Examensarbete

HÖGSKOLAN I SKÖVDE

Sammanfogningsmetoder för metallprofiler - Lådor och Ramar

Joining methods for metal profiles - Trays and Frames

Bachelor Degree Project in Production/Mechanical Engineering
G2E, 30 credits
Vårterminen 2023
(Examensarbete inom huvudområdet Produktionsteknik/Maskinteknik.
Grundnivå G2E, 30 Högskolepoäng
Vårtermin 2023)

Björn Rehnberg
Vincent Vallin Sälle

Supervisor/Handledare: Rohollah Ghasemi

Examiner/Examinator: Tobias Andersson

Sammanfattning

Sammanfogning av material är ett mycket populärt forskningsområde, till följd av dess centrala roll inom modern industri. Inom bilindustrin har efterfrågan ökat på sammanfogningsmetoder som kan bidra till viktreduktion och möta hållfasthetskraven, men också samexistera med mål som ställts på hållbar utveckling för framtiden. Detta arbete har gått ut på att, baserat på tillgänglig forskning och projektspecifikationen, göra ett urval av sammanfogningsmetoder som kan användas för att sammanfoga aluminiumprofiler. Dessa har sedan jämförts utifrån de mest centrala punkterna av intresse. De metoder som jämförts är MIG CMT-svetsning (Cold metal transfer; den preliminära metoden som valts av Aurobay), lasersvetsning, nitning, limning och hybridfogning med lim och nit. En stor del av arbetet har dedikerats åt att forska, och definiera de olika egenskaperna som metoderna besitter. Därefter togs beslut att praktiskt jämföra två metoder genom dragprovning, och dessa metoder blev ett tvåkomponents-epoxilim och CMT Pulssvetsning. Resultaten från dessa dragprover blev inte som förväntat, men många viktiga lärdomar erhölls om metoderna och deras egenskaper. En jämförelse mellan de utvalda metoderna gjordes sedan utifrån egenskaperna rörande hållfasthet, hållbarhet och produktionsaspekter. Parallellt med hela projektet gjordes försök att modellera en epoxifog med finita elementmetoden (FEM) i ABAQUS. Resultaten från modelleringen kunde dock inte användas för verifiering av dragproverna, eftersom komplexiteten underskattades.

Abstract

Joining of materials is a very popular area of research, as a result of its central role within modern industry. The automotive industry has seen an increase in demand for joining methods that can contribute to weight reduction and meet the criteria for strength, while co-existing with goals set for sustainable development for the future. The aim of this project has been to, based on available research and the project specification, make a selection of joining methods that can be used to join aluminium profiles. These have then been compared based on the most essential points of interest. The methods that were subjected to comparison were MIG CMT-welding (Cold metal transfer; the preliminary method chosen by Aurobay), laser welding, riveting, adhesive joining, and hybrid joining with rivets and adhesives. A large portion of the work has been dedicated to research and defining the different properties these methods possess. A decision was then made to practically compare two methods through tensile testing, and these methods were a two-component epoxy and CMT Pulse welding. The results from the tensile testing were inconclusive, but many important lessons were learned about the methods and their properties. A comparison between the methods was then performed with regards to their strength, sustainability, and production aspects. Finite element modelling of an epoxy joint was done in ABAQUS parallelly with the whole project. The results were unfortunately unusable for verification of the tensile tests, since the complexity of the modelling was underestimated.

Intyg

Denna uppsats har lämnats in av Vincent Vallin Sälle och Björn Rehnberg till Högskolan i Skövde som uppsats för erhållande av betyg för på grundnivå G2E inom huvudområdet Produktionsteknik/Maskinteknik.

Undertecknande intygar härmed att allt material i denna uppsats som inte är resultatet av eget arbete har redovisats med källangivelse. Uppsatsen innehåller inte heller material som undertecknande redan tidigare fått tillgodoräknat sig inom sina akademiska studier.

Vincent Vallin Sälle

Björn Rehnberg

Skövde 2023-05-16
Institutionen för Ingenjörsvetenskap

Innehållsförteckning

Sammanfattning I
Abstract II
Intyg III
1 Introduktion 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Problemformulering 1
1.3 Syfte och Mål 2
1.4 Avgränsning 2
1.5 Hållbarhetsperspektiv 2
1.6 Etik och moral 3
1.7 Översikt 3
2 Teoretiskt ramverk 4
2.1 Sammanfogningsprincipen 4
2.2 Aluminiumlegeringar 5
2.3 Val av sammanfogningsmetoder 6
3 Litteraturstudie 19
3.1 CMT 19
3.1.1 Sammanfogning av AA6061-AA5052 med CMT 19
3.1.2 Sammanfogning av AA6061-AA7N01 med CMT+P 20
3.2 Lasersvetsning 22
3.2.1 Sammanfogning av AA6016-T4 & AA6061 22
3.2.2 Undersökning av segmenterad/kontinuerlig fog & FEM-analys av AA6061 23
3.2.3 FEM-analys av ARM-laser för AA6061-T6 25
3.3 Nitning 26
3.3.1 SPR-epoxifog jämfört med PR-fog 26
3.3.2 Utvärdering av SPR-förband 27
3.3.3 Single-sided piercing rivets (SSPR) 29
3.4 Limning 32
3.4.1 Recension av FEA av limfogar 32
3.4.2 Adhesiv sammanfogning av A5754 med epoxi 33
3.5 Hybridfogning 34
3.5.1 FEM-analys av nitning/limning/hybridfog 34
3.5.2 Jämförelse av SPR-nitning/limning/hybridfog 35

3.6 Slutsatser från litteraturstudien ... 37
3.6.1 Genomförande och metod för analytiska undersökningar ... 37
3.6.2 Svetsmetoder ... 37
3.6.3 Limmade fogar ... 37
3.6.4 Nitade fogar ... 37
3.6.5 Hybridfogar ... 38
4 Metod & Genomförande ... 39
4.1 FE-analys ... 39
4.1.1 Hysol 9492 (Lim) ... 40
4.2 Dragprovning ... 41
4.2.1 ASTM D1002-10 (Utformning av limmad överlappsfog) ... 42
4.2.2 ASTM D2651-01 (Förberedning av limmade ytor) ... 42
4.2.3 Substrat ... 42
4.3 Dragprovsdata ... 43
5 Analys och Resultat ... 44
5.1 Sammanställning av sammanfogningsmetoder ... 44
5.2 Jämförelse av sammanfogningsmetoder ... 45
5.3 Dragprov ... 47
5.3.1 Svetsfogar ... 47
5.3.2 Limfogar ... 49
5.3.3 Sammanställning av belastningsvärden ... 50
5.3.4 Analys av brottytor ... 51
5.4 Modellering ... 52
5.4.2 Modell 1 ... 52
5.4.2 Modell 3 ... 53
6 Diskussion ... 56
6.1 Avgränsningar i metodval & material ... 56
6.2 Dragprover & Standarder ... 56
6.3 Modellering ... 57
6.4 Hållbarhetsaspekter ... 57
7 Slutsats ... 58
8 Framtida arbete ... 58
Referenser ... 59
Appendix ... 64
Appendix 1: Gantt-schema ... 64

1 Introduktion

Sammanfogning av detaljer har alltid varit en stor del av modern produktion. Det är ett viktigt moment att få komponenter att bilda en komplett produkt. Hur sammanfogningen sker är beroende av vad produkten är planerad att utsättas för användning, samt hur produkten ska behandlas efter att livslängden är förbrukad. Det finns olika metoder som kan väljas beroende på faktorer som exempelvis hållfasthet, producerbarhet, material- och verktygskostnad, mm. Det finns mer eller mindre permanenta lösningar på att kombinera två komponenter. Relaterat till området fordonsindustri sker en betydlig utredning för hur komponenter bör sammanfogas för att konstruera ett fordon för vägbruk. Vanliga typer av sammanfogning som kan komma till användning är mekaniska förband, limning, svetsning eller en kombination av dessa.

Tanken med projektet är att jämföra hur olika sammanfogningsmetoder påverkar konstrueringen och produktionen av ramar i aluminium eller stål för batterihållare som ska utvecklas i framtida projekt för utvecklingen av eldrivna fordon. Huvudkategorierna som kommer undersökas är:

- Mekaniska förband
- Limning
- Svetsning

1.1 Bakgrund

Trenderna som kan observeras inom fordonsindustrin har påvisat en markant ökning av populariteten hos eldrivna alternativ. Detta har skapat en ökad efterfrågan på komponenter som inte återfinns hos bilar med förbränningsmotorer, mest nämnvärt komponenter till motorerna och batterierna. Satsningarna på elbilar påverkar underleverantörer av komponenter till bilindustrin, som exempelvis Aurobay i Skövde. Med Aurobays nyliga övergång till Geely Group blir denna efterfråga ännu större, eftersom ett flertal tillverkare av elbilar ingår i denna koncern, samtidigt som ett flertal av de övriga tillverkarna satsar mer på elbilar. Aurobays styrkor har traditionellt varit skärande bearbetning och montering, men för att kunna möta de nya marknadskrafterna har ett behov av kompetensutveckling inom sammanfogande bearbetning för ingående komponenter identifierats.

1.2 Problemformulering

Aurobay har mottagit tillverkningsuppdrag för komponenter till delsystem för eldrivna lastbilar. Analys av de preliminära detaljritningarna visar på att någon form av sammanfogningsmetod är nödvändig vid tillverkning, och svetsning har valts som preliminär sammanfogningsmetod av företaget. Aurobays styrkor har traditionellt varit skärande bearbetning och montering, och spetskompetens saknas inom företaget gällande sammanfogningsmetoder. Detta gör att möjligheterna behöver utredas inför slutgiltigt val av tillverkningsmetoder för de nya komponenterna, men även för framtida produkter.

1.3 Syfte och Mål

Syftet med studien är att kartlägga och utvärdera olika metoder som kan användas för sammanfogning av metallprofiler i aluminium, för att utforska tillverkningsmöjligheter av framtida produkter. Syftet är också att påvisa hur en process (i detta fall sammanfogning) kan studeras genom att jämföra relevanta parametrar för att finna optimala lösningar utifrån ett ingenjörsvetenskapligt perspektiv.

Målet är att utöka Aurobays kompetens inom sammanfogning, samt utföra ett vetenskapligt grundat arbete. Informationen ska kunna vara till nytta för tillverkande företag, och kunna inkluderas inom akademiska intresseområden relaterade till tillverkningsteknik/bearbetningsteknik. Ett fåtal sammanfogningsmetoder ska presenteras som kan appliceras utifrån satta parametrar, med fördelar, nackdelar, och utförande, baserat på materialval, hållfasthetsberäkningar, hållbarhet och tillverkningskostnad. En begriplig och utförlig överblick över dessa ska presenteras, och en rekommendation ska ges baserat på utsatta kriterier.

