358
B-250W-1 10x 10.jpg	136	115.4711	0.2427
B-275W-1 10x 1.jpg	142	152.2779	0.3329
B-275W-1 10x 2.jpg	115	56.9532	0.1172
B-275W-1 10x 3.jpg	126	270.0561	0.698
B-275W-1 10x 4.jpg	92	80.7551	0.1481
B-275W-1 10x 5.jpg	205	313.1455	1.3197
B-275W-1 10x 6.jpg	113	223.3354	0.564
B-275W-1 10x 8.jpg	91	593.7479	1.1688
B-275W-1 10x 7-2.jpg	67	577.5944	0.6369
B-275W-1 10x 9.jpg	121	398.6948	0.6865
B-275W-1 10x 10.jpg	118	127.128	0.2259
B-325W-1 10x 1.jpg	248	268.133	1.4689
B-325W-1 10x 2.jpg	50	433.9633	4.5692
B-325W-1 10x 3.jpg	142	285.6199	0.7991
B-325W-1 10x 5.jpg	163	188.5721	0.5185
B-325W-1 10x 4-2 .jpg	223	613.4613	2.7739
B-325W-1 10x 6.jpg	179	347.9958	1.1325
B-325W-1 10x 7.jpg	154	150.1379	0.3958
B-325W-1 10x 8.jpg	99	1046.278	2.1319
B-325W-1 10x 9.jpg	152	631.9708	1.625
B-325W-1 10x 10.jpg	110	136.8201	0.2689
B-350W-1 10x 1.jpg	45	619.8228	0.76381
B-350W-1 10x 2.jpg	133	479.3075	0.8922
B-350W-1 10x 3.jpg	100	465.9267	0.8218
B-350W-1 10x 4.jpg	146	1315.5916	3.0632
B-350W-1 10x 5.jpg	181	369.1157	1.1761
B-350W-1 10x 6.jpg	97	942.2358	1.4474
B-350W-1 10x 7.jpg	150	268.4135	0.6833
B-350W-1 10x 8.jpg	132	955.5776	1.8212
B-350W-1 10x 9.jpg	140	93.1614	0.2054
B-350W-1 10x 10.jpg	129	895.4833	1.8325
H-800mm-1 10x 1.jpg	92	161.6629	0.2371
H-800mm-1 10x 2.jpg	80	84.071	0.1428

