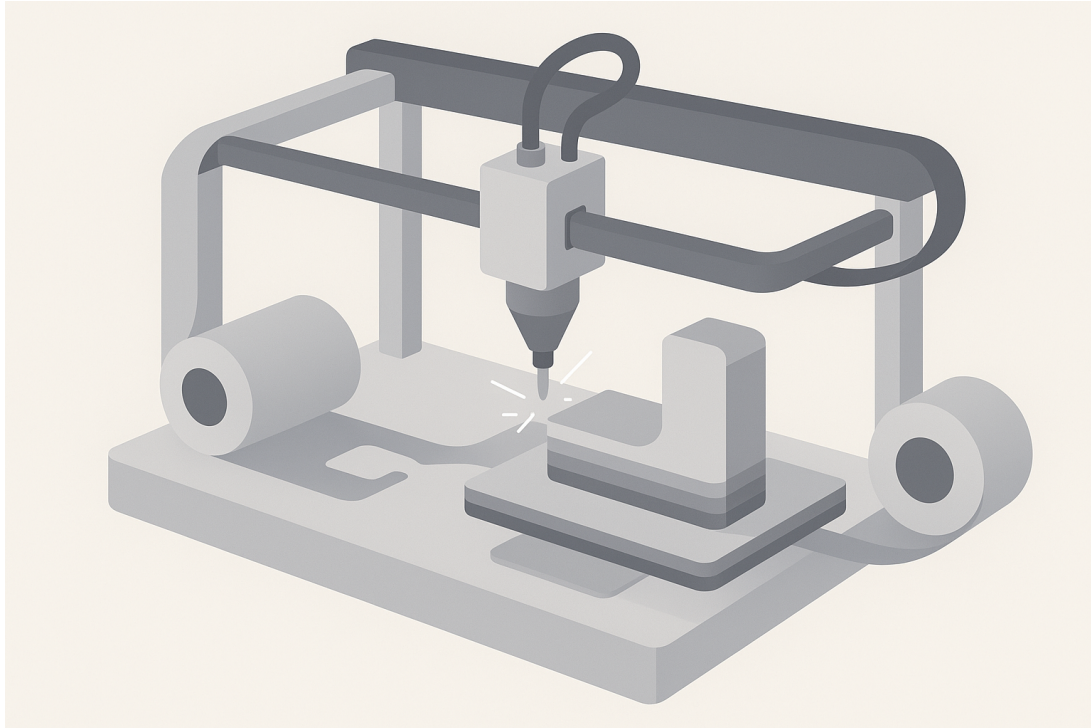




CHALMERS



# Utveckling av arklamineringsmetod för additiv tillverkning

Prototypframtagning av 3D-skrivare för arklaminering av aluminium

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet mekatronik

Alexander Hall  
Torsten Svenningsen

---

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE 2025

# Utveckling av arklamineringsmetod för additiv tillverkning

Prototypframtagning av 3D-skrivare för arklaminering av aluminium

Alexander Hall, Torsten Svenningsen



**CHALMERS**

Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola  
Göteborg 2025

Utveckling av arklamineringsmetod för additiv tillverkning  
Alexander Hall  
Torsten Svenningsen

© Alexander Hall, Torsten Svenningsen, 2025.

Handledare: Freddy Leijon, Richard Westergård, Gränges Finspång AB  
Examinator: Lars Nyborg, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Examensarbete 2025  
Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Genererad bild på en arklaminerings prototyp .

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2025

Utveckling av arklamineringsmetod för additiv tillverkning  
Prototypframtagning av 3D-skrivare för arklaminering av aluminium  
Alexander Hall Torsten Svenningsen

Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola

## Sammanfattning

Det här projektet dokumenterar processen för att utvärdera metoder för skärning och lödning av TRILLIUM<sup>®</sup>-pläterade aluminiumskikt. Det övergripande syftet är att utveckla en mer kostnadseffektiv metod för metallbaserad additiv tillverkning genom arklaminering av tunn aluminiumplåt. Utmaningen kan delas upp i två delar. Dels gäller det att skapa en 3D-skrivarbaserad tillskärning av geometri i 2D. Dels gäller det att skapa en fungerande fogning av aluminiumskikten. Arbetet är uppdelat i steg: en inledande introduktion och analys av problemställningen, en teoretisk del där olika metoder jämförs, en experimentell del där ett urval av metoder testas praktiskt och en prototyputvecklingsfas där utvalda metoder tillämpas mer direkt och implementeras för ett tänkt koncept. Resultaten visar att skärning med grafitstavar är möjlig teknik för skapa geometri i 2D. Dock behöver konceptet vidareutvecklas eller ersättas med alternativ metodik för uppnå tillförlitliga och precisa resultat avseende geometri. När det gäller fogningen har lödning med värmeplatta under tryck visat sig vara en fungerande metod. Arbetet har därmed visat att det finns en potential för utveckling av en mer kostnadseffektiv metallbaserad additiv tillverkningsmetod.

Nyckelord: TRILLIUM<sup>®</sup>, aluminium, skärning, lödning, additiv tillverkning, arklaminering, 3D-skrivare, metallbaserad AM, prototyputveckling.

## Abstract

This study documents the process of investigating methods for cutting and soldering TRILLIUM<sup>®</sup> clad aluminum sheet, with the aim of developing a more cost-effective method for metal-based additive manufacturing through sheet lamination. The work is divided into several parts: an introduction to the topic, a theoretical part where different methods are compared, an experimental part where a selection of these methods are tested practically, and prototype development phase where selected methods are applied more directly and implemented. For the cutting, the results show that cutting with graphite rods is possible but needs to be further developed or replaced by another approach to achieve reliable and precise results. In case of joining, soldering with a hot plate under pressure proved to be a working method. The project proves that there is potential for the development of a more cost-effective metal-based additive manufacturing method.

Keywords: TRILLIUM<sup>®</sup>, aluminum, cutting, soldering, additive manufacturing, sheet lamination, 3D printer, metal-based AM, prototype development.



## Förord

Examens projektet har genomförts tillsammans med Gränges Finspång AB, vid Institutionen för industri- och materialvetenskap på Chalmers tekniska högskola inom ramen för högskoleingenjörns utbildningen för mekatronik. Vi vill tacka Freddy Leijon och Richard Westergård för deras ledning som handledare under projektets gång. Vi vill även tacka R&I-avdelningen på Gränges för deras hjälp med projektet.

Ytterligare vill vi tacka Chalmerspersonal Peter Bäckgren på FUSE-laboratoriet och Rikard Karlsson på C.A.S.E. labbet för deras hjälp och expertis under projektets gång, med olika moment som genomfördes i dessa laboratorier.

Sist vill vi tacka Lars Nyborg för hans hjälp som examinator och vår främsta person att vända oss till på Chalmers med projektet.



# Akronymer

Nedan är en lista med de akronymer som används i rapporten, i alfabetisk ordning.

|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| AM      | Additive manufacturing            |
| PBF     | Powder bed fusion                 |
| PBF -LB | Powder bed fusion - laser beam    |
| DMLS    | Direct metal laser sintering      |
| SLM     | Selective laser melting           |
| PBF -EB | Powder bed fusion - electron beam |
| EBM     | Electron beam melting             |
| SHS     | Selective heat sintering          |
| SLS     | Selective laser sintering         |
| DED     | Directed energy deposition        |



# Innehåll

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Akronymer</b>                               | <b>ix</b>   |
| <b>Figurer</b>                                 | <b>xiii</b> |
| <b>Tabeller</b>                                | <b>xv</b>   |
| <b>1 Inledning</b>                             | <b>1</b>    |
| 1.1 Bakgrund . . . . .                         | 1           |
| 1.2 Syfte . . . . .                            | 1           |
| 1.3 Mål . . . . .                              | 2           |
| 1.4 Avgränsningar . . . . .                    | 2           |
| 1.5 Precisering av frågeställningen . . . . .  | 2           |
| <b>2 Teknisk bakgrund</b>                      | <b>3</b>    |
| 2.1 Metoder för additiv tillverkning . . . . . | 3           |
| 2.2 Material . . . . .                         | 4           |
| 2.2.1 Aluminium . . . . .                      | 4           |
| 2.2.2 TRILLIUM® . . . . .                      | 5           |
| 2.3 Skärnings metod . . . . .                  | 5           |
| 2.3.1 Laser . . . . .                          | 5           |
| 2.3.2 Knipning . . . . .                       | 6           |
| 2.3.3 Skärning med elektrod . . . . .          | 7           |
| <b>3 Metod</b>                                 | <b>9</b>    |
| 3.1 Säkerhet . . . . .                         | 9           |
| 3.2 Skärmetoder . . . . .                      | 10          |
| 3.2.1 Skärning med elektrod . . . . .          | 10          |
| 3.2.2 Laser . . . . .                          | 14          |
| 3.3 Lödning av lager . . . . .                 | 14          |
| 3.3.1 Laser . . . . .                          | 14          |
| 3.3.2 Värmeplatta . . . . .                    | 14          |
| 3.3.3 Värmeugn . . . . .                       | 15          |
| 3.4 Prototyp . . . . .                         | 15          |
| <b>4 Resultat och diskussion</b>               | <b>17</b>   |
| 4.1 Styrning av skärdon . . . . .              | 17          |
| 4.2 Skärning av material . . . . .             | 19          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.3      | Lödning av material . . . . .                        | 19        |
| 4.4      | Prototyp . . . . .                                   | 22        |
| 4.5      | Förbättringspotential . . . . .                      | 23        |
| 4.6      | Nästa steg i projektet . . . . .                     | 24        |
| <b>5</b> | <b>Sammanfattande diskussion och slutsatser</b>      | <b>25</b> |
| 5.1      | Frågeställning . . . . .                             | 25        |
|          | <b>Bibliography</b>                                  | <b>26</b> |
| <b>A</b> | <b>Bilaga A: Bilder på skärpeprov med grafitstav</b> | <b>I</b>  |