Därefter kommer två specifika sammanfogningsmetoder (Epoxi och MIG Cold Metal Transfer Puls svetsning; förklaras i punkt 2.3.2 och 2.3.7) undersökas experimentellt genom en praktisk jämförelse ur hållfasthetssynpunkt. Limningen kommer även att undersökas analytiskt, och målet är att jämföra experimentella data med analytiska data för att kunna verifiera modellen av limfogen. Syftet är att få ökad förståelse utöver informationen som införskaffas teoretiskt.

1.4 Avgränsning

Det finns många metoder för att sammanfoga komponenter till en färdig produkt. Fokus bör finnas på vad som anses väsentligt och implementerbart för Aurobay, för både aktuella och framtida projekt. Fyra relevanta metoder ska identifieras och jämföras med MIG CMT+P svetsning, vilket är en sammanfogningsmetod som Aurobay planerar att implementera, med avseende på geometrierna på den detalj som presenterats som referens. Materialvalet begränsas till de aluminiumlegeringar som valts ut på förhand av Aurobay (5xxx- och 6xxx-serie av legeringar; förklaras i punkt 2.2.1). Produktionstekniska aspekter ska inkluderas i analyserna på en grundläggande nivå, men inget fördjupningsarbete i produktionstekniska aspekter, som exempelvis cykeltider och flaskhalsar, ska ske. Hänvisning görs till referenslitteraturen om djupare förståelse för metoderna önskas utöver innehållet i denna rapport, eftersom det teoretiska djupet för samtliga metoder är avsevärt.

1.5 Hållbarhetsperspektiv

Aurobay satsar på hållbar utveckling med ambitiösa mål som exempelvis koldioxidneutralitet vid 2040, att vara en cirkulär affärsverksamhet vid 2040, och att vara en industriell ledare i ansvarsfull affärsverksamhet vid 2030. Fokus på hållbar utveckling ur en akademisk synpunkt är därför förenligt med företagets mål och agenda 2030 (United Nations, 2015). Hållbar utveckling delas in i tre kategorier: ekologisk hållbarhet, social hållbarhet och ekonomisk hållbarhet (Lozano, 2008).

Utsläpp av växthusgaser från fordon utgör den i särklass störst bidragande faktorn till luftburen miljöförorening, och försämrad luftkvalitet medför ett flertal direkta och långsiktiga hälsorisker för människor (Li, 2020). Ur miljöperspektiv pågår en utveckling inom fordonsindustrin, med viktiga punkter som exempelvis viktreducering och alternativ till fossila bränslen. Målet är att göra fordonstransport mer miljövänligt och resurseffektivt, och att styra efterfrågan på drivmedel mot

alternativ som kan framställas med mindre miljöpåverkan. Intresse finns därför i denna studie att hitta sammanfogningsmetoder som främjar ökad resurseffektivitet, och kan implementeras med minimal påverkan på miljön.

Hållbarhet ur samhällsperspektiv handlar bland annat om rättvisa, ökad jämställdhet, hållbara samhällen, och ökad mänskligt välmående (United Nations, 2015). Ur företagsperspektiv kan arbetet mot social hållbarhet främjas genom att exempelvis sträva mot en säker och ergonomisk arbetsmiljö, rättvisa arbetsvillkor, jämställdhet på arbetsplatsen, och socialt ansvarstagande. Arbetsplatsrelaterade olyckor och sjukdomar kräver ungefär 2,3 miljoner människoliv varje år (Chemical Safety, 2016), och arbetet mot ökad arbetsplatssäkerhet är standardiserat enligt bland annat ISO 45001:2018 (ISO, 2022). Målet för denna studie, med avseende på social hållbarhet, är att hitta sammanfogningsmetoder som kan implementeras med god ergonomi och minimala hälsorisker för montören eller operatören.

För en affärsverksamhet kan ekonomisk hållbarhet definieras som att adoptera affärsstrategier och aktiviteter som möter företagets och intressenternas behov, samtidigt som naturresurserna och de mänskliga resurserna skyddas, förvaltas och förbättras för framtida behov (IISD, 1992). Vid utvärdering av sammanfogningsmetoderna ska fokus finnas på kostnadseffektivitet och den ekonomiska helhetsbilden, och hur de står i förhållande till de övriga kategorierna av hållbar utveckling.

1.6 Etik och moral

Etik och moral är ett viktigt verktyg för ingenjörer och andra yrkesutövare. Allteftersom de naturliga gränserna suddas ut med hjälp av teknologiska framsteg, kan moralitet bli priset som betalas för modernitet. Etiska reflektioner blir då viktiga för att sätta begränsningar, oberoende av laglighet (Lanzerath, 2023). Det är dock vanligt att meningsskiljaktigheter finns angående relevant fakta, samt hur olika etiska problem kan definieras. Etiska problem, som exempelvis “intressekonflikter”, “mutor”, “sekretess”, och “lojalitet”, som är av intresse för ingenjörsväsendet, kan medföra filosofiska eller moraliska skillnader från fall till fall (Harris et al, 2013).

Med avseende på denna studie finns avsikt att konformera till de standarder som etablerats för verk av akademisk natur. Arbetet ska vara faktamässigt troget, och egna värderingar ska vara frånskilda från fakta. Inga intressekonflikter finns i detta arbete, med reservation för att ett väl utfört arbete har möjligheten att ge författarna anställning på Aurobay. Avsikt finns att arbetet ska kunna vara till nytta för arbeten av akademisk natur, eller tillverkande/bearbetande företag utöver Aurobay.

1.7 Översikt

Rapporten inleds med det teoretiska ramverket, och presenterar information om sammanfogningsprinciper och aluminiumlegeringar. Därefter beskrivs de olika metoderna som valts för analys, och bearbetar punkter som exempelvis definition, egenskaper och möjliga defekter. Sedan presenteras litteraturstudien, med mer ingående information från vetenskapliga studier. Information som bland annat hållfasthetsegenskaper, experimentella data, och komparativa data behandlas i detta stycke. Efter litteraturstudien inleds stycket om metodik och genomförande baserat på dragprover av svets- samt limfogar, parallellt modelleras limfogar i ABAQUS. Resultaten av detta projekt sammanställs sedan med jämförelser mellan utvalda sammanfogningsmetoder utifrån olika perspektiv. Projektet avslutas med diskussion kring resultaten av delar av arbetet för att förtydliga och förklara de resultat som erhölls.

2 Teoretiskt ramverk

I detta avsnitt beskrivs principen av vad sammanfogning är samt hur principerna för respektive tre huvudtyper av sammanfogning fungerar fundamentalt. Aluminiumlegeringar och dess relevans inom fordonsindustrin tas också upp. Slutligen beskrivs CMT/CMT+P, lasersvetsning, limning, nitning och metodernas för- och nackdelar.

2.1 Sammanfogningsprincipen

Sammanfogning är att kombinera två eller flera frånskilda delar, eller separata komponenter, till en gemensam komponent eller produkt. Det finns tre huvudkategorier av sammanfogning; mekanisk, kemisk och fysisk (Brandon & Kaplan, 1997). Huvudtyperna är frånskilda i utförande per definition, men ämnar uppnå samma mål. Mekanisk sammanfogning utnyttjar mekaniska krafter och restspänningar (exempelvis drag-och-tryckspänningar) för att uppnå sammanfogning. Kemisk sammanfogning utnyttjar generellt fasövergången mellan en viskös vätska till en hårdnad massa, kombinerat med den nybildade ämnesstrukturens atombindningar, för att uppnå en liknande typ av sammanhållning som återfinns hos mekaniska förband. Fysisk sammanfogning avviker från den mekaniska och kemiska principen med användandet av energiutveckling, ofta i form av temperatur, för att smälta samman material. När stelning sker är två tidigare separata komponenter fysiskt ihopkopplade (Brandon & Kaplan, 1997).

2.1.1 Mekanisk sammanfogning

Vid mekanisk sammanfogning kombineras separata delar, oftast med hjälp av olika standardiserade komponenter som ingår i kategoritypen “maskinelement”. De är ofta baserade på lokala punktförband, med en skruv, spik, skruv, nit, eller en lokal deformation, som utgör fogen (Brandon & Kaplan, 1997, sid. 5). Som omnämnt i punk 2.1 utnyttjas mekaniska krafter (exempelvis friktionskraft), eller restspänningar, för att förhindra separation av förbandet.

Fördelarna med mekaniska sammanfogningar innefattar bland annat:

- Underlättande vid tillverkande verksamhet.
- Enkel montering/demontering av separata delsystem av en större produkt.
- Möjligheter för underhåll av befintliga delar, samt utbyte av slitdelar.
- Underlättande vid utveckling av rörliga delar och leder.
- Möjligheter till att kombinera olika typer av material utan att påverka materialstrukturen hos respektive material.
- Generellt minskad kostnad för tillverkning och bearbetning av produkter.
- Bättre möjligheter till separation inför återvinning vid slutet av produktens livscykel.

Fördelarna med mekanisk sammanfogning bör övervägas vid utvecklingen av produkter (Kalpakjian, & Schmid, 2017). Mekanisk sammanfogning är en historiskt viktig metod med hög verkningsgrad inom verksamheter som fordonsindustrin, flygfartsindustrin, och energisektorn (Groover, 2017).

2.1.2 Kemisk sammanfogning

Kemisk sammanfogning använder kemiska reaktioner mellan olika ämnen för att skapa bindningar mellan två eller flera delar (Brandon & Kaplan, 1997). Det involverar generellt en blandning av ämnen, exempelvis olika former av polymeriska föreningar (även kallat “lim”), eller användande av flussmedel

vid lödning. Lim appliceras på ytorna som ska sammanfogas i rumstemperatur, och genomgår sedan en härdningsprocess för att skapa ett förband. Processen kan accelereras med värmebehandling, eller strålningsbehandling (Brandon & Kaplan, 1997), för att öka lämpligheten för industriell applikation.

Även om lödning liknar svetsning i utförande så delar den fler karaktärsdrag med en kemisk sammanfogningsprocess. Vid svetsning sker smältning av delarna som sammanfogas, vilket skapar ett homogent förband, men vid lödning reagerar tillsatsmaterialet med ett flussmedel och sammanfogar komponenterna utan smältning av arbetsstycket. Principen appliceras oftast på metaller, men kan även användas för sammanfogning av exempelvis metaller och keramer (Brandon & Kaplan, 1997).

Med rätt medium för en given applikation kan kemisk sammanfogning ge fogar med goda hållfasthetsegenskaper, speciellt mot skjuvspänningar. Metoden går även att kombineras med mekaniska förband, vilket gör att minimal förvrängning av materialet sker vid torkningen eller härdningsprocessen. Samtidigt sker ingen förändring av materialegenskaperna vid limning, och mindre värmepåverkan sker vid lödning jämfört med svetsning (Barnes & Pashby, 2000). Möjligheterna att sammanfoga material av olika materialgrupper, typer, och legeringar, kan dock medföra svårigheter vid separation i slutet av livscykeln, vilket medför problem ur hållbarhetssynpunkt.