H-800mm-1 10x 3.jpg	102	211.3036	0.3708
H-800mm-1 10x 4.jpg	85	949.5859	1.5216
H-800mm-1 10x 5.jpg	75	425.6687	0.6244
H-800mm-1 10x 6.jpg	78	637.1187	0.9309
H-800mm-1 10x 7.jpg	80	173.2815	0.3109
H-800mm-1 10x 8.jpg	93	144.3988	0.2152
H-800mm-1 10x 9.jpg	99	582.4343	0.7778
H-800mm-1 10x 10.jpg	62	932.1734	0.5529
H-1000mm-1 10x 1.jpg	434	131.0705	1.0532
H-1000mm-1 10x 2.jpg	431	125.1151	0.9056
H-1000mm-1 10x 4.jpg	490	116.3824	0.7783
H-1000mm-1 10x 3-2.jpg	412	205.7379	1.2646
H-1000mm-1 10x 5.jpg	480	128.4933	0.9128
H-1000mm-1 10x 6.jpg	537	221.6187	1.9593
H-1000mm-1 10x 7.jpg	571	136.1734	1.5144
H-1000mm-1 10x 8.jpg	516	145.6441	1.3247
H-1000mm-1 10x 9.jpg	479	116.5366	0.99
H-1000mm-1 10x 10.jpg	518	128.0096	1.0422
H-1400mm-1 10x 1.jpg	89	168.7805	0.2141
H-1400mm-1 10x 2.jpg	86	98.4173	0.0842
H-1400mm-1 10x 3.jpg	89	55.254	0.0459
H-1400mm-1 10x 4.jpg	88	156.1946	0.1733
H-1400mm-1 10x 5.jpg	76	474.8743	0.2246
H-1400mm-1 10x 6.jpg	108	1195.0448	1.2304
H-1400mm-1 10x 7.jpg	99	697.9329	0.5767
H-1400mm-1 10x 8.jpg	89	599.6314	0.4935
H-1400mm-1 10x 9.jpg	90	610.2118	0.5036
H-1400mm-1 10x 10.jpg	99	309.6353	0.2651
H-1600mm-1 10x 1.jpg	623	145.6477	2.0624
H-1600mm-1 10x 2.jpg	575	114.6449	1.3266
H-1600mm-1 10x 3.jpg	628	91.9486	1.1173
H-1600mm-1 10x 4.jpg	587	168.4822	1.8882
H-1600mm-1 10x 5.jpg	666	102.2837	1.514
H-1600mm-1 10x 6.jpg	639	122.5738	1.6692
H-1600mm-1 10x 7.jpg	609	139.1043	1.7089
H-1600mm-1 10x 8.jpg	629	103.976	1.2505
H-1600mm-1 10x 9.jpg	536	130.4305	1.4345
H-1600mm-1 10x 10.jpg	523	179.8595	1.8772
H-325W-1 10x 1.jpg	368	140.7989	0.6946
H-325W-1 10x 2.jpg	426	159.4358	1.3179
H-325W-1 10x 3.jpg	256	89.8032	0.3699
H-325W-1 10x 4.jpg	286	141.0768	0.6695
H-325W-1 10x 5.jpg	387	90.3078	0.5704
H-325W-1 10x 6.jpg	309	113.6368	0.5908
H-325W-1 10x 7.jpg	311	121.7695	0.653
H-325W-1 10x 8.jpg	328	165.0622	0.8003
H-325W-1 10x 9.jpg	388	117.9008	0.7598
H-325W-1 10x 10.jpg	282	113.5119	0.3904

H-350W-1 10x 1.jpg	275	108.9909	0.4774
H-350W-1 10x 2.jpg	278	134.6988	0.4699
H-350W-1 10x 3.jpg	243	76.6949	0.2641
H-350W-1 10x 4.jpg	233	116.1619	0.3699
H-350W-1 10x 5.jpg	232	223.0885	0.7395
H-350W-1 10x 6.jpg	230	169.8771	0.3129
H-350W-1 10x 7.jpg	275	161.7547	0.5635
H-350W-1 10x 8.jpg	276	124.9978	0.5624
H-350W-1 10x 9.jpg	249	113.5967	0.4776
H-350W-1 10x 10.jpg	275	128.3618	0.44
H-400W-1 10x 1.jpg	360	182.1738	1.1846
H-400W-1 10x 2.jpg	539	142.5799	1.5747
H-400W-1 10x 3.jpg	577	121.5304	1.3465
H-400W-1 10x 4.jpg	506	154.7387	1.6539
H-400W-1 10x 5.jpg	520	171.7498	1.809
H-400W-1 10x 6.jpg	424	259.7468	1.9034
H-400W-1 10x 7.jpg	468	164.7771	1.262
H-400W-1 10x 8.jpg	573	182.1089	2.2698
H-400W-1 10x 9.jpg	570	137.6027	1.5178
H-400W-1 10x 10.jpg	619	146.7894	1.9582
H-425W-1 10x 1.jpg	404	164.9783	0.928
H-425W-1 10x 2.jpg	342	150.5226	0.734
H-425W-1 10x 3.jpg	354	248.0748	1.1558
H-425W-1 10x 4.jpg	345	105.2628	0.6216
H-425W-1 10x 5.jpg	386	147.8643	0.7901
H-425W-1 10x 6.jpg	346	157.4744	0.771
H-425W-1 10x 7.jpg	375	113.6664	0.6307
H-425W-1 10x 8.jpg	355	143.212	0.8516
H-425W-1 10x 9.jpg	297	122.2036	0.5151
H-425W-1 10x 10.jpg	300	123.8252	0.6724