# Figurer

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | Diagram av TRILLIUM® Lean pläterat på kärnmaterial [5]. Figur visad med tillåtelse från Gränges. . . . . | 5   |
| 2.2  | Exempel på hur knipning kan gå till [9]. . . . .   | 6   |
| 2.3  | Resultat av skärning med knipning [8]. . . . .   | 6   |
| 3.1  | Resultat av handhållen skärning i aluminium med grafit elektrod. . . . .                                 | 11  |
| 3.2  | Försök att skära figurer/mönster med handhållen skärning med grafit elektrod. . . . .                    | 11  |
| 4.1  | Bild på creality K1 SE skrivare. . . . .   | 18  |
| 4.2  | Användargränssnitt för Mainsail [11]. . . . .  | 18  |
| 4.3  | Bild av en D formad CAD modell som används för testning av skärmetoden. . . . .                          | 19  |
| 4.4  | Bild av resultat från användning av automatiserad skärning. . . . .                                      | 19  |
| 4.5  | Graf med temperaturdata från lödningsförsök. . . . .   | 20  |
| 4.6  | Graf från lödningsförsök efter att temperaturdata har blivit justerat. . . . .                           | 20  |
| 4.7  | Flera lödningar på samma bunt av material med eller utan avkylning. . . . .                              | 21  |
| 4.8  | Snittbild på lödning med värmekammare. . . . .   | 21  |
| 4.9  | Lödfog, lödning med värmekammare. . . . .  | 21  |
| 4.10 | Snittbild på lödning med värmeplatta. . . . .  | 21  |
| 4.11 | Lödfog, lödning med värmeplatta. . . . .   | 21  |
| 4.12 | Bild av lödningsprototyp. . . . .  | 22  |
| 4.13 | Montering av elektrod på 3D-skrivare prototypen. . . . .   | 23  |
| A.1  | Skärtest för hand på 60-70 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 1. . . . .                            | I   |
| A.2  | Skärtest för hand på 60-70 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 2. . . . .                            | I   |
| A.3  | Skärtest för hand på 95-115 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 3. . . . .                           | II  |
| A.4  | Skärtest för hand på 95-115 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 4. . . . .                           | II  |
| A.5  | Skärtest för hand på 230-250 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 5. . . . .                          | II  |
| A.6  | Skärtest för hand på 230-250 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt, bild 6. . . . .                          | III |



# Tabeller

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Egenskaper hos aluminium [2]. . . . .   | 4  |
| 3.1  | Riskanalys . . . . .  | 9  |
| 3.2  | Skärtest för hand med snabb hastighet på 60-70 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .     | 11 |
| 3.3  | Skärtest för hand med medium hastighet på 60-70 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .    | 11 |
| 3.4  | Skärtest för hand med långsam hastighet på 60-70 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .   | 12 |
| 3.5  | Skärtest för hand med snabb hastighet på 95-115 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .    | 12 |
| 3.6  | Skärtest för hand med medium hastighet på 95-115 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .   | 12 |
| 3.7  | Skärtest för hand med långsam hastighet på 95-115 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .  | 12 |
| 3.8  | Skärtest för hand med snabb hastighet på 230-250 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .   | 12 |
| 3.9  | Skärtest för hand med medium hastighet på 230-250 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .  | 13 |
| 3.10 | Skärtest för hand med långsam hastighet på 230-250 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . . | 13 |
| 3.11 | Skärtest för hand med snabb hastighet på 400 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .       | 13 |
| 3.12 | Skärtest för hand med medium hastighet på 400 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .      | 13 |
| 3.13 | Skärtest för hand med långsam hastighet på 400 $\mu\text{m}$ tjock aluminiumplåt. . . . .     | 13 |



# 1

## Inledning

Inledningen ger en introduktion till projektet och vad det innebär. Avsnittet sammanfattar även projektets bakgrund, syfte och slutmål. Som vägledning för att nå målet formuleras även en övergripande frågeställning.

### 1.1 Bakgrund

Gränges Finspång AB utvecklar och producerar valsade aluminiumband för en rad olika områden som industriella produkter, fordonstillverkning och värmväxlartillverkning. Detta examensarbete är ett led i att undersöka en ny typ av additiv tillverkning i metall som är riktad mot priskänsliga marknader med lägre krav på kvalitet.

Marknaden för metall 3D-skrivning består i nuläget av maskiner i kostnads- spannet 0,5 MSEK – 50 MSEK, och bygger nästan uteslutande på pulverbäddsteknik (PBF), en additiv tillverkningsmetod där pulver sammanfogas lagervis genom smältning efter en given geometri från CAD. Den höga kostnaden är främst relaterad till kostnader för en högeffektlaser, lasersäkerhet, säkerheten kring metallpulverhantering och kostnader för pulvermaterial och tillverkningskostnaden med PBF. Pulverhanteringen och säkerheten begränsar även vilka lokaler och därmed vilka marknader som kan nås med nuvarande metallbaserad 3D-teknik. Det finns därmed en stor potentiell marknad för teknik som inte är pulverbaserad och som går att använda i kontor och hemmiljö.

### 1.2 Syfte

Detta projekt syftar till att undersöka hur valsade aluminiummaterial kan användas som startmaterial vid 3D-skrivning, Projektet är uppdelat i två delar. Första delen är ämnad att undersöka olika metoder för skärning av aluminiumplåt/aluminiumfolie i tjockleksintervallet 70 - 200  $\mu\text{m}$ . Den andra delen är inriktad på sammanfogning via lödning. Bägge delarna kommer till stor del utgöras av införskaffning och experimentell testning av olika metoder.

Resultatet förväntas undersöka potentialen för en ny AM-metod som skär ut konturer ur metall och löder ihop konturerna för att skapa utskrifter.

## 1.3 Mål

Målet är att undersöka olika skärnings- och lödningsmetoder och producera en prototyplösning som kan skriva ut demonstrationskomponenter.

## 1.4 Avgränsningar

De främsta avgränsningarna sker i prototypstadiet, där prototypen skapas genom att modifiera och kombinera kommersiella produkter. Beroende på de tidskrävande inledande stegen i projektet – såsom införskaffning av komponenter och produkter samt deras testning – kan även begränsningar uppstå i den fullskaliga prototypen, som i stället ersätts med att man enbart manipulerar 3D-skrivaren och löder separat i en annan prototyp.

## 1.5 Precisering av frågeställningen

Projektet kan presenteras med följande frågeställningar.

- Hur ska materialet effektivt och med precision skäras?
  - Kan materialet skäras med elektrod?
  - Kan laserskärning användas för tunt valsat aluminium?
  - Vilka alternativa metoder för skärning av aluminiumplåt är tillgängliga?
- Hur ska materialet lödas?
  - Kan punktlödning med don användas för sammanfogning av aluminiumplåt?
  - Är laserlödning en framkomlig väg för aluminium?
  - Kan flammabaserad lödning användas för att foga ihop ett eller flera lager av aluminium?
  - Kan en värmeplatta löda ihop ett eller flera lager av aluminium?
  - Kan batchlödning i ugn användas för lödning av ett eller flera lager av aluminium?
  - Finns det fler/bättre lödningsmetoder?
- Kan en prototyp med arklamineringsteknik för AM skapas?

Dessa frågor och projektet som en helhet kan kulmineras i en större fråga:

**Kan en ny AM-metod baserad på arklaminering med valsat aluminium som startmaterial kostnadseffektivt användas för 3D-skrivning av aluminiumkomponenter?**

# 2

## Teknisk bakgrund

Teknisk bakgrund täcker den teori och teknik som projektet utgår ifrån. Det som täcks är information om de material som används och olika metoder för additiv tillverkning som kan vara relevanta för projektet.

### 2.1 Metoder för additiv tillverkning

Additiv tillverkning också känt på engelska som *additive manufacturing* (AM) är en tillverkningsmetod som består av att lägga till material för att producera en produkt, till skillnad från mer traditionella metoder som använder subtraktiv tillverkning och går ut på att ta bort material för att producera produkter [1]. Det finns ett antal olika typer av AM-metoder [1]:

1. Powder bed fusion (PBF)
  - (a) AM processer som använder sig av PBF:
    - Powder bed fusion – laser beam (PBF-LB) även kallad direct metal laser sintering (DMLS) eller selective laser melting (SLM)
    - Powder bed fusion – electron beam (PBF-EB) eller electron beam melting (EBM)
    - Selective heat sintering (SHS)
    - Selective laser sintering (SLS)
  - (b) PBF-LB fungerar primärt med metall, men även med polymer. PBF-EB kan endast tillämpas på metall.
2. Binder jetting
  - (a) Material är polymerer, keramer och metaller.
  - (b) Kräver när det gäller keram och metall efterföljande processsteg för att sintra ihop grönkropp till slutlig metall komponent.
3. Materialextusion
  - (a) Material är plast/polymerer.
  - (b) Tekniken kan dock användas för att processa metallkomponenter genom att ha filament/granulat som har metallpulver som fyllmedel. Kräver dock i likhet med binder jetting efterföljande sintring.
4. Material jetting
  - (a) Material är polymerer.
  - (b) Inom AM men inte AM metall.
5. Directed energy deposition (DED)
  - (a) Kan producera delar med primärt metall.

### 6. VAT Photopolymerisation

- (a) Material är polymerer.
- (b) Tekniken kan dock idag även användas för att processa metall eller keram på liknade sätt som binder jetting med en första printprocess följt av sintring.