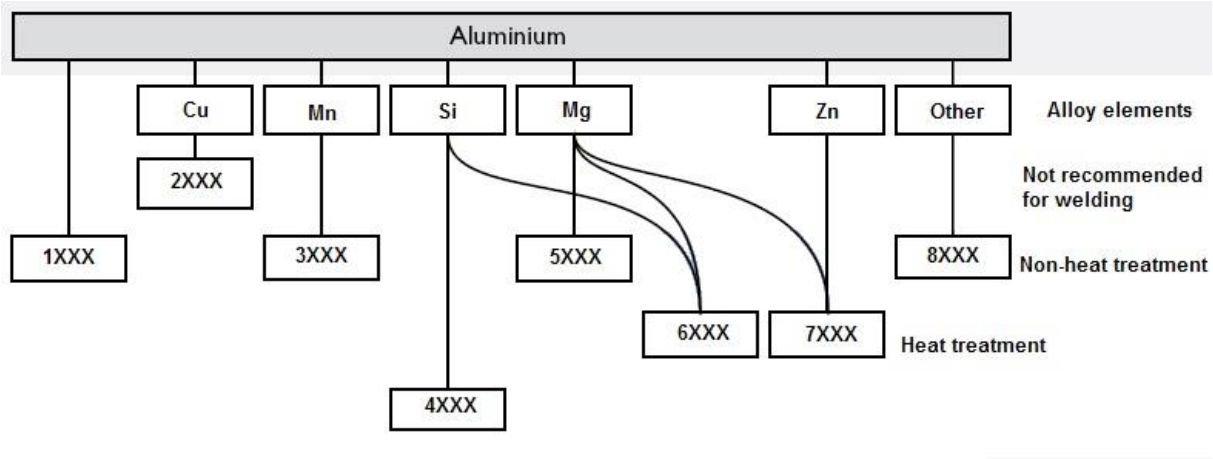
2.1.3 Fysik sammanfogning

Grunden för fysisk sammanfogning är att tillföra tillräckligt mycket energi till ett arbetsstycke för att materialet ska genomgå en lokal fasövergång från fast till flytande, eller med hjälp av diffusion mellan två material, för att skapa ett homogent förband. Beroendet av fasövergångar lämnas användningsområdet primärt för lösningsbaserade bindemedel, men även olika typer av svetsning (Brandon & Kaplan, 1997).

2.2 Aluminiumlegeringar

Aluminiumlegeringar är vanligt förekommande inom tillverkande industrier, och strukturella konstruktioner. De viktigaste egenskaperna som gör aluminium högt eftertraktad är den höga styrkan i förhållande till den låga vikten, samt den höga korrosionsresistensen och de mekaniska egenskaperna som metallen besitter (Kannan et al, 2023). Olika aluminiumlegeringar uppvisar brett varierande materialegenskaper, och applikationerna behöver därför övervägas inför val av legering. Aluminiumlegeringar delar många materialegenskaper med konstruktionsstål, men de har generellt en högre värmeledningsförmåga och längdutvidgning, samtidigt som de har en lägre E-modul.

Det finns ett numreringssystem för olika legeringar av aluminium. Plastiska legeringar, som är ämnade för plåtar, profiler, band, och folie, benämns med fyra siffror (Weman, 2016). Gjutlegeringar, som används för bland annat motorblock och bromsskivor (Jarfors, Ghasemi, Awe & Jammula, 2021), benämns med fem siffror (Weman, 2016). Plastiska legeringar är standardiserade enligt SS-EN 573-1 och gjutgods är standardiserade enligt SS-EN 1780-1. Plastiska legeringar är kategoriserade från 1xxx-serien upp till 8xxx-serien, där “xxx” symboliserar en kombination av siffror som beror på de tillsatsmaterial som används i legeringen (Weman, 2016). En överblick av legeringarna kan observeras i figur 1 på sida 6.



Figur 1. Kategorisering av plastiska aluminiumlegeringar (Kah et al, 2012).

2.2.1 Aluminium-magnesium legering (5xxx- & 6xxx-serie)

Som nämnt i punkt 1.4 begränsas arbetet till dessa överkategorier av legeringar. 5xxx-serien innefattar enbart magnesiumhaltiga aluminiumlegeringar, och 6xxx-serien består av olika kombinationer av magnesium- och kiselhaltiga aluminiumlegeringar (Weman, 2016). Båda är väl lämpade för strukturella konstruktioner med relativt hög styrka och låg vikt, med olika styrkor och svagheter som relaterar till varje legerings respektive egenskaper. 6xxx-serien brukas mycket inom extruderade profiler för kostsamma konstruktioner (Merklein, Graser, & Lechner, 2015). 6xxx-serien förekommer inom exempelvis inom flygindustrin, på grund av bearbetningsmöjligheterna, styrkan, och den exceptionella korrosionståligheten som kategorin erbjuder (Kannan et al, 2023).

2.2.2 Oxidering av aluminiumlegeringar

Den viktigaste parametern att ta hänsyn till vid fysisk sammanfogning av aluminium är oxideringen. Aluminium reagerar kraftigt med syre, och skapar momentant det keramiska ämnet aluminiumoxid (Al_2O_3). Detta ämne har en mycket högre hårdhet, seghet och smältpunkt (2050°C) än själva metallen (Weman, 2016), och det är oxiderna som ger materialet dess korrosionstålighet. Oxiderna bildas spontant och kontinuerligt på en aluminiumyta, som en kemiskt stabil och elektriskt resistent film (Brandon & Kaplan, 1997). Närvaron av oxider kan medföra problem vid sammanfogning, framför allt vid svetsning. Den höga densiteten hos oxiderna kan leda till att oxiderna sjunker i smältan och skapar inneslutningar, och om inte oxiderna avlägsnas före svetsning kan det bidra till svetsfel och allvarliga nedsättningar i hållfastheten (Weman, 2016).

2.3 Val av sammanfogningsmetoder

Omfattningen av projektet och begränsningen av tid som finns att tillgå, samt utsatt avgränsning från kapitel 1.4, avgör antalet relevanta metoder att fördjupa kunskapen inom. Utgångspunkten för metoderna är att jämföra egenskaperna med CMT/CMT+P (Cold Metal Transfer/Cold Metal Transfer Puls, se punkt 2.3.2), som Aurobay valt som preliminär sammanfogningsmetod för den angivna produkten. Det ansågs nödvändigt att börja med att studera denna metod, med avsikt att skapa förståelse inför jämförelse med övriga metoder. Intressanta metoder att utforska närmare bedömdes vara lasersvetsning, limning, nitning, och hybridfogning (limning och nitning i kombination), eftersom kompatibilitet finns med givna geometrierna och det preliminära materialvalet av aluminiumlegeringar. Notera att dessa metoder och underkategorier endast är ett selektivt urval.

2.3.1 Svetsning

Historiskt sett har vällning av stål (smide) använts vid bearbetning av stål sedan metallbearbetningens födelse, och var den primära metoden för att "sammansvetsa" metaller fram till 1880-talet. Introduktionen av elektriciteten öppnade dörrarna för nya metoder att fysiskt sammanfoga två delar av metall, med utvecklandet av ett flertal metoder inom exempelvis motståndssvetsning, bågsvetsning, etc. (Weman, 2016). Svetsning används frekvent för sammanfogning av likartade material, eftersom krav finns på kompatibilitet mellan materialegenskaperna. Vid sammanfogning av dissimilära (olikartade) material ökar dock svårighetsgraden att erhålla en hållfast fog.

Implementation av svetsning inom en tillverkande verksamhet ställer vissa krav på säkerhet, till följd av oxidbildning och UV-ljus från ljusbågen. Dessa aspekter medför hållbarhetsproblem ur samhällsperspektiv (social hållbarhet) med avsikt på säkra arbetsplatser, men påverkan kan reduceras med skyddsutrustning. Oxiderna och medförande hälsorisker varierar beroende på metod, men består i regel av ett flertal typer av metalloxider, koloxid, kiselföreningar, och flourföreningar, vilket kan orsaka kroniska sjukdomar vid långvarig exponering. Dessa sjukdomar innefattar bland annat bronkit, lungcancer, och astma (Rahul et al, 2021). Svetszonen utstrålar också samtliga typer av ljusstrålning, med ultraviolett ljus (UV-A, UV-B, och UV-C) från ljusbågen, synligt ljus (VIS) från området runt elektroden, och infrarött ljus (IR) från smältan (Rybczyński et al, 2019). UV-C är den mest energirika typen av UV-ljus, som vanligtvis filtreras bort av ozonlagret, och är farligast för huden och ögonen (American Cancer Society, 2019). Ultraviolett strålning innebär inte bara risker för svetsare, men även för de som vistas i närheten (Rahun et al, 2021) vilket ofta medför krav på avskärmning av arbetsytor i en industrimiljö.

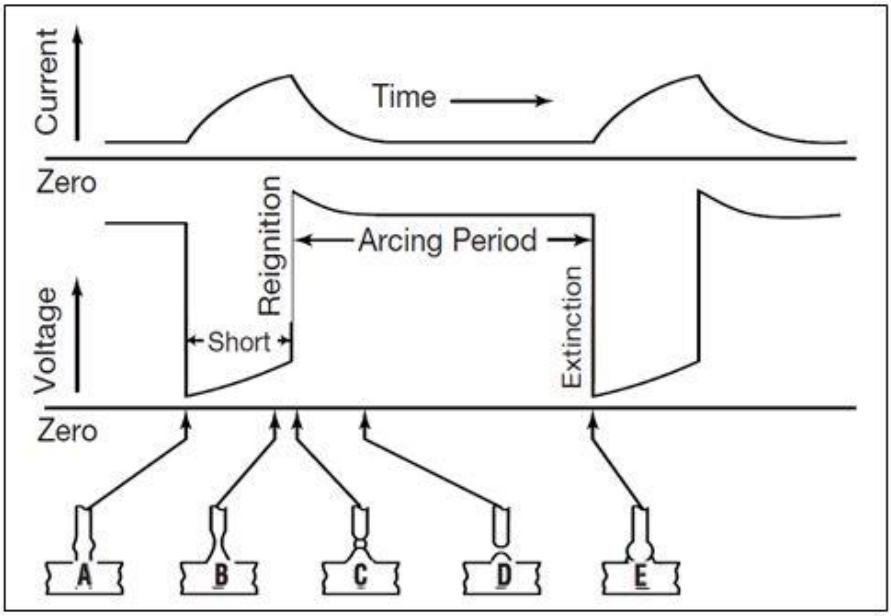
Arbete relaterat till närvaro av svetsrök är standardiserat enligt bland annat ISO 21904-1:2020 (Utrustning för uppfångande och separation av svetsgaser), ISO 10882-1:2011 (Provtagning av luftburna partiklar och gaser i operatörens andningszon), och standarder som exempelvis ISO 15858:2016 (UV-C anordningar - Tillåtlig mänsklig exponering) relaterar till närvaro av UV-C (International Standardization Organization, 2020; 2011; 2016).