8.3 Vedlegg 3: Smeltebadmålinger

horisontal					
prøve	bilde nr	lengde (px)	lengde (mm)	antall kryssninger (P)	snittlengde smeltebad
B-250W	1	4526	0.656	16	0.041
	2	4616	0.669	20	0.033
	3	4661	0.676	14	0.048
	4	3605	0.522	8	0.065
	5	4309	0.624	15	0.042
B-275W	1	3933	0.570	13	0.044
	2	4373	0.634	14	0.045
	3	4013	0.582	7	0.083
	4	3049	0.442	13	0.034
	5	4213	0.611	12	0.027
B-325W	1	3561	0.516	9	0.057
	2	3765	0.546	13	0.042
	3	3537	0.513	8	0.064
	4	3181	0.461	10	0.046
	5	4041	0.586	10	0.059
B-350W	1	3873	0.561	7	0.080
	2	4317	0.626	10	0.063
	3	3837	0.556	9	0.062
	4	4125	0.598	8	0.075
	5	3689	0.535	7	0.076

vertikal					
prøve	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	snittlengde smeltebad
B-250W	1	2661	0.386	6	0.064
	2	2657	0.385	5	0.077
	3	2617	0.379	7	0.054
	4	2749	0.398	4	0.100
	5	2613	0.379	5	0.076
B-275W	1	2833	0.411	6	0.068
	2	2677	0.388	8	0.048
	3	2233	0.324	7	0.046
	4	2617	0.379	7	0.054
	5	2481	0.360	6	0.060
B-325W	1	2345	0.340	4	0.085
	2	2289	0.332	5	0.066
	3	2661	0.386	5	0.077
	4	2817	0.408	7	0.058

	5	2765	0.401	6	0.067
B-350W	1	2633	0.382	7	0.055
	2	2013	0.292	7	0.042
	3	2305	0.334	7	0.048
	4	2797	0.405	6	0.068
	5	2709	0.393	6	0.065

Horisontal					
prøve	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	snittlengde smeltebad
H-325W	1	3973	0.576	14	0.041
	2	4060	0.588	16	0.037
	3	4169	0.604	18	0.034
	4	4177	0.605	17	0.036
	5	3961	0.574	13	0.044
H-350W	1	4273	0.619	12	0.052
	2	4281	0.620	15	0.041
	3	4373	0.634	11	0.058
	4	4281	0.620	14	0.044
	5	4265	0.618	15	0.041
H-400W	1	4221	0.612	14	0.044
	2	4221	0.612	12	0.051
	3	4097	0.594	16	0.037
	4	4221	0.612	14	0.044
	5	4221	0.612	14	0.044
H-425W	1	4221	0.612	19	0.032
	2	4221	0.612	19	0.032
	3	4221	0.612	14	0.044
	4	4221	0.612	13	0.047
	5	4221	0.612	16	0.038

Vertikal					
	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	snittlengde smeltebad
H-325W	1	2893	0.839	11	0.076
	2	2885	0.836	8	0.105
	3	2901	0.841	6	0.140
	4	2785	0.807	9	0.090
	5	1973	0.572	6	0.095
H-350W	1	2917	0.846	7	0.121

	2	2957	0.857	6	0.143
	3	2209	0.640	6	0.107
	4	2757	0.799	10	0.080
	5	2877	0.834	10	0.083
H-400W	1	2829	0.820	6	0.137
	2	2989	0.866	9	0.096
	3	2945	0.854	7	0.122
	4	2777	0.805	5	0.161
	5	2777	0.805	6	0.134
H-425W	1	2565	0.743	6	0.124
	2	2573	0.746	5	0.149
	3	2873	0.833	6	0.139
	4	2569	0.745	5	0.149
	5	2565	0.743	3	0.248