Av de olika AM-teknikerna finns det ett par metoder som kan producera metallkomponenter: PBF, binder jetting och DED [1]. Både PBF och Binder jetting är pulverbaserad tekniker som begränsas av samma risker och svårigheter med metallpulverhantering. DED som i sin enklaste form är robotiserad MIG-svetsning kan likt svetsning ej utföras i annat än verkstadslokaler på grund av rökutveckling. Ingen av de här metoderna är således anpassad för privatkunder.

## 2.2 Material

Det finns två huvudmaterial som är relevanta för detta projekt: aluminium och TRILLIUM®.

### 2.2.1 Aluminium

Aluminium är en metall som har många praktiska egenskaper och ett brett användningsområde. Aluminium används därför i alltifrån förpackningsmaterial till flygplan. Rent aluminium har en för låg hållfasthet för att kunna användas praktiskt, därför legeras nästan allt aluminium för att nå högre hållfasthet [2]. För projekt är aluminiums elektriska egenskaper och relativt låga smältpunkt önskvärt. Aluminiums höga värmeledningsförmåga har fördelar och nackdelar [2]. Fördelarna är under lödningsstadiet där den höga värmeöverföringen tillåter jämnare och snabbare lödning, medan för laserskäring leder den höga värmeledningsförmågan till att högre effekt behövs för att skära. Tabell 2.1 innehåller data om aluminium.

**Tabell 2.1:** Egenskaper hos aluminium [2].

| Egenskap  | Värde                |
|---|----------------------|
| Atomnummer  | 13                   |
| Atomvikt  | 26,982 gram          |
| Struktur  | Ytcentrerad kubisk   |
| Densitet, g/cm <sup>3</sup> 20°C                  | 2.7                  |
| Smältpunkt  | 660,37°C (1220,66°F) |
| Kokpunkt  | 2470°C (4478°F)      |
| Värmeutvidgningskoefficient, 10 <sup>-6</sup> /°C | 23                   |
| Elektrisk resistivitet, microohm-cm vid 20°C      | 2,7                  |
| Hårdhet, Mohs                                     | 2-2,9                |
| Reflektivitet                                     | 85-90%               |

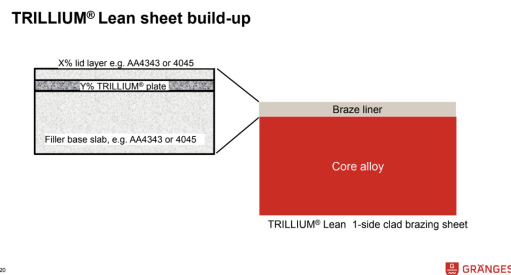
Det är också värt att nämna att aluminium har bra återvinningsbarhet [3], med tanke på att det kan uppstå en del processrelaterat skrot med den avsedda AM-tekniken. Eftersom materialet som används i processen produceras av Gränges och aluminium är återvinningsbart, finns det en potentiell affärsmodell att överväga genom att införa ett system där användaren skickar tillbaka processskrot till Gränges för att få rabatt vid köp av nytt material.

### 2.2.2 TRILLIUM<sup>®</sup>

TRILLIUM<sup>®</sup> i enkla termer är ett lodmaterial med flussmedel inbyggt i materialet. Det tillåter bättre lödning i miljöer med sämre förutsättningar jämfört med industristandard [4]. Tillämpningen för TRILLIUM<sup>®</sup> som är relevant för projektet är som lodmaterial på aluminiumplåt. Gränges har producerat två relevanta produkter med aluminiumplåt pläterad med TRILLIUM<sup>®</sup>:

- TRILLIUM<sup>®</sup>Solid
- TRILLIUM<sup>®</sup>Lean

TRILLIUM<sup>®</sup> Solid är aluminiumplåt pläterad med rent TRILLIUM<sup>®</sup>, men TRILLIUM<sup>®</sup> Lean är aluminiumplåt pläterad med lodmaterial som har ett tunt lager TRILLIUM<sup>®</sup> mellan kärnan och lodet [4]. Konsekvenserna av det är att TRILLIUM<sup>®</sup> Lean blir mycket billigare än TRILLIUM<sup>®</sup> Solid men har sämre lödningsförmåga. Nedan finns en bild på en aluminiumplåt pläterad med TRILLIUM<sup>®</sup> Lean. Om det var pläterad med TRILLIUM<sup>®</sup> Solid istället skulle "Braze liner" i bilden nedan vara rent TRILLIUM<sup>®</sup> utan något extra lod.



**Figur 2.1:** Diagram av TRILLIUM<sup>®</sup> Lean pläterat på kärnmaterial [5]. Figur visad med tillåtelse från Gränges.

## 2.3 Skärnings metod

Det finns ett antal potentiella metoder att skära aluminiumplåt med.

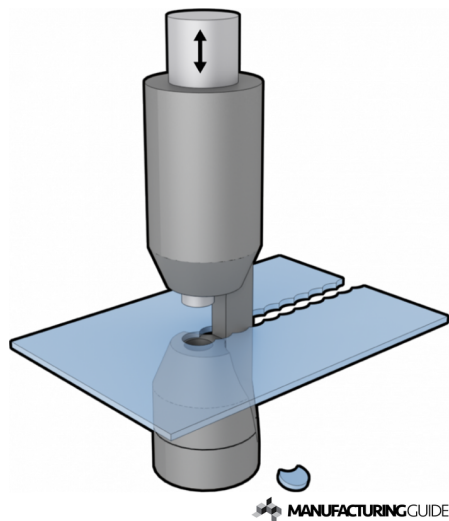
### 2.3.1 Laser

Laserskäring är en metod som kan skära igenom aluminium till precisa geometrier. Det finns ett antal olika typer av lasrar som används av olika typer av laserskärare,

där huvudsakliga skillnaden ligger i vilken våglängd de alstrar [6]. Tekniskt sett borde de flesta typer av lasrar med tillräckligt fokus och effekt skära aluminium, men energieffektiviteten är typiskt låg eftersom aluminium har hög reflektivitet över stora delar av det synliga spektrat och IR-spektrat. Aluminium absorberar mer vid korta våglängder om runt 400 - 500 nm, vilket innebär att blå diod-laser bör vara mer effektiv vid att skära aluminium, men även då kommer aluminiumplåten reflektera upp till 80% [7]. Även om det går att skära aluminiumplåten finns det en risk att lodet på plåten kan fylla ut skärningen eftersom snittets diameter är liten. Ännu ett problem med laserskärning är kostnaden för laserskärare samt lasersäkerhet, vilket kräver en lasercell.

### 2.3.2 Knipning

Knipning är en relativt simpel metod som innefattar två komponenter, en hård bas som aluminiumplåten ligger på och ett vasst och cirkelformat don som stansar ut ett hål i plåten [8]. Idén är att stansa hål längs skärningarna, i princip en hålslagare som stansar hål i linje tills en form blir utskuren. Undertill finns en bild (Figur 2.2) av hur knipningskomponenter skulle sitta ihop och en till bild på hur resultatet skulle kunna bli (Figur 2.3).



**Figur 2.2:** Exempel på hur knipning kan gå till [9].



**Figur 2.3:** Resultat av skärning med knipning [8].

Fördelarna med metoden är att den är enkel, vilket möjliggör enkel implementering. Det som behövs är en styrarm som kan åka upp och ned för att trycka hål, samt en basplatta som stödjer det material som pressas nedåt och följer den ände som trycks igenom [9]. Kostnaden för komponenterna bör vara lägre än med laserskärare som kan skära genom aluminium.

### 2.3.3 Skärning med elektrod

Skärningsmetoden med grafitelektrod bygger på principen med en positivt laddad grafitelektrod som förs mot en negativt laddad aluminiumplåt. När grafitstaven kommer i kontakt med aluminiumplåten sluts kretsen och grafitelektroden och aluminiumet vid kontaktpunkten värms resistivt [6]. Eftersom aluminium har en betydligt lägre smältpunkt än grafiten [10], är det möjligt att smälta sig igenom aluminiumplåten med hjälp av värmen. För att nå tillräcklig värme behövs en hög ström och spänning. Strömmen som behövs är direkt proportionell mot tjockleken som ska skäras.

Om spänningen höjs tillräckligt ändras metoden från skärning med ren värme till en metod som mer liknar plasmaskärare eller TIG-svetssskärning [6]. Med tillräckligt mycket spänning möjliggörs skapandet av en elektrisk ljusbåge, som sedan i sin tur punktvis smälter aluminiumplåten.

Det som är huvudfördelen med den här metoden är att den är relativt billig eftersom det som huvudsakligen behövs är en grafitelektrod och ett spänningsaggregat. Det finns också två olika versioner av skärning med grafitstaven. Metoden är relativt enkel att implementera eftersom i princip det enda som behövs är en styrarm för att hålla grafitelektroden förutom själva spänningsaggregatet. Det negativa är att den behöver höga strömmar och temperaturer, vilket innebär att det finns riskmoment när metoden används.



# 3

## Metod

Projektet delades upp i tre större delar: möjliga skärmetoder; möjliga lödningsmetoder samt styrning av skärdonet. Styrningen modellerades efter en treaxlad 3D-skrivare, som sedan modifierades för att skapa skärdonet istället för ett vanligt extruderingsmunstycke.

### 3.1 Säkerhet

Det finns ett antal säkerhetsfrågor som bör beaktas vid arbete med elektricitet och metall vid höga temperaturer. Nedan finns en Tabell 3.1 som går igenom potentiella risker och försiktighetsåtgärder.