2.3.2 CMT/CMT+P

CMT (Cold Metal Transfer) svetsning är en förhållandevis ny teknologi inom svetsmetodik, och är en modifiering av den välanvända MIG- (Metal Inert Gas) eller MAG- (Metal Active Gas) metoden. CMT utvecklades av Fronius och togs i bruk år 2004, jämfört med MIG/MAG som tillkom på 1950-talet (Weman, 2016). Eftersom temperatur är en viktig parameter vid svetsning, med avsevärd påverkan på bland annat hållfastheten och toleranser, utforskades lösningar för att minska värmepåverkan (Selvi, Vishvaksenan, & Rajasekar, 2018). Reduktionen av värmepåverkan vid processen bidrar till att CMT är optimalt anpassad för sammanfogning av tunna aluminiumprofiler, vilket är komplicerat på grund av metallens förhållandevis låga smältpunkt och höga deformationsfaktor vid högre temperaturer. Reduktionen i värmepåverkan i CMT-metoden möjliggör svetsningen av aluminiumplåtar ner till 0,3 mm tjocklek, vilket tidigare ansågs omöjligt (Furukawa, 2006).

Det som skiljer CMT från vanlig MIG/MAG är hur tillsatsmaterialet levereras till fogen, och svetsparametrarna (Selvi, Vishvaksenan, & Rajasekar, 2018). CMT är en typ av kortbågsvetsning men med fundamentala skillnader jämfört med den vanliga funktionsprincipen. Den viktigaste är att processen utförs med datorstyrning, på grund av den konstanta justeringen av svetsparametrarna, kombinerat med behovet av att bågen hålls konstant. I stället för att strömmen tillåts att stiga under droppkortslutningen, fram tills att bryggan av smält metall bryts, så sänks strömmen vid droppövergången mellan elektroden och arbetsstycket. Samtidigt så backas elektroden uppåt igen vid

inmatningen när droppen formas och vandrar över till fogen (se fig. 2). Detta leder till att det sker mindre sprut och förbättrad stabilitet vid svetsningen fås, samt mindre värmeutveckling (Weman, 2016).

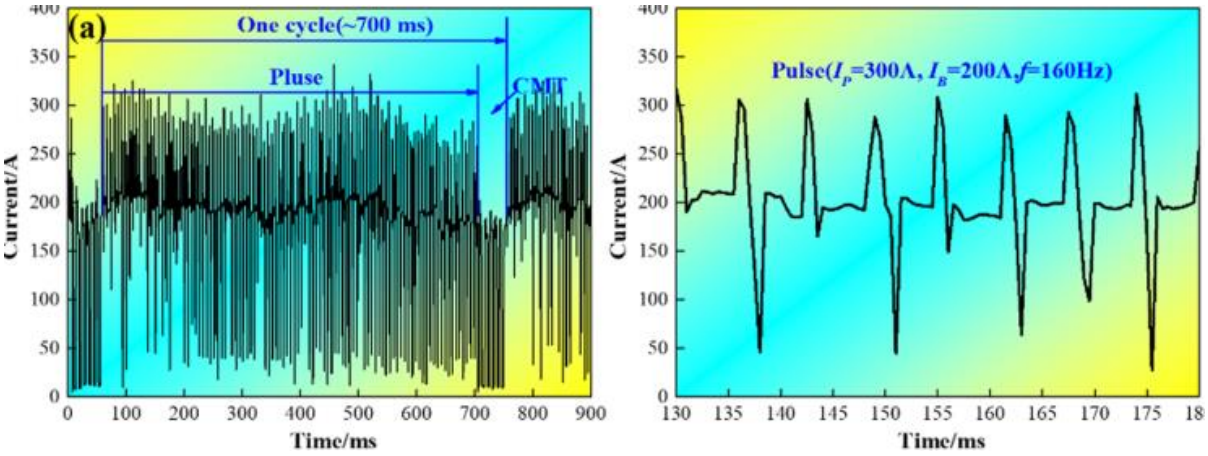


Figur 2. Schematisk illustration av en CMT svetscykel (Selvi, Vishvaksenan, & Rajasekar, 2018).

Processen sker under en datorstyrd cykel av svetsningen som utspelas under ett fåtal millisekunder, vilket medför att upp till 70 cykler sker under en sekund vid högfrekvenssvetsning (Furukawa, 2006). Cykeln repeteras under hela svetsprocessen som indelas in i tre faser för en komplett genomförd cykel (Selvi, Vishvaksenan, & Rajasekar, 2018):

1. Hög strömtillförsel med konstant spänning skapar bågen för att smälta elektroden och skapa en droppe.
2. Strömtillförseln sänks för att motverka stänk från små partiklar som kan uppstå från den nybildade droppen.
3. Kortslutning sker och bågspänningen sänks till 0 V, samtidigt som elektroden matas tillbaka för att ge droppen en god överföring till smältzonen.

Processen utnyttjar lägre nivåer av strömtillförsel jämfört med vanlig kortbågsvetsning. Detta begränsar exempelvis formateringen på droppen som tar form utifrån hur värmen utvecklas. För att öka omfattningen på hur CMT kan appliceras har CMT+P (Cold Metal Transfer Puls) utvecklas. Vid användande av denna underkategori av CMT pulserar strömmen med en högre amplitud (se fig. 3) under delar av varje ordinär CMT-cykel (Chen et al, 2023). Det primära målet är att utöka applikationsområdet genom ökad värmeutveckling, utan att förlora fördelarna som standardiserad CMT tillför vid sammanfogning. De egenskaper som eftersöks är att få en djupare penetration, större svetsdroppe, och högre svetshastighet. Eftersom pulseringen ska kontrollerat öka temperaturpåverkan till en viss nivå kommer energiförbrukningen också öka för processen. Denna ökning för CMT+P är bara marginellt högre jämfört med CMT, vilket inte förändrar dess status som en energieffektiv metod (Furukawa, 2006).



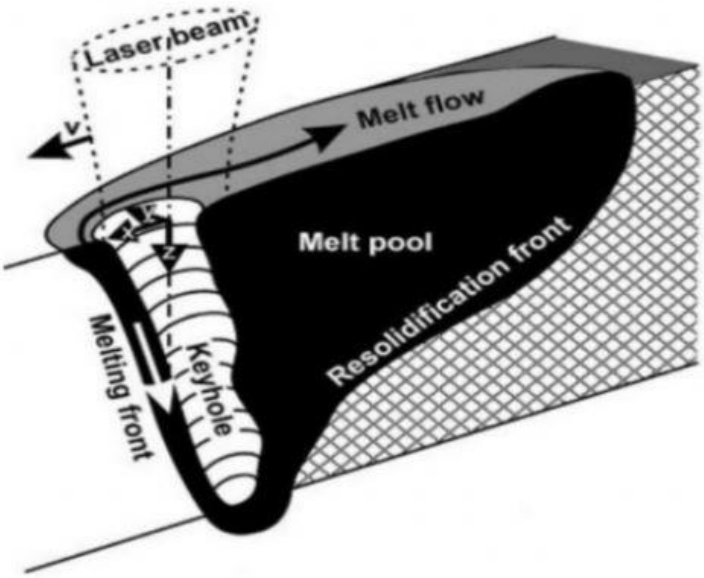
Figur 3. Exempel på hur strömmen kontrolleras (pulseras) under en CMT+P cykel (Chen et al, 2023).

En av de unika egenskaper som CMT uppvisar är sammanfogningen av dissimilära metaller, exempelvis olikartade aluminiumlegeringar, samt kombinationer av aluminium och stål (Furukawa, 2006). I det sistnämnda exemplet existerar drastiska skillnader i materialegenskaper i de olika materialen, som tidigare gjorde att fysisk sammanfogning inte var ett alternativ innan utvecklingen av CMT.

Den vanligaste typen av defekt som kan uppstå vid CMT-svetsning är ofullbildad svetsfog. Mindre effektiv fusion för smältan kan ske, vilket påverkar hållfastheten för fogen negativt (Selvi, Vishvaksenan, & Rajasekar, 2018).

2.3.3 Lasersvetsning

Lasersvetsning utnyttjar en högeffektslaser för att uppnå hög energikoncentration på en yta, för att sedan bilda en smälta som sammanfogar materialet. Lasern kan fokuseras på en punkt med dimensioner ner till 0,2 mm i diameter, vilket medför att processen är lämplig för mer komplexa geometrier. Lasersvetsning kan ske kontinuerligt och kan appliceras på profiler med svetsdjup upp till 25 mm, oftast med god svetsförmåga. Svetsning kan också ske pulserat för punktsvetsning av tunnare material. Ett av de huvudmaterial som lasersvetsning appliceras på vid tillverkning är aluminiumlegeringar (Kalpakjian, & Schmid, 2017). Lasern utsöndrar monokromt ljus, vilket innebär att alla ljusvågor består av samma våglängd, och våglängden beror på vilken typ av laser som används. Ljuset fokuseras genom en lins, som har en öppning på några få tiondels millimetrar, och skapar en fokalpunkt som levererar en hög koncentration av energi, vilket sedan smälter materialet i punkten. Eftersom energin överförs på en liten punkt sker värmeutvecklingen på ett smalare område, vilket innebär att arbetsstycket utsätts för deformationer i mindre utsträckning. Metoden som lasersvetsning utnyttjar kallas “nyckelhålsteknik” (se fig. 4), och refererar hur laser penetrerar materialet och skapar ett smalt “nyckelhål” (Katayama, 2013).

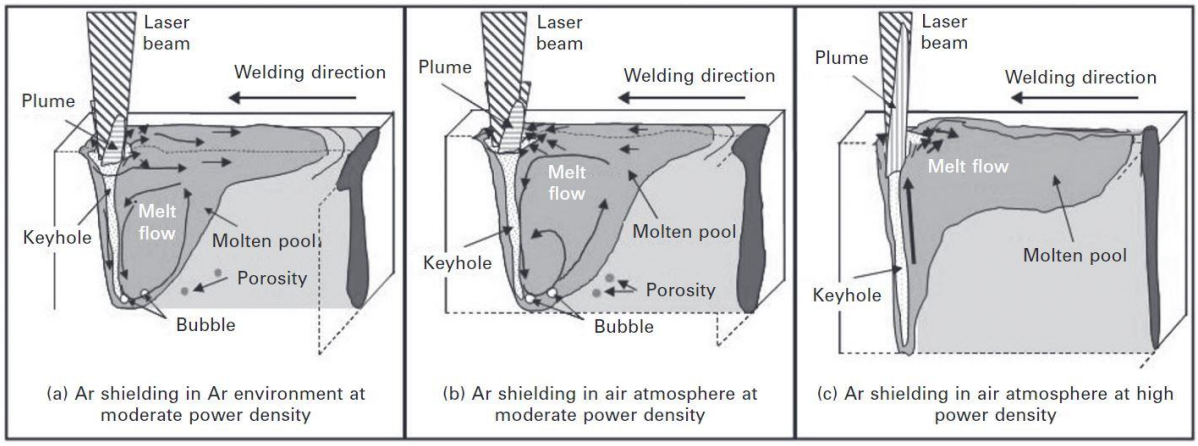


Figur 4. Illustration av nyckelhålsbildning vid lasersvetsning (Svenungsson, 2015).