Horisontal					
	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	Snittlengde Smeltebad
B-250mm	1	4005	0.580	7	0.083
	2	4225	0.612	9	0.068
	3	3097	0.449	8	0.056
	4	4133	0.599	10	0.060
	5	3465	0.502	8	0.063
B-250mm-2	1	4201	1.218	11	0.111
	2	3817	1.106	12	0.092
	3	3425	0.993	14	0.071
	4	4025	1.167	23	0.051
	5	4289	1.243	22	0.057
B-350mm	1	4200	0.609	12	0.051
	2	4477	0.649	12	0.054
	3	4577	0.663	14	0.047
	4	4455	0.646	13	0.050
	5	4117	0.597	10	0.060
B-550mm	1	4441	0.644	10	0.064
	2	4365	0.633	11	0.058
	3	4509	0.653	13	0.050
	4	3477	0.504	9	0.056
	5	3453	0.500	10	0.040

B-650mm	1	4777	0.692	16	0.043
	2	4453	0.645	15	0.043
	3	3225	0.467	11	0.042
	4	4709	0.682	16	0.043
	5	4617	0.669	12	0.056

vertikal					
prøve	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	Snittlengde Smeltebad
B-250mm	1	2689	0.390	6	0.065
	2	2541	0.368	6	0.061
	3	2345	0.340	4	0.085
	4	2417	0.350	4	0.088
	5	2449	0.355	5	0.071
B-250mm-2	1	2601	0.754	9	0.084
	2	2733	0.792	11	0.072
	3	2209	0.640	8	0.080
	4	2413	0.699	5	0.140
	5	2800	0.812	10	0.081
B-350mm	1	2425	0.351	6	0.059
	2	2641	0.383	7	0.055
	3	2705	0.392	5	0.078
	4	2233	0.324	5	0.065
	5	2909	0.422	9	0.047
B-550mm	1	2385	0.346	5	0.069
	2	2213	0.321	7	0.046
	3	2657	0.385	6	0.064
	4	2921	0.423	5	0.085
	5	1723	0.250	3	0.083
B-650mm	1	2369	0.343	5	0.069
	2	2361	0.342	5	0.068
	3	2493	0.361	6	0.060
	4	2517	0.365	6	0.061
	5	2709	0.393	6	0.065

horisontal					
prøve	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	Snittlengde Smeltebad
H-800mm	1	4477	0.649	9	0.072
	2	4617	0.669	12	0.056
	3	4545	0.659	14	0.047
	4	4397	0.637	11	0.058

	5	3977	0.576	9	0.064
H-1000mm	1	3881	0.562	12	0.047
	2	4345	0.630	13	0.048
	3	4265	0.618	13	0.048
	4	4185	0.607	11	0.055
	5	4465	0.647	14	0.046
H-1400mm	1	4645	0.673	18	0.037
	2	4441	0.644	18	0.036
	3	4441	0.644	18	0.036
	4	4341	0.629	16	0.039
	5	4285	0.621	16	0.039
H-1600mm	1	4025	0.583	17	0.034
	2	3993	0.579	14	0.041
	3	3977	0.576	18	0.032
	4	3881	0.562	19	0.030
	5	4393	0.637	17	0.037

vertikal					
prøve	bilde nr	l(px)	l(mm)	antall kryssninger (P)	Snittlengde Smeltebad
H-800mm	1	2625	0.761	5	0.152
	2	2573	0.746	5	0.149
	3	2785	0.807	5	0.161
	4	2445	0.709	4	0.177
	5	2425	0.703	4	0.176
H-1000mm	1	2345	0.680	8	0.085
	2	1877	0.544	4	0.136
	3	2269	0.658	5	0.132
	4	2397	0.695	4	0.174
	5	2697	0.782	6	0.130
H-1400mm	1	2413	0.699	4	0.175
	2	2649	0.768	3	0.256
	3	2569	0.745	4	0.186
	4	2493	0.723	3	0.241
	5	2553	0.740	5	0.148
H-1600mm	1	2405	0.697	5	0.139
	2	2745	0.796	5	0.159
	3	2849	0.826	5	0.165
	4	2525	0.732	4	0.183
	5	2505	0.726	5	0.145