**Tabell 3.1:** Riskanalys

| Risk                                  | Allvarlighet  | Försiktighetsåtgärd   |
|---------------------------------------|---|---|
| Brännskador på heta arbetsstycken     | Mycket allvarligt, brännskador från ca 600°C på material.                                   | Vidrör aldrig material under eller tills efter smältförsök tills det svalnar  |
| Elektrisk chock                       | Mycket allvarligt, ström genom kroppen är dödligt.  | Isolera exponerade ledningar och vidrör aldrig ledande material då strömmen är på.                                    |
| Rökbildning                           | Mindre allvarligt, lite rökutveckling   | Använd utsug vid skärning och lödning.  |
| Klämmaskador                          | Mycket allvarligt, att råka ha fingrarna i pressen när den används.                         | Ha aldrig fingrar i pressen när den ska användas för att undervidka. Den kommer också vara runt 600°C vid användning. |
| Synskada                              | Mindre allvarligt, lång exponering för en ljusbåge kan skada synen. Dock är ljusbågen svag. | Kolla inte direkt på ljusbågar vid skärning eller använd svetsglasögon.   |
| Skada på arbetsyta vid skärexperiment | Mindre allvarligt. Skada mot arbetsyta(arbetsbänk), kan bli dyrt att ersätta                | Montera materialet innan experiment för att inte riskera att smälta arbetsbänken                                      |
| Nättaggregatet går sönder             | Allvarligt, nättaggregaten är dyra  | Inte försöka överbelasta nättaggregatet (inte överskrida övre gränser)  |

Generellt kan vi från tabellen summera till att när risken är relaterad till potentiell personlig skada gäller det att undvika röra varma eller elektrifierade komponenter, eller om de behöver bli hanterade ska skydd användas. Om det inte räcker med att undvika aktiva komponenter ska skyddsutrustning användas, som skyddsglasögon eller gasutsug. Om risken är skador till utrustning ska arbetsytor skyddas och utrustning ska hanteras försiktig när tester pågår.

### 3.2 Skärmetoder

Den första delen av projektet bestod av att undersöka och utvärdera olika skärmetoder. De skärmetoderna som undersöktes var att skära aluminiumet med en laser eller med en elektrod.

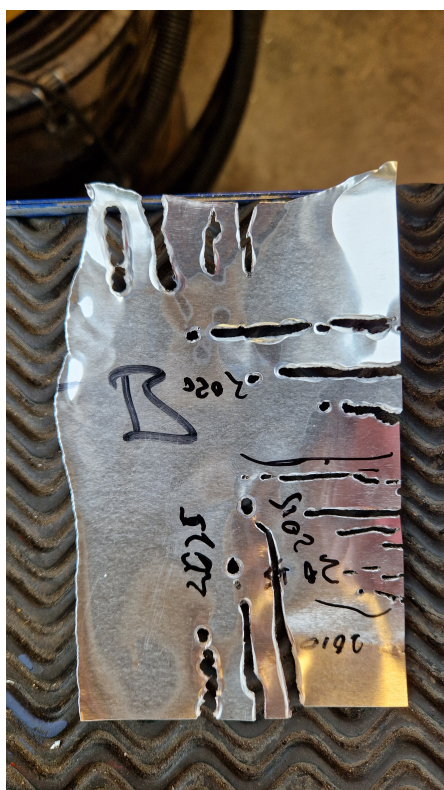
#### 3.2.1 Skärning med elektrod

Elektrodsärning består av resistiv uppvärmning mellan en aluminiumplåt och en grafit elektrod. Smältning uppstår på grund av den värme som bildas vid kontaktpunkten mellan aluminiumplåten och grafit elektroden. Det leder till att grafitpinnen hettas upp till över aluminiums smältpunkt (660 °C för renaluminium) och tillåter grafitpinnen att glida genom plåten och skära denna. Tester utfördes för hand under teststadiet för att snabbt hitta initialvärden för vidare tester.

Testerna bestod av att prova olika kombinationer av strömmar och spänningar, med begränsningar från 10A till 25A och med 10V till 45V. Olika tjocklekar av aluminiumplåten testades även från 60  $\mu\text{m}$  till 400  $\mu\text{m}$ . Resultaten av testerna varierade från ingen skärning alls till att det inte fanns något fysiskt motstånd mellan elektroden och plåten. Vid skärning vid 45V började ljusbågarna skapa metallgnistor, därav anledningen till att testmatriserna begränsades upp till 25V.

Polaritet mellan aluminiumplåten och grafitpinnen testades dessutom. När polariteten byttes till att aluminiumplåten var positiv och grafitpinnen var negativ blev skärningen mycket mer instabil. Under testerna märktes också att grafitpinnens spets spelade en kritisk roll och beroende på om den var skarp eller inte var resultatet varierande, vilket kan ha påverkat testerna. Tjockleken av grafitstavarna varierade från att vara en punkt till 3 mm bred på diametern.

Nedan finns två bilder från skärtesterna, Figur 3.1 där spänning, ström och hastighet har testats. Den andra, Figur 3.2 är ett skärtest som illustrerar hur det går att skära olika former. I bilaga A finns det fler bilder på de skärtester som genomfördes.



**Figur 3.1:** Resultat av handhållen skärning i aluminium med grafit elektrod.



**Figur 3.2:** Försök att skära figurer/mönster med handhållen skärning med grafit elektrod.

Nedan finns det tolv tabeller, från tabell 3.2 till tabell 3.13. Dessa visar försöksmatriser från skärtesterna och korrelerar med bilderna i bilaga A. Matriserna är uppdelade mellan hastighet och tjocklek. Inom försökmatriserna jämförs ström och spänning.

**Tabell 3.2:** Skärtest för hand med snabb hastighet på 60-70  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| snabbt | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V                |
|--------|------|------|------|---------------------|
| 10 A   | nej  | ja   | ja   | ja                  |
| 15 A   | nej  | ja   | ja   | ja                  |
| 20 A   | ja   | ja   | ja   | ja (dålig skärkant) |

**Tabell 3.3:** Skärtest för hand med medium hastighet på 60-70  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| medium | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V                |
|--------|------|------|------|---------------------|
| 10 A   | nej  | nej  | nej  | nej                 |
| 15 A   | nej  | ja   | ja   | ja (dålig skärkant) |
| 20 A   | ja   | ja   | ja   | ja (dålig skärkant) |

### 3. Metod

---

**Tabell 3.4:** Skärtest för hand med långsam hastighet på 60-70  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| långsamt | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V                |
|----------|------|------|------|---------------------|
| 10 A     | ja   | ja   | ja   | ja                  |
| 15 A     | nej  | ja   | ja   | ja (dålig skärkant) |
| 20 A     | bra  | ja   | ja   | ja (dålig skärkant) |

**Tabell 3.5:** Skärtest för hand med snabb hastighet på 95-115  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| snabbt | 10 V | 15 V | 20 V           | 25 V                  |
|--------|------|------|----------------|-----------------------|
| 10 A   | nej  | nej  | exceptionellt  | exceptionellt         |
| 15 A   | nej  | ja   | ja, stor radie | ja, mycket stor radie |
| 20 A   | nej  | ja   | ja, stor radie | ja, ojämn radie       |

**Tabell 3.6:** Skärtest för hand med medium hastighet på 95-115  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| medium | 10 V | 15 V        | 20 V           | 25 V                  |
|--------|------|-------------|----------------|-----------------------|
| 10 A   | nej  | suboptimalt | ja             | suboptimalt           |
| 15 A   | nej  | suboptimalt | ja, stor radie | ja, mycket stor radie |
| 20 A   | nej  | bra         | ja, stor radie | ja, ojämn radie       |

**Tabell 3.7:** Skärtest för hand med långsam hastighet på 95-115  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| långsamt | 10 V | 15 V        | 20 V           | 25 V                  |
|----------|------|-------------|----------------|-----------------------|
| 10 A     | nej  | nej         | ja             | suboptimalt           |
| 15 A     | nej  | suboptimalt | ja, stor radie | ja, mycket stor radie |
| 20 A     | nej  | ja          | ja, stor radie | ok                    |

**Tabell 3.8:** Skärtest för hand med snabb hastighet på 230-250  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| snabbt | 10 V | 15 V                          | 20 V         | 25 V           |
|--------|------|-------------------------------|--------------|----------------|
| 10 A   | nej  | nej                           | nej          | nej            |
| 15 A   | nej  | nej                           | nej          | nej            |
| 20 A   | nej  | fungerar men kan ej penetrera | fungerar väl | ja, stor radie |

**Tabell 3.9:** Skärtest för hand med medium hastighet på 230-250  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| medium | 10 V | 15 V                             | 20 V         | 25 V           |
|--------|------|----------------------------------|--------------|----------------|
| 10 A   | nej  | nej                              | nej          | nej            |
| 15 A   | nej  | nej                              | nej          | nej            |
| 20 A   | nej  | fungerar men kan<br>ej penetrera | fungerar väl | ja, stor radie |

**Tabell 3.10:** Skärtest för hand med långsam hastighet på 230-250  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| långsamt | 10 V | 15 V                             | 20 V         | 25 V           |
|----------|------|----------------------------------|--------------|----------------|
| 10 A     | nej  | nej                              | nej          | ja             |
| 15 A     | nej  | nej                              | nej          | nej            |
| 20 A     | nej  | fungerar men kan<br>ej penetrera | fungerar väl | ja, stor radie |

**Tabell 3.11:** Skärtest för hand med snabb hastighet på 400  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| snabbt | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V |
|--------|------|------|------|------|
| 10 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 15 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 20 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |

**Tabell 3.12:** Skärtest för hand med medium hastighet på 400  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| medium | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V |
|--------|------|------|------|------|
| 10 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 15 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 20 A   | nej  | nej  | nej  | nej  |

**Tabell 3.13:** Skärtest för hand med långsam hastighet på 400  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt.

| långsamt | 10 V | 15 V | 20 V | 25 V |
|----------|------|------|------|------|
| 10 A     | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 15 A     | nej  | nej  | nej  | nej  |
| 20 A     | nej  | nej  | nej  | nej  |

Slutsatsen som kan dras från matriserna ovanifrån är att skärning med elektrod genom aluminiumplåt är möjligt, men bara upp till en tjocklek av 250  $\mu\text{m}$ . Större tjocklekar kan vara möjliga, men en högre spänning och ström kombination behövs.