När smältan skapas förångas även en del av metallen och omvandlas till plasma, vilket ökar densiteten på energitillförseln och förbättrar svetsförmågan. Det finns flera parametrar som påverkar effektiviteten av nyckelhålets utveckling, och den största är effekten på lasern. Med högre effekt kan snabbare svetsning ske. Vid svetsning av tunna profiler är lasersvetsning en tidseffektiv metod som är cirka 8 gånger snabbare än konventionell TIG-svetsning. Lasersvetsning utförs med hög precision, och är vanligt förekommande inom bilindustrin (Weman, 2016). Hastigheten vid utförande har ett spann på 2,5 m/min till så högt som 80 m/min för vissa applikationer (Kalpakjian, & Schmid, 2017). Det finns olika typer av lasrar som kategoriseras beroende på vilket medium som ljuset amplifieras genom. Exempel på olika lasertyper är fast fas, gas, flytande färg, och halvledare. De delas även in i två huvudkategorier; “kontinuerlig” och “pulserad”, som ger lasern olika egenskaper beroende på applikation (Jeyaprakash, Yang, & Bhuvanesh Kumar, 2021).

Det finns olika varianter av laser som exempelvis; CO_2-laser (gas) samt Nd:YAG-laser (fast fas). Dessa opererar på olika vis och valet av vilken laser som är fördelaktig för processen är beroende på vad lasern skall åstadkomma. Generellt innebär energitillförsel från koldioxiden att högre effekter kan uppnås för CO_2-laser, det innebär att det kan användas för tjockare profiler, vilket gör att det används både för svetsande och skärande bearbetning. Skillnaden på våglängderna mellan dessa två exempel innebär att ljuset leds med hjälp av fiberoptik. Detta medför också att automatisering är möjligt. För fastfas-laser innebär minskning i våglängd, vilket leder till att mindre plasma bildas vid svetsning och det innebär en minskning i effekt jämfört med en CO_2-laser. Nd:YAG är vanligt förekommande vid sammanfogning av profiler med en tjocklek upp till 6 mm (Weman, 2016).

Det finns olika typer av defekter som kan uppstå vid användning av lasersvetsning, och de delas in i geometriska/synliga defekter, interna/osynliga defekter, och kvalitetsdefekter. Vid svetsning av aluminiumlegeringar är porositet och stelningssprickor den typ av defekt som ger den största påverkan på kvalitén (Katayama, 2013). Defekterna är lokaliserade i zonen av värmepåverkan, och det finns starka kopplingar mellan svetsparametrarna och hållfastheten. Parametrar som tenderar att ge högre värmeutveckling, exempelvis högre ström och långsammare svetshastighet, tenderar att resultera i högre nivåer av porositet (Basile et al. 2022).



Figur 5. Schematisk illustration av smälta, med a) yttre ytflöde på grund av ytspänning, b) inre ytflöde på grund av ytspänning, och c) penetration vid högt energiflöde (Katayama, 2013).

Vid sammanfogning av exempelvis AA6061 påverkas bildningen av porositet i materialet märkbart på grund av innehållet av lättare metaller, framför allt magnesium och zink. Orenheter på ytan vid svetszonen är också en starkt bidragande faktor. Vid närvarande av väte under oxidbildningen på ytan sker en förångning av ämnena, vilket bidrar till bildningen av porer när gasen fångas i nyckelhålsbildningen (Basile et al. 2022). Skyddsgas som används kan även fångas i fusionszonen och bilda luftbubblor (se fig. 5), vilket skapar porositet i fogen (Katayama, 2013).

Svetshastigheten påverkar även omfattningen på rothåligheten och överflödig rotpenetration i svetszonen, eftersom värmepåverkan är en faktor för formen på fogen. Relationen mellan svetsbredden på ytan och svetsdjupet påverkar även nivåerna av porositet. Genomförda sammanfogningar med högst värde för relationen mellan bredden och djupet bildade mest porositet. Samtliga defekter visar negativ påverkan på hållfastheten hos fogar, eftersom materialets mekaniska styrka försämras (Basile et al. 2022).

2.3.4 Nitning

Nitningsprocessen innebär att ett membran, bestående av en eller flera material (även kallat att “anhängarna” tillsammans utgör ett “substrat”) penetreras av en nit, varpå niten deformeras för att skapa en låsning. Detta bildar ett mekaniskt förband som endast kan separeras vid kollaps av antingen niten eller det substratet. Efter sammanfogning existerar ett spänningstillstånd i form av dragspänning i kroppen av niten, vilket applicerar en kompressiv kraft på anhängarna mellan nithuvudena (Brandon & Kaplan, 1997). Inom bilindustrin blir det allt vanligare att välja nitning över svetsning när det finns behov att sammanfoga profiler i aluminium, och många innovativa lösningar för att nita ett substrat har utvecklats genom åren av tillverkare som exempelvis Böllhoff. Generellt beror populariteten på egenskaper som nitning besitter; kostnadseffektivitet, simplicitet, och mångsidighet (Li & Fatemi 2006).

Ofta förekommer behovet att inte enbart två eller flera aluminiumlegeringar behöver sammanfogas, utan även att aluminium behöver sammanfogas med olika typer av stål. Att sammanfoga dissimilära material kan vara ett problem, eftersom fysiska sammanfogningsmetoder (exempelvis svetsning) är komplicerade att applicera till följd av inkompatibla materialegenskaper. För att kringgå detta problem kan mekaniska sammanfogningsmetoder som nitning appliceras som en kostnadseffektiv lösning (Hahn et al, 2014).

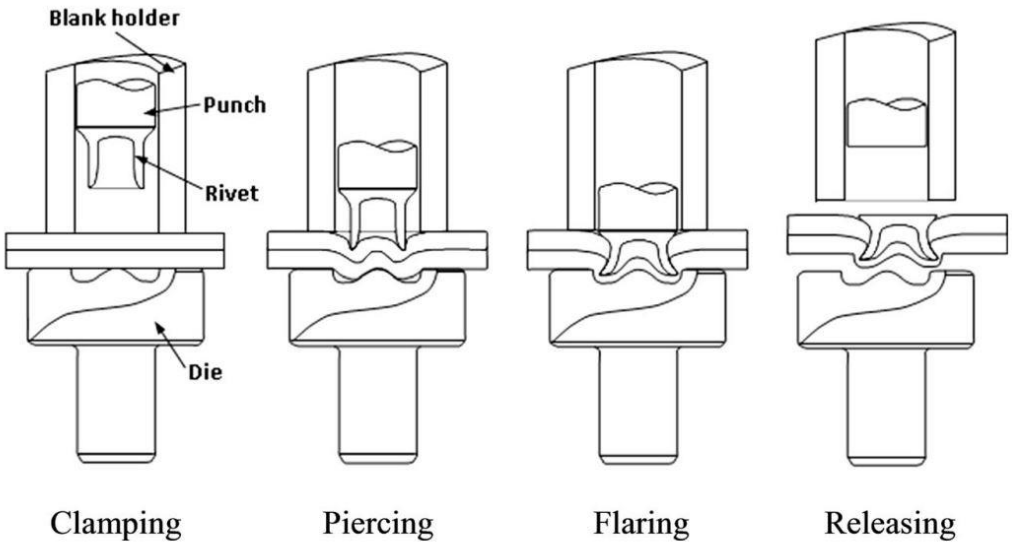
Ur hållbarhetsperspektiv är nitning en mycket ren tillverkningsmetod (Li et al, 2017). Ingen oxid- eller gasbildning sker vid tillverkning, och montering kan automatiseras, eller anpassas för ergonomiskt utförande om manuell montering krävs. Fördelarna att sammanfoga material av olika typer eller legeringar kan dock medföra problem vid slutet av en produkts livscykel. Permanenta mekaniska förband utgör hinder vid separation inför återvinning, om produkten består av material som måste återvinnas separat.

2.3.5 Popnit (Pop rivet, PR)

Popnitar behöver förborrade hål för att kunna appliceras, och det är endast självaste niten som genomgår plastisk deformation. Popnit är en form av så kallad "blindnit", vilket betyder att metoden kan användas om enbart en sida av arbetsstycket är tillgänglig. De manuella verktygen är också relativt billiga, och kan anpassas för god ergonomi (Moroni & Pirondi, 2010). Automatiska lösningar finns även för både nitning och borrning av hål i samma process.

2.3.6 Självhålande nit (Self-Piercing Rivets, SPR)

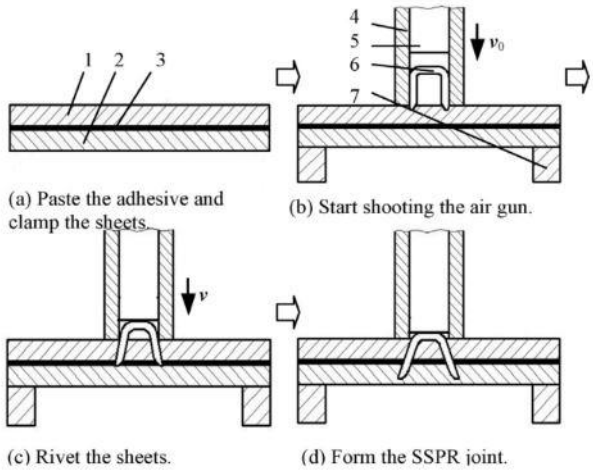
Nitning med självhålande nit är en metod som utvecklats till följd av efterfrågan på sammanfogning av aluminium inom bilindustrin (Li et al, 2017). Det är en kallformningsprocess som använder en semitubulär nit för att sammanfoga två eller flera anhängare (se fig. 6). Niten pressas igenom den övre anhängaren, och skapar en mekanisk låsning genom att deformeras inuti den undre anhängare mot en dyna (Porcaro et al, 2006). Deformationerna som skapar låsningen i arbetsstycket gör processen olämplig för spröda material, men fungerar utmärkt för de flesta stål- och aluminiumlegeringar.



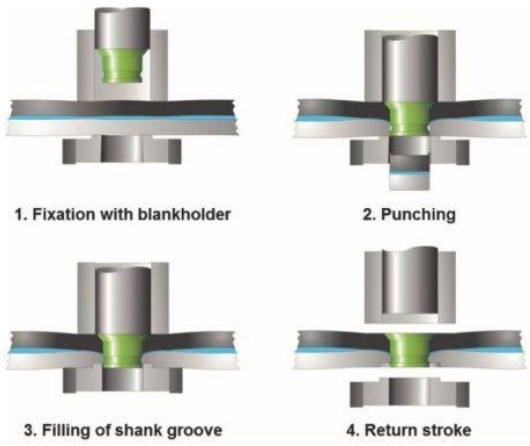
Figur 6. Illustration över nitningsprocessen med självhålande nit (Chrysanthou & Sun, 2014).