#### 3.2.2 Laser

Det undersöktes om en 130W CO<sub>2</sub>-laser (Nova 14 Elite från Aeon) kan skära aluminium. En 100 µm tjock aluminiumplåt som delvis var täckt med maskeringstejp placerades i laserkammaren. Sedan kördes en rät linje först på den otejpade sidan av aluminiumplåten, i två omgångar. Först med en passering och sedan med fem passeringar. Likväl skars den tejpade delen. Resultatet var att ingen del av materialet var genomskuret, men den tejpade delen var delvis skuren och hade vissa hål längs med linjen. Aluminiums höga reflektans i IR-spektrumet samt dess goda värmeledningsförmåga medförde att värmen från lasern spred sig för snabbt, och aluminiumet inte kunde smälta. Den tejpade sidan (som även kunde vara en sotad sida) minskade den reflektiva ytan och mer av värmen från lasern kunde koncentreras.

Slutsatsen till undersökningen var att användandet av en CO<sub>2</sub>-laser som skärmetod gav inte önskade resultat, och metoden implementeras inte vidare. Det ska noteras att laserskärning i aluminium är en industriell teknik, vilket innebär att vidare utveckling borde ge ett fungerande resultat.

### 3.3 Lödning av lager

Flera metoder undersöktes för att hitta en väl fungerande lödningsslagmetod.

#### 3.3.1 Laser

En bit solid TRILLIUM<sup>®</sup>-plåt med tjocklek på 100 µm placerades mellan två aluminiumplåtar av samma tjocklek. Plåtarna tejpades ihop med maskeringstejp och liknade till skärningen med CO<sub>2</sub>-lasern, prövades hur det gick att löda ihop buntarna av plåtar med olika antal passeringar. Likt skärningen provades lödning direkt på aluminiumplåtens yta och resultatet var obemärkt. Sedan provades lödning ovanpå maskeringstejpen, vilket ledde till att plåtarna sammanfogades. Resultatet från lödningsförsöken är att aluminiumytan behöver behandlas genom att sotas eller tejpas för att åstadkomma en fog. Därför drogs slutsatsen att lödning med laser inte vidare undersöktes.

#### 3.3.2 Värmeplatta

Värmeplattan är en rostfri stålplatta med tre hål med termostavar i sig som värmer upp plattan och är monterad i en handpress. I det här testet regleras värmen genom att kontrollera effekten med en potentiometer, som värmestavarna matas med. Buntar med 2, 5 och 10 aluminiumplåtar testades med olika effekter. En bunt läggs under värmeplattan och pressen används för att pressa ihop. Effekten ökades och sänktes sedan tills ett stabilt tillstånd uppnåddes. Den stabila effekten var cirka 400 W. Vid handhavande av värmeplattan användes 5-10 kg tryck på handpressens hävarm. En uppskattning av trycket som appliceras på plattan kan räknas ut:

$$F = m \cdot g \tag{3.1}$$

$$F_{\text{ut}} = \frac{F_{\text{in}} \cdot L_{\text{in}}}{L_{\text{ut}}} \quad (3.2)$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$P = \frac{m \cdot g \cdot L_{\text{in}}}{L_{\text{ut}} \cdot A} \quad (3.4)$$

Parametrar:

$$F_1 = 5 \text{ kg}$$

$$F_2 = 10 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L_{\text{in}} = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

$$L_{\text{ut}} = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$$

$$A = 60 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m} \cdot 0,06 \text{ m} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Resultat:

$$P_1 = \frac{5 \cdot 9,81 \cdot 0,4}{0,05 \cdot 0,0036} \approx 109 \text{ kPa} \quad (3.5)$$

$$P_2 = \frac{10 \cdot 9,81 \cdot 0,4}{0,05 \cdot 0,0036} \approx 218 \text{ kPa} \quad (3.6)$$

Trycket på värmeplattan under handhavande är sålunda cirka 100 - 200 kPa.

### 3.3.3 Värmeugn

Vid ugnslödning värms materialet långsamt tills lodets smältpunkt nås, därefter kyls allt ned så att lodet stelnar. Lödmetoden testades genom att lägga 20 aluminiumplåtar på varandra med en vikt placerad på mitten av högen plåtar. Högen placerades i värmeugnen och ugnscykeln startades. Ugnscykeln består av följande delar; långsam uppvärmning med 50° C/h min till 600° C utan hålltid, med en nedkylning på 50°C/h tillbaka till rumstemperatur (25° C). Endast sektionen under vikt löddes samman. Kanterna av plattorna kunde inte lödas samman, troligen för att det inte fanns något tryck som pressade ihop dem där.

## 3.4 Prototyp

Efter genomförda tester enligt ovan påbörjades prototypstadiet av projektet. Den första delen av prototypstadiet var att besluta vilka skärnings- och lödningsmetoder som ska användas. Nästa steg var att införskaffa komponenter som behövs för de valda metoderna.

För skärningsmetoden beslutade vi att skärning med grafitstav var det mest effektiva. Skälet för valet var att det fanns tydliga resultat från testerna. De komponenter som behövde införskaffas var ett spänningsaggregat till strömförsörjning och en

enklare 3D-skrivare.

För lödningsmetoden beslutade vi att använda metoden med värmeplatta för att löda. Resonemanget för valet är att resultaten från testerna var lovande och metoden var snabb.

Lödstationen består därmed i huvudsak av en handpress där värmeplattan är monterad för att manuellt tillföra tryck och värme till aluminiumplattorna. Stationen genomgick två prototypfaser där först, med *proof-of-concept* i huvudtanke, en potentiometer kopplad till en dimmer reglerade effekten som värmestavarna (3x150W) mottar. Potentiometern kräver manuell reglering för att uppnå önskad temperatur, som mäts av med ett termoelement. Lödförsök genomfördes för att främst testa funktionaliteten av värmeplattan; samt om TRILLIUM<sup>®</sup> materialet kunde lödas på det genomtänka sättet.

När den manuellt styrda värmeplattan gav lyckade resultat påbörjades arbetet den andra prototypfasen med automatisering. Potentiometern byttes ut mot en PID-regulator som vidare kopplas till en dimmer och sedan till termostavarna. Termoelementet kopplades till regulatören och upphettningen av värmeplattan automatiserades. Värmeplattan justerar även temperaturen när den tar kontakt med de kalla aluminiumplattorna och ökar effekten för att åter nå den önskade temperaturen.

En Creality K1 SE 3D-skrivare inköptes för att modifieras till den slutgiltiga prototypen. 3D-skrivaren valdes för dess Open-source källkod och dess modifierbarhet. Dock framgick under projektets gång att skrivaren var svårmodifierad, då mjukvaran var låst med funktioner som inte gick att radera eller kringgå, samt att portar var avaktiverade på moderkortet för att göra det svårare att radera Crealitys mjukvara och installera om en ny mjukvara. Planen för modifieringarna var att använda en Raspberry Pi med mjukvaran Klipper och Mainsail till skrivaren och att skriva om moderkortet till ett slavkort, som skulle styras från Raspberryn. Moderkortet på skrivaren skulle då ersättas med Klipper, som är en mjukvara till 3D-skrivare som styr exempelvis motorer och liknande hårdvara på skrivaren. Då moderkortet inte skulle kunna genomföra egna kommandon utan bara genomföra kommandon från Raspberryn, kan det istället kallas för ett slavkort (ett moderkort utan förmågan att genomföra egna kommandon). Dock, på grund av Crealitys val att låsa vissa funktioner, skedde modifieringarna på ett annat sätt. Via SSH (Secure shell) installerades Mainsail direkt på skrivaren, vilket inte raderar Crealitys mjukvara men tillåter ett webbaserat användargränssnitt där G-kod kunde exekveras utan Crealitys för-program.

Hotendassemblyn på skrivaren monterades ner och skärdonet monterades istället. Skärdonet bestod av grafitstaven som monterades på ett kopparblock där även kabeln till spänningsaggregatet fästes.

# 4

## Resultat och diskussion

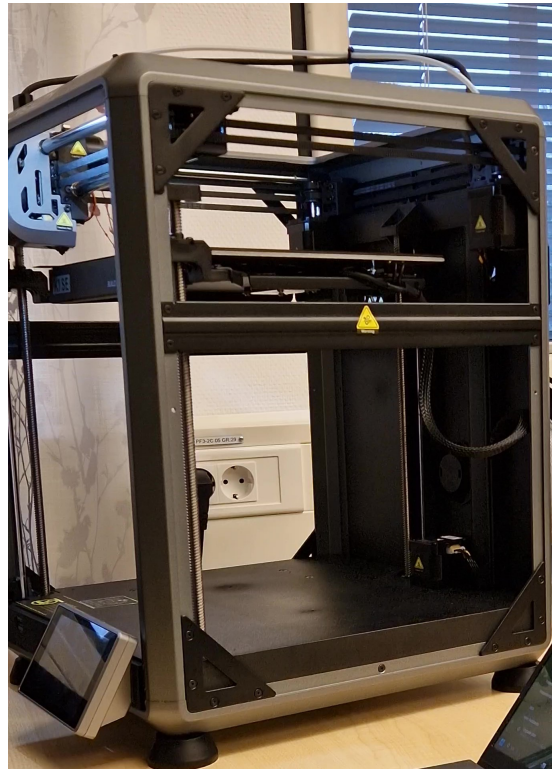
Projektet har visat potentialen med en ny metod för additiv tillverkning genom arklaminering av direkt lödbar aluminiumpålit. En fungerande experimentell prototyp som innefattar både skärning och lödning kunde inte realiseras inom den begränsade tiden som examensarbetet medgett. Nedan analyseras och diskuteras resultaten som underlag för slutsatserna av arbetet.