Vid utförande av detta arbete kunde tre underkategorier identifieras av denna metod: semi-tubulär ("vanlig" SPR, se fig. 6), solid (SPSR, se fig. 8), och enkelsidig (SSPR, se fig. 7). Samtliga nitar kan penetrera och sammanfoga material utan förberedning, och de skapar mekaniska förband. SPR kräver åtkomst till båda sidor av förbandet för att dynan ska kunna deformera niten, utan att helt penetrera den undre anhängaren (Li et al, 2017). SPSR stansas genom hela substratet med ett verktyg, vilket också kräver åtkomst till båda sidor. Materialet deformeras sedan med hjälp av dynan i verktyget och skapar en en låsande mekanism i hålet och på undersidan av profilen, vilket fixerar substratet. Solida nitar behöver inte plasticera på samma vis som traditionella SPR, vilket tillåter användandet av nitar med

högre hållfasthetsegenskaper (Hahn et al, 2014). SSPR är den enda av dessa tre kategorier som kan monteras utan stöd av en verktygsdyna, vilket möjliggör blindnitning, och erbjuder mer flexibilitet än de övriga två på bekostnad av hållfastheten.

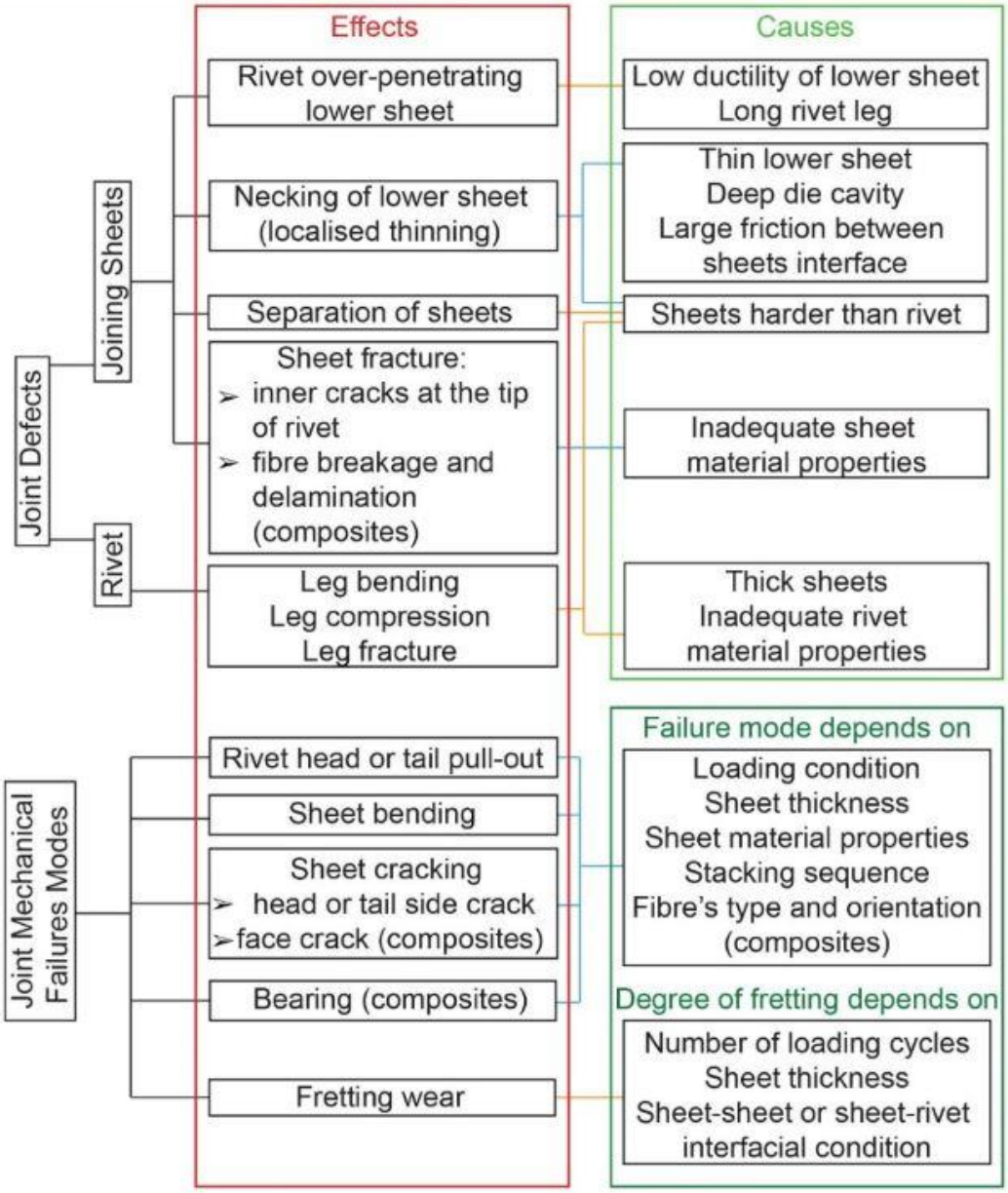


Figur 7. SSPR-processen (Liu et al, 2013).



Figur 8. SPSR-processen (Hahn et al, 2014).

Defekter i nitförband brukar vara uppdelade i nitdefekter och materialdefekter (Ang, 2021). En överblick av de defekter som kan förekomma i SPR-förband kan observeras i figur 9 på sida 14. Deformationerna som niten genomgår varierar i allvarlighetsgrad mellan olika typer av nit, och påverkar därför förbandets hållfasthet på olika sätt. I materialet uppstår också ett spänningstillstånd som behöver respekteras, och det är vanligt med kontaktskador mellan nit och anhängare. Dessa faktorer kan under cyklisk last leda till sprickbildning vid hålkanten, som sedan propagerar utåt i profilen. Det är därför vanligt förekommande att kollaps sker i materialet runt niten. Fogens hållfasthet under belastning är därför starkt kopplad till materialegenskaperna, och godstjockleken på profilerna som monteras ihop (Ang, 2021).



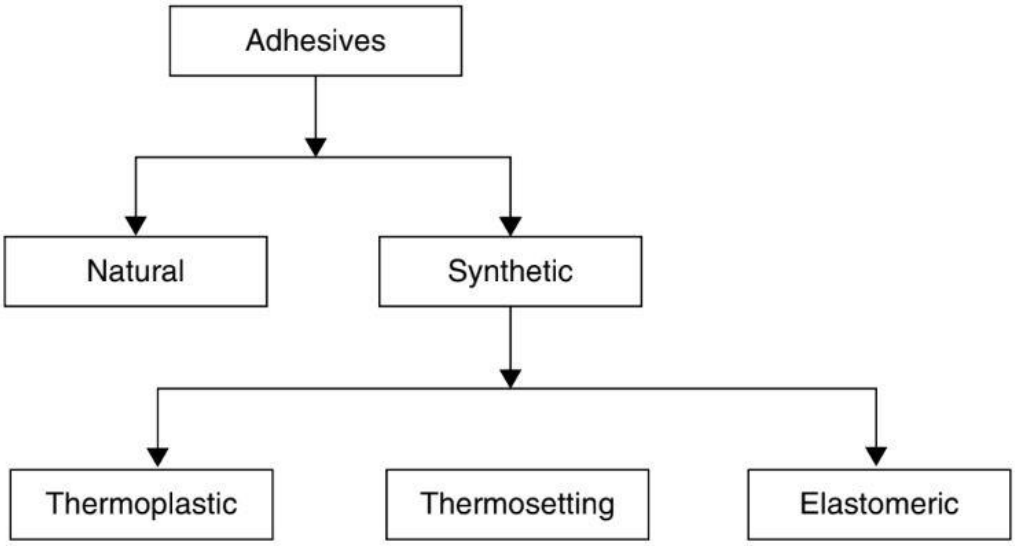
Figur 9. Karta över möjliga defekter och fel vid nitning med SPR, samt exempel på orsaker (Ang. 2021).

2.3.7 Limning

Lim är ett vardagligt begrepp som brukar användas för att benämna polymeriska bindemedel. Dessa appliceras på material som ska sammanfogas (vilka benämns som "anhängare") i rumstemperatur och genomgår sedan en härdningsprocess, antingen genom förångning, avsvalning, värme/strålbehandling, eller en kemisk reaktion (Brandon & Kaplan, 1997). Det gemensamma beteendet för alla lim är att de blir spröda vid mycket låga temperaturer, och tenderar att smälta eller pyrolysera vid mycket höga temperaturer. Styrkan i härdat lim brukar också avta med ökade temperaturer, vilket kan ge drastiska förändringar i prestanda i olika miljöer. Limmade fogar brukar också ha olika nivåer av miljökänslighet, och påverkas negativt i olika utsträckning av vatten, strålning (främst UV-ljus), syror, alkaliska ämnen, eller lösningsmedel (Brandon & Kaplan, 1997). Vissa lim och de associerade rengöringsmedel vid fogberedning utgör också hälsorisker (Enbesajjad & Landrock, 2008).

Ur hållfasthetsperspektiv uppvisar lim bäst motstånd mot skjuvspänning, och styrkan ökar med överlappsarean i fogen. Detta gör att utformningen av limfogar måste utföras för att utnyttja limmets specifika hållfasthetsegenskaper.

Den övergripande klassificeringen av lim kan observeras i figur 10 undertill.



Figur 10. De olika underkategorierna av bindemedel (Enbesajjad & Landrock, 2008).

Naturliga lim innefattar bindemedel av organisk natur, som stärkelsebaserade eller djurbaserade, och är ofta begränsade till trä- och pappersindustrin. De är oftast vattenlösliga och har förhållandevis låg styrka, men hög hållbarhetstid vid förvaring. Syntetiska lim utgör de övriga typer av lim som inte är organiska, och innefattar de strukturella limmen. Dessa kommer i underkategorier som termoplaster, härdplaster, elastomer, och kombinationer av de tre, även kallat "legeringar" (Enbesajjad & Landrock, 2008). I avgränsningssyfte kommer endast härdplastiska bindemedel förklaras, eftersom de utgör den vanligaste och starkaste typen av strukturella lim.

Bindemedel som finns bland härdplasterna karaktäriseras av att de inte kan smältas efter härdningsprocessen, som styrs av en kemisk reaktion i ett enkomponents- eller tvåkomponentssystem. De förekommer vanligtvis som lösningsmedelsfria vätskor, fasta ämnen, eller olika typer av deg. Härdningen av tvåkomponentssystemen kan ske ofta långsamt i rumstemperatur, och accelereras med förhöjda temperaturer, medan härdningen av enkomponentssystem brukar kräva förhöjda temperaturer

eller avsevärt tryck. Hanteringen av härdningstider brukar medföra att limning fungerar utmärkt i lågvolymsflöden (<10 000 enheter per år), med möjlighet att accelerera processen vid behov (Norton et al, 2011). Den kemiska stabiliteten är högre hos ämnena i ett tvåkomponentssystem, och har därför längre hållbarhet innan de blandas, men har begränsad livslängd därefter. Dispenseringssystem med separata tankar och en blandare brukar därför användas i industriell miljö för att rundgå detta problem. Enkomponentssystem har mycket högre livslängd, men kräver energi för härdning. Efter härdningsprocessen uppvisar härdplasterna hög hårdhet, låg elasticitet, låg slagseghet, och i regel en värmetålighet på cirka 90–260°C, vilket ger god lämplighet för de flesta strukturella applikationer (Enbesajjad & Landrock, 2008).