### 4.1 Styrning av skärdon

Tidigt i arbetet beslutades att en Creality K1 SE 3D-skrivare skulle införskaffas och modifieras för att styra skärdonet. Dock framstod flera problem med valet av skrivare. Modellen valdes främst för att den enligt uppgift var försedd med öppen källkod och lätt att modifiera, samt att den styrdes i Z-led med att höja och sänka arbetsbänken och inte skärdonet, vilket är en eftertraktad egenskap för prototypen.

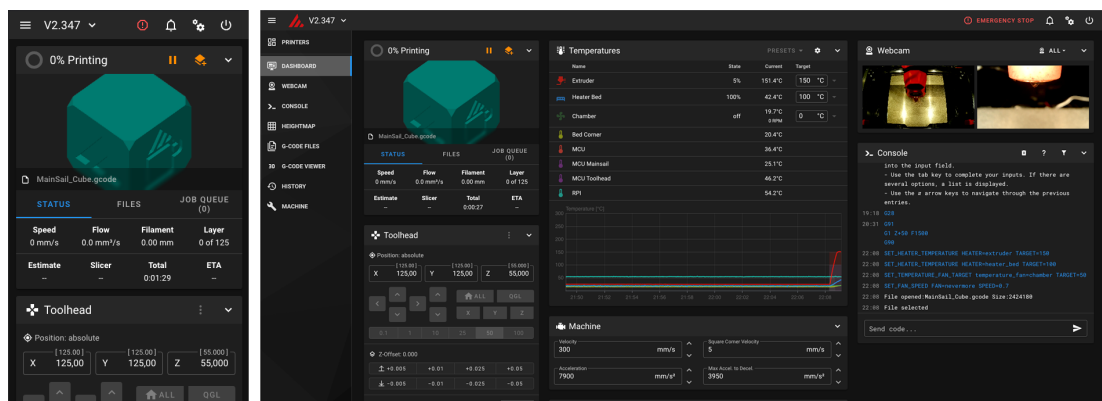
Modellen har också öppna sidor vilket skulle möjliggjort enkla modifieringar och övervakning. Dock tog det mycket tid och resurser att försöka modifiera källkoden och beteendet av skrivaren, utan lyckat utfall. Skrivaren kan styras manuellt men dess källkod kvarstår, vilket skapar problem då skrivaren vill "fungera rätt" och inte som vi efterfrågat för den tänkta tillämpningen. Det tydligare exemplet att representera utmaningen är att hotend-enheten, där plasttråden normalt hettas upp och matas ut inte kan demonteras utan att skrivaren låser sig med felmeddelanden. Vidare måste extra kod nu implementeras för att säkerställa att temperaturen på hotend-enheten inte överskrider rumstemperatur, då det annars medför en ökad risk för användaren. I efterhand kan det konstateras att det hade varit mer fördelaktigt att bygga en prototyp från grunden istället för att försöka modifiera en färdig skrivare. Det hade minskat problemen med styrning och sannolikt lett till ett bättre resultat.

## 4. Resultat och diskussion



Figur 4.1: Bild på creality K1 SE skrivare.

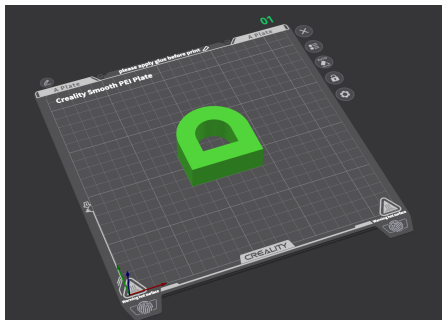
Styrningen av skärdonet sker via Mainsail, en mjukvara som tillåter webbaserad styrning av 3D-skrivare. Gränssnittet tillåter en användare att ladda upp G-kod och styra skrivaren över internet. Genom att mata G-kod som saknar temperaturdata och liknande hettas inte arbetsbädden eller hotend-enheten upp. I nuvarande skick laddas därför en G-kod med endast ett lager upp och prototypen skär ut formen.



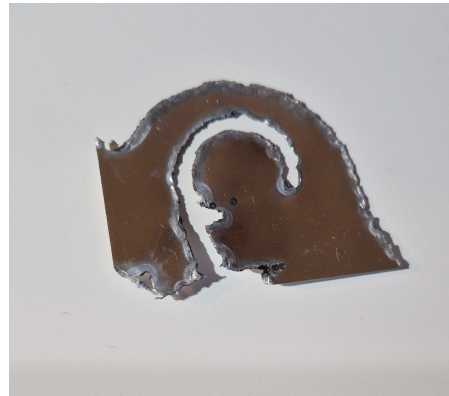
Figur 4.2: Användargränssnitt för Mainsail [11].

## 4.2 Skärning av material

Skärning med grafitstaven var en lovande skärmetod i första fasen av experiment då manuell skärning för hand genomfördes. För automatiserad körning visade sig metoden vara svårare att automatisera än befarat. Figur 4.3 och 4.4 illustrerar CAD-modell för skärförsök och resultat från automatiserad skärning. Möjligheten att finjustera rörelser och att göra små ändringar försvinner när ett program kör elektroden. Dessutom har små justeringar visat sig vara viktiga för lyckade skärförsök. Även finns den utmaning i att smält aluminium oxiderar och blir kvar på elektroden, vilket behöver hanteras och är svårt att kontrollera med automation. Diskussionen tar upp vidare förbättringspotential, men det är värt att säga att skärmetoden behöver vidare utveckling eller ersättas för att ge konsekventa resultat. Säkrast och mest konsekventa resultat ges förmodligen med en metod baserad på mekanisk skärning och ej smältning.



**Figur 4.3:** Bild av en D formad CAD modell som används för testning av skärmetoden.



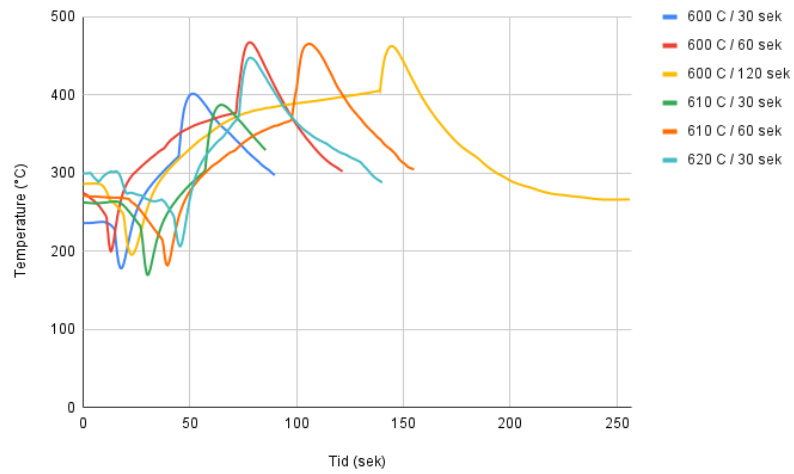
**Figur 4.4:** Bild av resultat från användning av automatiserad skärning.

## 4.3 Lödning av material

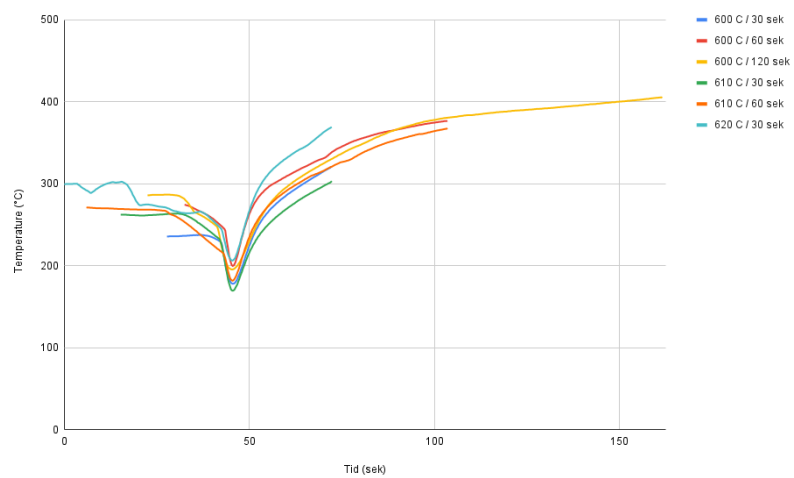
I projektet prioriterades lödning med värmeplatta endast på en prototypskala. Nästa steg är att producera en värmeplatta i full skala, och att ha värmestavar och värmeplatta med jämnare fördelning av temperatur. Även här finns förbättringspotential där det borde undersökas om en värmekammare kan omsluta skrivaren förvärma materialet, för att minska temperaturdippar och temperaturspikar och stabilisera lödningen. PID-regulatorn bör även reglera mot materialet som ska lödas eller åtminstone så nära som möjligt. Figur 4.5 illustrerar temperaturdata från värmeförsök där det tydligt framgår transienter i temperaturutvecklingen. Figur 4.6 visar resultat efter temperaturjustering. Figur 4.7 illustrerar slutligen resultat där värmning genomförts på samma bunt av plåtar med eller utan avkyllning.