Rengöring av ytor vid adhesiv sammanfogning är kopplat till ytteori, vilket är ett fenomen med hög komplexitet. För denna rapport är det mest relevanta från ytteori att det starkaste limförbandet fås med renast möjliga yta, och renast möjliga fog. Det är önskvärt att bindemedlet är rent och i direktkontakt med ytan, utan ingripande lager av färg, oxider, eller andra beläggningar. Sådana lager kallas "svaga gränsskikt", och förhindrar att bindemedlet fäster ordentligt vid ytan (Enbesajjad & Landrock, 2008). Någon form av beredningsprocess är därför nödvändig innan arbetsstycken kan sammanfogas, och metoderna varierar för de olika materielgrupperna. Endast en kort sammanfattning av rengöring av metaller kommer att tas upp i denna rapport.

Beredning av metaller inför limning kan delas upp i fem underkategorier (Enbesajjad & Landrock, 2008).

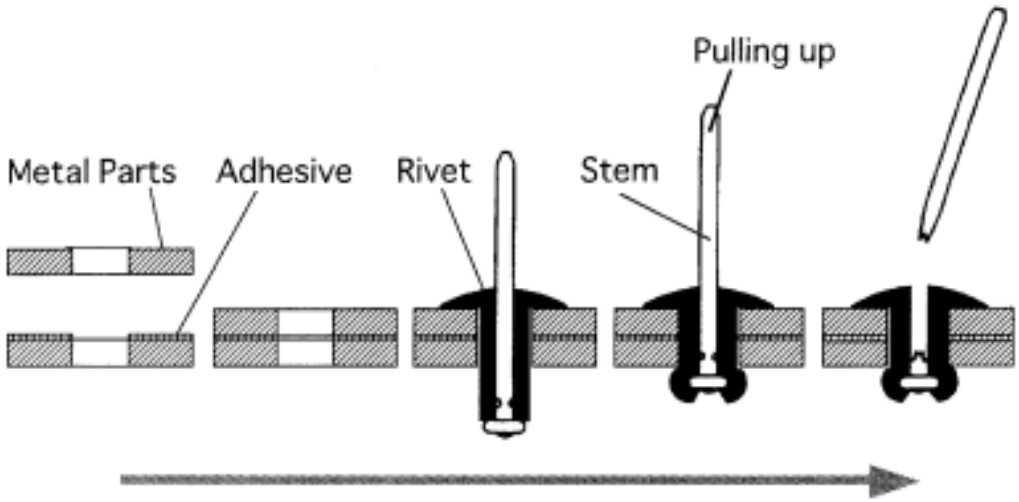
1. Rengöring med kemikalie eller lösningsmedel (kemisk rengöring).
2. Avlägsnande av lösa partiklar (mekanisk rengöring).
3. Förbättring av korrosionsresistens.
4. Grundläggning med tillsatsämne.
5. Ythärdning.

Det är främst kemisk och mekanisk rengöring som utförs på industriell nivå. Den mest effektiva metoden för att rengöra metallytor är avfettning med naturliga lösningsmedel i förångat tillstånd. Denna metod kan också kombineras med olika former av ultraljudsrengöring. Mekanisk rengöring med exempelvis sandblästring kan sedan användas, delvis för att avlägsna partiklar men också för att bindemedlet ska fästa lättare vid ytan. Kemisk etsning är ett alternativ för att avlägsna svagt bundna oxider, och i stället skapa ett skikt med starkt bundna oxider. Grundläggning av ytan med en primer kan sedan användas för att limmet ska bindas till ytan lättare, samt för att förhindra oxidering och korrosion. Vilka metoder som ska användas behöver bestämmas utifrån aspekter som exempelvis kostnad, hållfasthetskrav, underhåll, och pålitlighet (Enbesajjad & Landrock, 2008).

Limning kan medföra problem ur hållbarhetsperspektiv, eftersom polymeriska bindemedel oftast innehåller olika kombinationer av giftiga ämnen. Dessa varierar i förekomst och allvarlighetsgrad från fall till fall, men förekomsten medför potentiella problem för ekologisk och social hållbarhet. I epoxilim kan det förekomma ämnen som orsakar irritation på hud, allergisk hudreaktion, allvarlig ögonirritation, samt utgör fara för vattenlevande organismer med långtidseffekter (Henkel, 2020). Hälsorisker på grund av närvaro av farliga substanser på arbetsplatsen är ett område som omfattas av standardiserat arbete, exempelvis ett flertal ASTM-standarder (Ashley & Harper, 2005), eller ISO-standarder som exempelvis ISO 45001: 2018, ISO 23861:2022 och ISO 20581:2016 relaterade till arbetsplatssäkerhet, eller närvaro av luftburna kemikalier (International Standardization Organization, 2018; 2022; 2016).

2.3.8 Hybridfogning (nitning och limning i kombination)

Vid närvaro av fogar inom design och produktutveckling är de önskade mekaniska egenskaperna styrande vid valet av limtyp. För strukturella konstruktioner, med höga krav på styrka och styvhet, brukar någon form av epoxi vara förmånligt. Om andra krav ställs på fogen, som exempelvis tät försegling, kan ett elastomeriskt lim vara att föredra. I båda fallen kan sammanfogningen kompletteras med nitning för bästa resultat. Beroende på vad bindemedlet är, och dess syfte, påverkar valet av vilken typ av nit som kan användas. Exempelvis är det utmanande att använda PR när försegling med silikon ska utföras (se fig. 11), medan SPR är ett utmärkt val när krav på täthet ställs (Moroni & Pirondi, 2010).



Figur 11. Popnitad hybridfog med adhesivt medel för förseglande av fog (Moroni & Pirondi, 2010).

Bindemedlets funktioner för fogen är kopplade främst till ökad hållfasthet, ökad styvhet och stabilitet, ökad täthet och ökad korrosionstålighet. Nitens funktioner är kopplade till bland annat fixering av substrat under härdningsprocessen, ökad konduktivitet, motverkan mot delaminering, och ökad skydd mot fläkande delaminering (Haraga et al. 2003):

När hybridfogning förekommer inom konstruktion behöver tre delsteg respekteras för att uppnå en framgångsrik fog (Moroni & Pirondi, 2010):

1. Bindemedlets deposition/fördelning.
2. Bindemedlets polymerisering/härdning.
3. Nitens placering.

Sammanfogningstekniker vid hybridfogning appliceras beroende på vilken ordning monteringen utförs. Primärt finns det tre huvudtyper av hybridfogning (Moroni & Pirondi, 2010):

1. **Flow-in**. Niten monteras först och limmet injiceras efter. Detta kräver att limmet är av lägre viskositet och att det finns rum mellan anhängarna för att limmet ska kunna fördelas jämnt och stelna. Flow-in är fördelaktigt om befintliga fogar behöver förstärkas.
2. **Nit genom flytande/ohärdat bindemedel**. Ingen fixtur krävs för limmet eftersom niten fixerar substratet under härdning. Detta möjliggör snabb tillverkning, tack vare niten, och goda mekaniska egenskaper tack vare limmet. Denna typ är vanligast förekommande.

3. **Nit genom stelnat/härdat bindemedel**. Egenskaperna liknar enbart nitade fogar. Denna typ förekommer mest vid reparationer eller förstärkning av redan existerande limfogar, vilket förekommer mer sällan.

3 Litteraturstudie

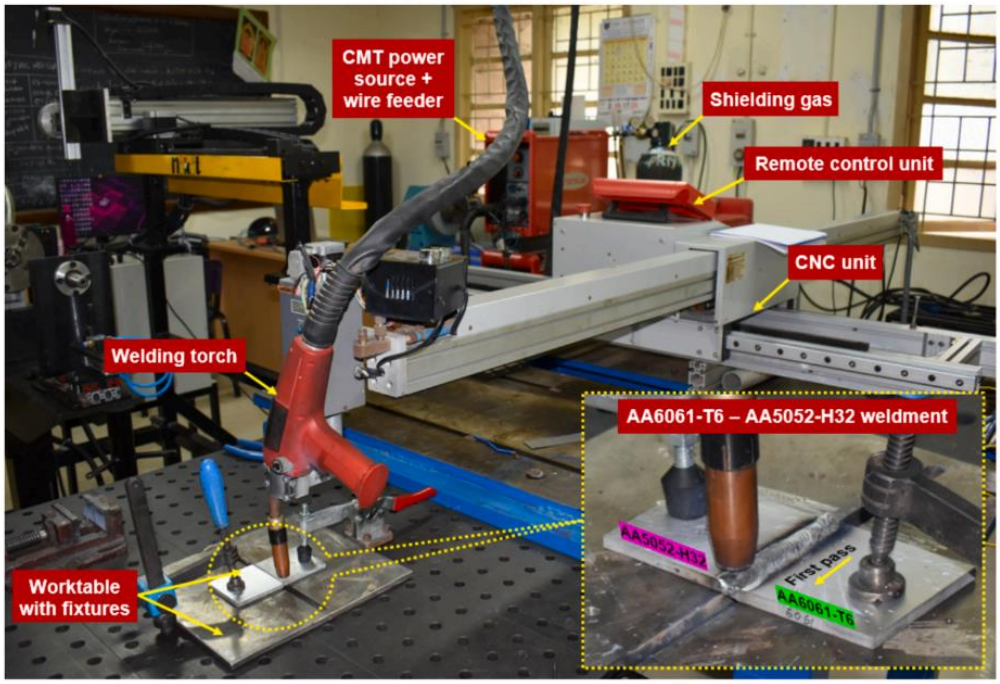
Efter den överblick som etablerats med den teoretiska referensramen kommer en mer detaljerad bild ges. Några av de artiklar som gett underlag till referensramen kommer att förklaras djupare, och beskrivning av numeriska och experimentella data kommer att utföras.

3.1 CMT

3.1.1 Sammanfogning av AA6061-AA5052 med CMT

Kannan et al (2017) fokuserar en studie på att undersöka hur effektivt sammanfogning med hjälp av CMT kan vara för sammanfogning av två dissimilära aluminiumlegeringar (AA6061-T6 och AA5052-H32). Fogen utfördes dubbelsidigt. Efter genomförd svetsning undersöktes två egenskaper hos fogen: mikrostrukturen och mekanisk integritet.

Tillsatsmaterialet var ER4042 (Al-Si_5) med en diameter på 1,2 mm. Båda plattorna som användes i experimentet var av dimensionerna 120 x 100 x 6 mm. Skyddsgasen som användes var 99,99% Argon. Gapet mellan plattorna var satt till 1 mm, och parametrar för dubbelsidig CMT var bestämda utifrån tester. Uppsättningen kan observeras i figur 12.