## 4. Resultat och diskussion

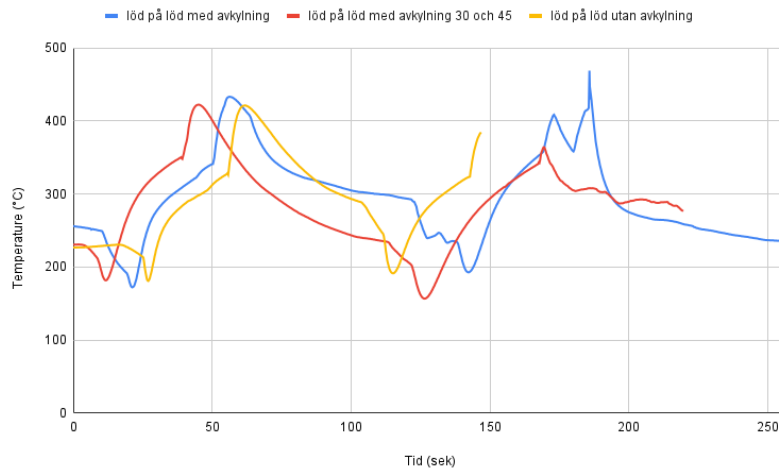
---



**Figur 4.5:** Graf med temperaturdata från lödningsförsök.

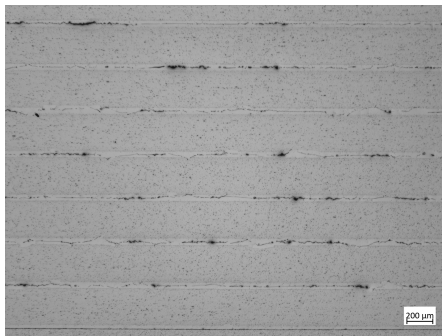


**Figur 4.6:** Graf från lödningsförsök efter att temperaturdata har blivit justerat.

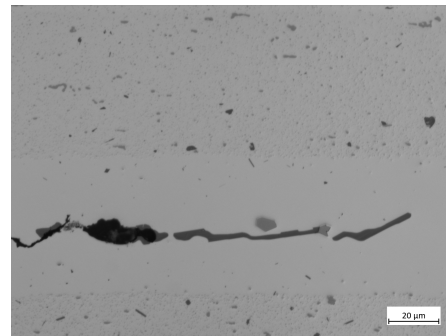


**Figur 4.7:** Flera lödningar på samma bunt av material med eller utan avkylning.

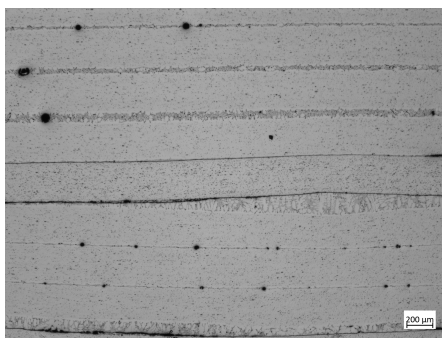
Metallografiska snitt av lödproverna jämfördes med motsvarande snitt för prover lödda i värmeugn. Värmeugnsprocessen varade i cirka 13 timmar, medan protoyplödningsen med värmeplatta innebar en cykeltid på cirka 1 minut.



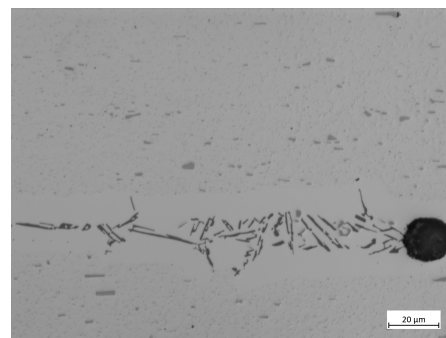
**Figur 4.8:** Snittbild på lödning med värmekammare.



**Figur 4.9:** Lödfog, lödning med värmekammare.



**Figur 4.10:** Snittbild på lödning med värmeplatta.



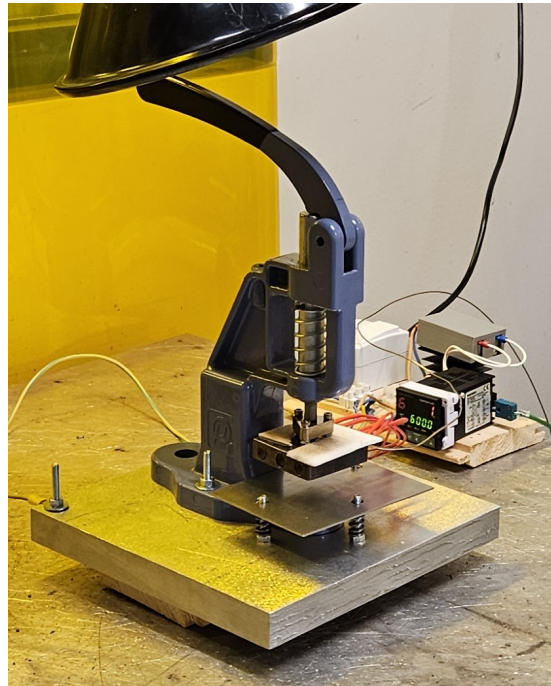
**Figur 4.11:** Lödfog, lödning med värmeplatta.

Lödning med värmeplattan ger snarlikt resultat jämfört med värmeugnen, samtidigt som lödningstiden reduceras med 99,9%. Mikrostrukturen vid kontaktlödning med

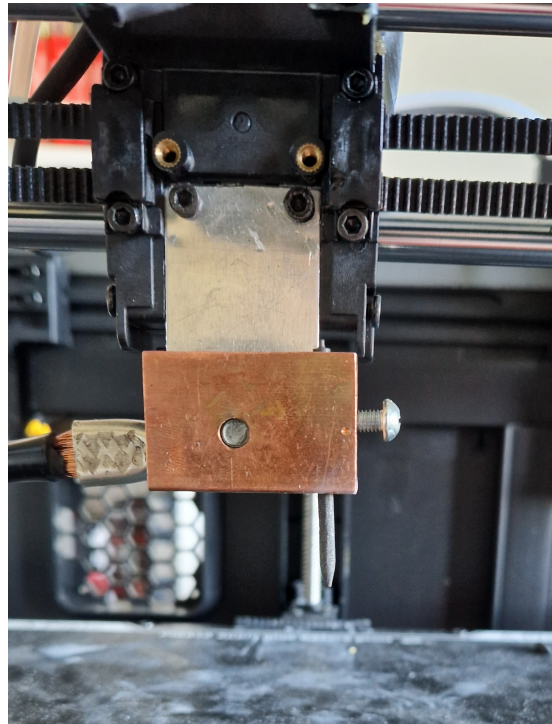
platta blev finare med avseende på materialstruktur, det vill säga kiselpartiklar i gjutstrukturen, vilket är fördelaktigt för dynamiska materialegenskaper.

### 4.4 Prototyp

Den experimentella prototypen där skärning och lödning kombineras nådde inte det uppsatta målet i sin helhet. Istället resulterade arbetet i utveckling av två distinkta koncept med verifierande test; ett för själva lödningsprocessen och ett annat för skärningsprocessen. Som tidigare resultat visar fungerar det ena konceptet enligt förväntan när det gäller lödningsprototypen (se Figur 4.12) medan det andra skapade fler problem än som kunde lösas. Dock kunde vissa funktioner lösas, se till exempel Figur 4.13 när det gäller montering av elektrod på en 3D-skrivare. Visionen att testa hela konceptet i en sammanhängande experimentell prototyp skalades därmed ner i ett tidigt skede av projektet.



**Figur 4.12:** Bild av lödningsprototyp.



**Figur 4.13:** Montering av elektrod på 3D-skrivare prototypen.

Det finns en fortsättningsplan där konceptet ska realiseras i sin helhet. Andra metoder för skärning kommer att utvärderas och den mest lovande metoden kommer att implementeras i en prototypmaskin. Materialet kommer att bestå av ett band med folie som matas genom maskinen och över arbetsbädden. Materialet kommer att vara bredare än arbetsytan för att agera stöd för enklare hantering av förbrukat material.

## 4.5 Förbättringspotential

Resultatet av examensarbetet utgörs av ett bevis av koncepttest för framtida additiv tillverkning av aluminiumdetaljer genom arklaminering. Det är möjligt att producera en 3D-skrivare för arklaminering av aluminiumplåt med integrerad ytbehandling för direkt lödning. Ytterligare utveckling krävs dock för att säkerställa en fullt fungerande prototyp. Resultatet visar också att en utmaning som kvarstår är säkerheten för användaren när det gäller implementering av teknik för skärning och lödning.

Det finns därmed ett antal områden som kan förbättras inom skärningen och lödningen. Det första som behöver förbättras är skärmetoderna. Det finns två huvudsakliga sätt att fortsätta med. Det ena är att förbättra den nuvarande skärmetoden och lösa problemen genom att antingen förbättra kontrollen och lösa problemet med oxidering. Det andra är att skrota denna skärmetod helt och fokusera på en annan skärmetod som laserskärning eller knipning. En mekanisk lösning bedöms kunna ge mer lovande resultat.

Den andra delen av prototypen som behöver förbättras är lödningsmetoden. Själva konceptet fungerar med en värmeplatta där värme tillförs samtidigt som man pressar samman en stapel av aluminiumplåtar. Konceptet är visat. Det som dock behöver förbättras är att gå från en manuell handpress till automatiserad styrning. Detta medger noggrannare kontroll av kraft och tid och därmed även snabbare processoptimering. Själva värmeplattan behöver också förbättras med avseende på värmeledningsförmåga samt en mer homogen temperaturfördelning. Ett sätt att uppnå detta skulle vara att övergå till koppar. En ytterligare aspekt som behöver förbättras skulle vara att hitta något material eller sätt som förhindrar att aluminiumet fäster sig på värmeplattan under lödning. Det noterades också att under testet absorberades mycket av värmen av pressen, så ännu en förbättring skulle kunna vara att förbättra värmeisoleringen för att förhindra att värme lämnar värmeplattan. Detta skulle kunna uppnås genom att använda komponenter tillverkade av material med lägre värmeledningsförmåga som titan. Den sista delen, och kanske den enklaste, skulle vara att se till att termostavarna går igenom hela värmeplattan eftersom de i prototypen inte går från ände till ände.

Det skulle också vara intressant att registrera temperaturen vid värmeplattan. Det finns ett termoelement i plattan, men det används bara för PID-regulatorn. Att ansluta termoelementet till en Arduino som redan registrerar botten temperaturen kan ge intressanta resultat och möjligtvis hjälpa till att reglera temperaturen bättre.

### 4.6 Nästa steg i projektet

Nästa steg i projektet efter att förbättringarna är slutförda skulle vara att konstruera en fungerande prototyp som innehåller både skär- och lödningsstegen i processen. Det innebär att båda metoderna för skärning och lödning måste testas och bekräftas och att de fungerar tillsammans. En design måste också utvecklas för att ta hänsyn till arbetsyta och avståndsbehov för de olika komponenterna. Efter att hela prototypen är konstruerad är nästa steg att utvärdera konceptet genom att tillverka/skriva ut en demonstrator. Demonstratorn bör vara designad så att olika aspekter kan utvärderas som, måttnoggrannhet, skrivhastighet, materialkvalitet, upplösning, etc.

Nästa steg efter att prototypen och demonstratorn blir utveckling av mjukvara, först för att konvertera godtyckliga 3D-modeller till G-kod som är kompatibel med prototypen. Denna process kommer troligtvis att vara tidskrävande eftersom protokoll måste utvecklas från grunden, i vilken ordning allting görs och hur det upprepas. Om det fungerar är det dags att utveckla användargränssnittet för att göra det enklare att använda.

# 5

## Sammanfattande diskussion och slutsatser

Här besvaras frågeställningen som projektet utgår ifrån.

### 5.1 Frågeställning

Hur har projektet besvarat frågeställningarna?

- Hur ska materialet skäras?
  - Är smältskärning med elektrod en gångbar skär metod?
  - Kan en laser skära aluminium i tjockleks intervall 100-250 $\mu$ m?
  - Kan en annan metod skära aluminiumet?

Projektet har visat att en elektrod kan skära aluminium som har en tjocklek upp till 250  $\mu$ m utan problem, och mellan 250  $\mu$ m - 400  $\mu$ m fungerar elektrodsärning lite sämre, fast skärning sker fortfarande. Projektet har även besvarat att en 130 W CO<sub>2</sub>-laser inte kan skära aluminiumfolie. Andra lasrar och andra metoder (främst knipning) har inte undersökts.

- Hur ska materialet lödas?
  - Kan en elektrod användas för att löda ihop lager av aluminium.
  - Kan en laser löda ihop lager av aluminium?
  - Kan en flamma löda ihop ett eller flera lager av aluminium?
  - Kan en värmeplatta löda ihop ett eller flera lager av aluminium?
  - Kan en ugnslödning, löda ihop multipla lager batch vis?
  - Finns det fler/bättre lödnings metoder för projektet?

Projektet har visat att en elektrod och en CO<sub>2</sub>laser inte kan löda ihop material. En ugnslödning kan löda ihop flera lager, då en vikt tilläggs för att pressa ihop aluminiumplåtarna. En värmeplatta kan löda aluminiumplåtar väl, med en applicerad tryckkraft på 5-10 kg (trycket ges genom att dela kraften med ytan på komponenten som löds). Likväl fungerar flamlödning för lödning av aluminium, men en testlödning undersöktes inte i detta projekt.

- Kan en prototyp AM-tillverkning med arklaminering skapas?

En lödningsprototyp kan skapas och presterar väl. På grund av valet av 3D-skrivare kunde en fungerande prototyp inte skapas under projektets gång. Dock kunde en prototyp skapas för att arklaminera aluminium. Slutsatsen är att en prototyp som byggts från grunden hade varit bättre än att modifiera en befintlig 3D-skrivare.

### **Kan en ny AM-metod i formen av ark-laminering genom lödning kostnadseffektivt 3D-skriva aluminiumprodukter?**

Projektet har inte visat att ark-laminering genom skärning och lödning kombinerat fungerar fullt ut genom en prototyp. Projektet har däremot visat att arklaminering genom lödning i sig kan användas som en AM-metod och vägen fram för att skapa en fullskalig prototyp för att skriva ut 3D-utskrifter i aluminium.

# Litteraturförteckning

- [1] Loughborough University, “About Additive Manufacturing”, 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (hämtad: 2025-06-04).
- [2] A. S. Russell, “Aluminum,” *AccessScience*, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.026400>
- [3] C. Schmitz, “Secondary aluminium,” i *Handbook of Aluminium Recycling (2nd Edition) - Mechanical Preparation - Metallurgical Processing - Heat Treatment*, 2:a. uppl. Vulkan Verlag, 2014, kap. 5, ss. 27-37. [Online] Tillgänglig: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpHAREMPM1/toc>, Hämtad: 2025-06-05.
- [4] Gränges, “MINDRE ARBETE, MER KAPACITET”, 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.granges.com/sv/trillium> (hämtad: 2025-06-04).
- [5] R. Westergård, S. Koscielski, A. Oskarsson, “TRILLIUM® - a new brazing technology for aluminium” opublicerad.
- [6] E. F. Steinert, “Arc welding,” *AccessScience*, Oct. 2019. doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.047100>
- [7] S. Patel, H. Chen, M. Vlasea, Y. Zou, “The influence of beam focus during laser powder bed fusion of a high reflectivity aluminium alloy — AlSi10Mg” *ScienceDirect*, vol. 59, nr. 6, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103112>
- [8] Boyi Technology, “Understanding Nibbling in Sheet Metal Fabrication”, 2024, [Online], Tillgänglig: <https://www.boyiprototyping.com/sheet-metal-fabrication-guide/nibbling-in-sheet-metal/>
- [9] Manufacturing guide, “Nibbling”, [Online], Tillgänglig: <https://www.manufacturingguide.com/sv/nibbling>
- [10] Moore, Paul B. , and H. F. Volk. “Graphite.” *AccessScience*, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.298300>
- [11] Mainsail, “Welcome to Mainsail”, 2024, [Online], Tillgänglig: <https://docs.mainsail.xyz/>



# A

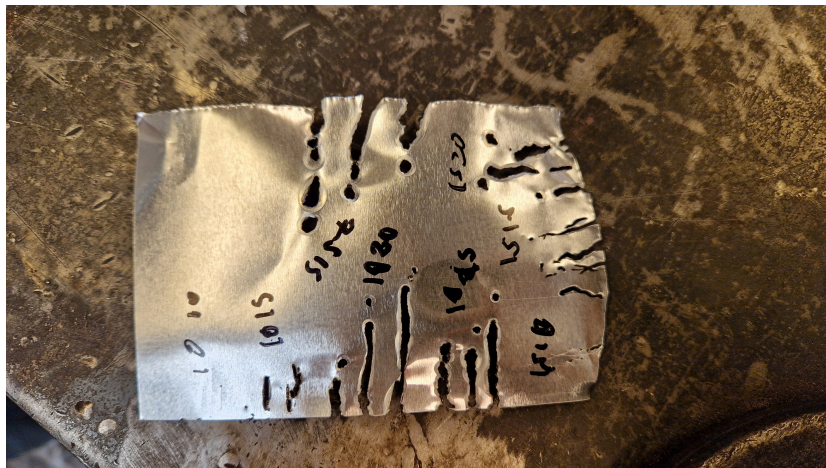
## Bilaga A: Bilder på skärpeprov med grafitstav



Figur A.1: Skärtest för hand på 60-70  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 1.



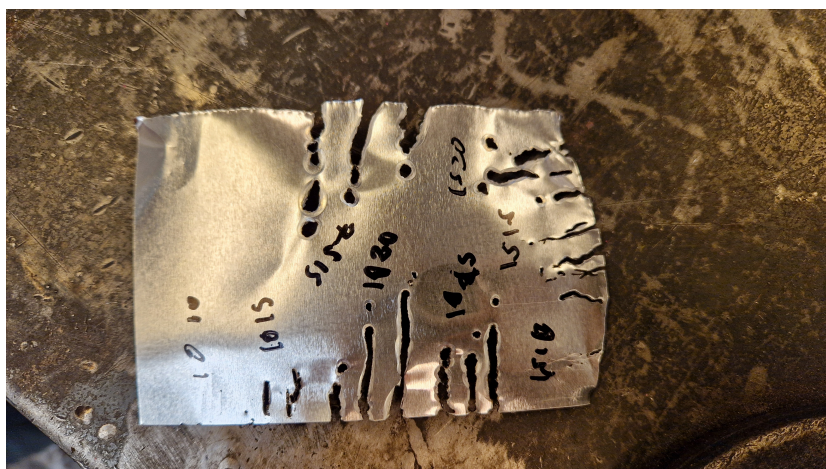
Figur A.2: Skärtest för hand på 60-70  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 2.



Figur A.3: Skärtest för hand på 95-115  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 3.



Figur A.4: Skärtest för hand på 95-115  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 4.



Figur A.5: Skärtest för hand på 230-250  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 5.



Figur A.6: Skärtest för hand på 230-250  $\mu\text{m}$  tjock aluminiumplåt, bild 6.

**INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP**  
**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**