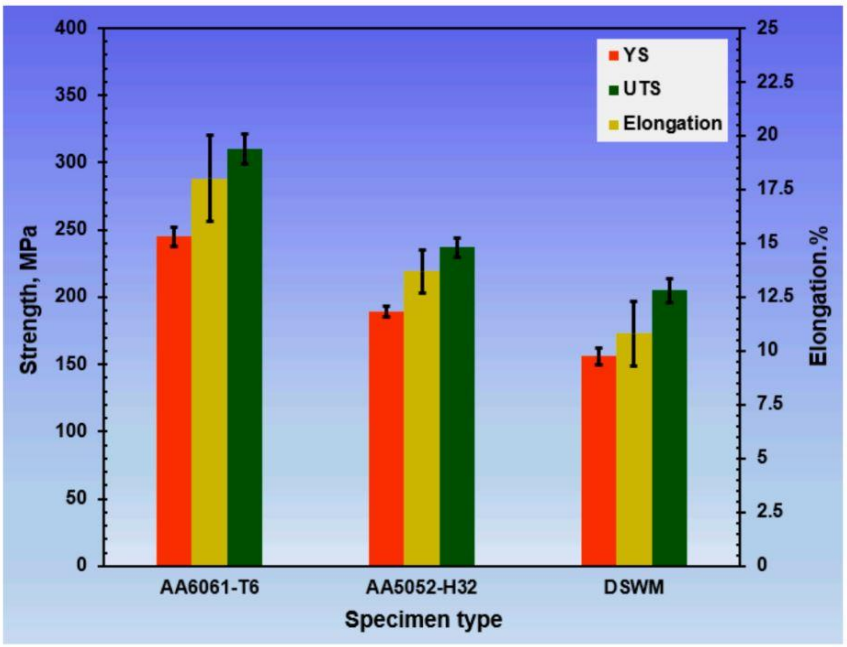
Figur 12. Uppsättning av utrustning inför dubbelsidigt svetsexperiment.

Efter svetsningen gjordes på tre separata tester utfördes provning av olika karaktär:

1. Mikroskopi av fogens mikrostruktur med hjälp av elektronmikroskop (SEM) av basmetallerna, HAZ och tillsatsmaterialet.
2. Uniaxial dragprovning av basmetallerna och fogen med hjälp av en Tinius Olsen HKL50-maskin, med draghastighet på 1 mm/min (ASTM E8/E8M-22 standard).

3. Hårdhetsprov av provexemplaren med hjälp av en Struers Duramin-4 M1 microhardness-maskin, med en applicerad last på 200 gram och en lasttid på 15 s (ASTM E92-17 standard).

Resultaten av tre provexemplar gav följande påverkan mikrostrukturen för hårdhet, sträckgräns (YS), brottgräns (UTS) och töjning:



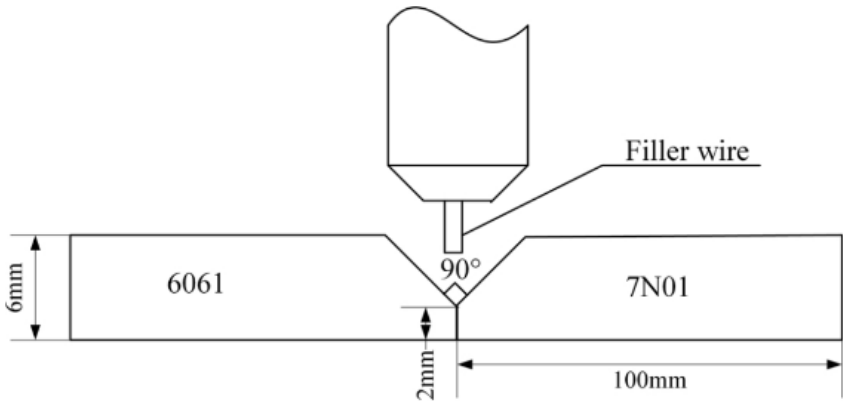
Figur 13. Diagram med resultat från dragprovning.

Det fanns en mindre mängd porer i FZ (fusionszonen) än övriga områden. Undersökning av ”dissimilar welding metal” (DSWM), för hårdhet på båda sidor av fogen, gav en skillnad i hårdhet i DSWM som berodde på skillnaden på halten av korn i vardera metallen inom denna zon. Kornbildning (av olika ämnen) inom mikrostrukturen påverkade materialegenskaper i DSWM. Resultatet visade att fogen hade en effektivitet på 70,68 % av sträckgränsen för AA6061-T6 (starkaste legeringen inom undersökningen). Slutsatser var av experimenten var att CMT gav symmetriska och defektfria fogar mellan dessa två legeringar. CMT visas vara en godartad sammanfogningsmetod för dissimilära legeringar av aluminium.

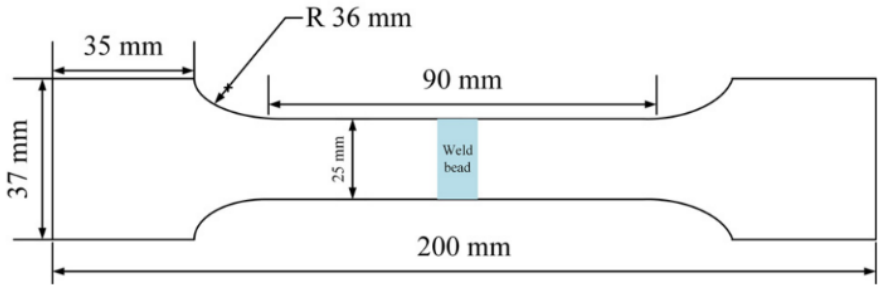
3.1.2 Sammanfogning av AA6061-AA7N01 med CMT+P

Li et al (2019) undersöker potentialen hos CMT+P, vilket är traditionell Cold Metal Transfer med kombination av pulssvetsning, vid sammanfogning av AA606-T6 och AA7N01-T4. De unika karaktärsdrag som CMT+P har (jämfört med vanlig CMT) leder till bättre reglering av temperaturer, men med ökad penetration, vilket skapar potential för att svetsa strukturer av tjockare aluminiumlegeringar. Undersökningen genomfördes till följd av brist på information om sammanfogning av dessa dissimilära legeringar, kombinerat med legeringarnas förekomst inom konstruktion av höghastighetståg. Värmepåverkan, mikrostruktur och mekaniska egenskaper var målet att undersöka i denna studie.

Plattorna som svetsades ihop var av dimensionerna 200 x 100 x 6 mm (se fig. 14 & 15), och utfördes av ett CMT Advanced 4000R aggregat, kombinerat med en svetsrobot. Parametrar som trådmatning och svetshastighet var konstant genom hela genomförandet. Skyddsgasen var ren argon med en tillförsel på 15 L/min.

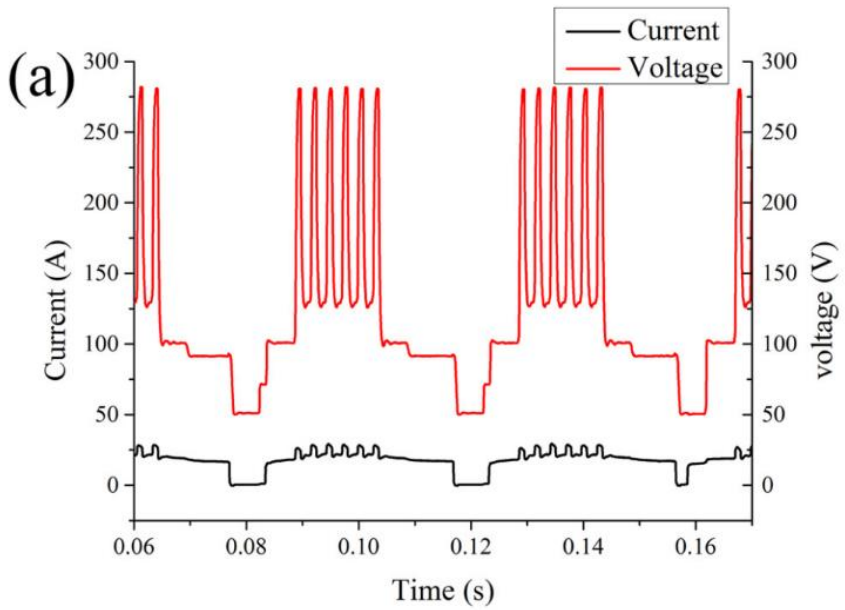


Figur 14. Illustration av stumfogens geometri, vy från sidan.



Figur 15. Illustration av stumfogens geometri, vy ovanifrån.

Resultaten för sammanfogningen med olika CMT+P-förhållanden varierade. Detta berodde på hur värmeutvecklingen påverkas av inställningen av ström/spänning under svetsningen (se fig. 16).



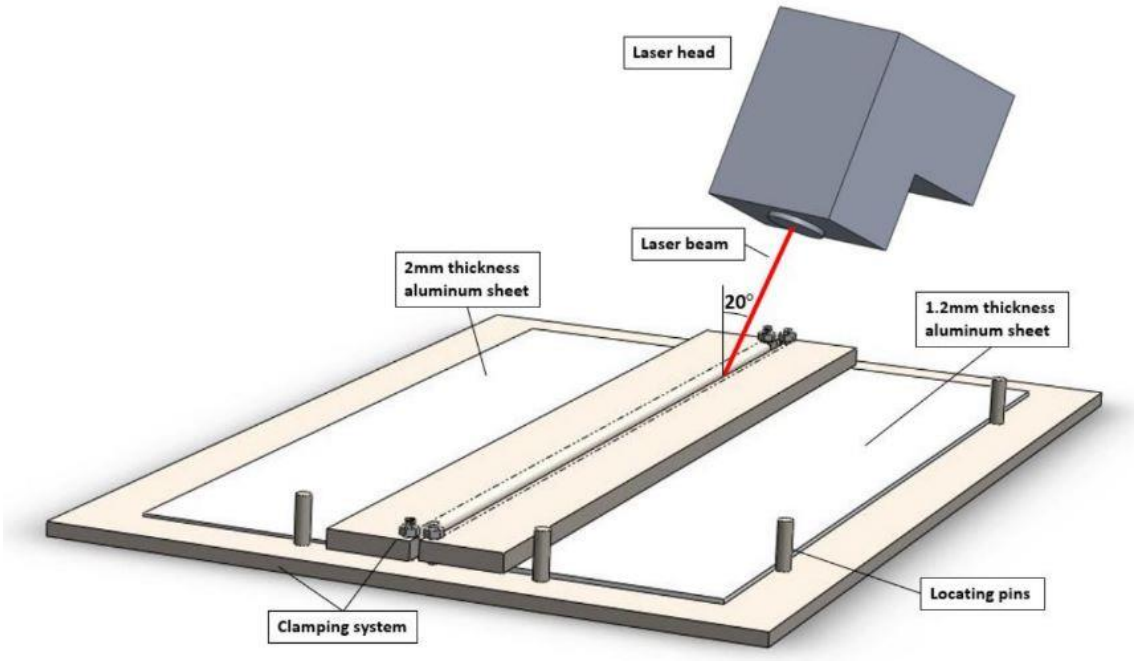
Figur 16. Graf av en variant av ett CMT+P förhållande som visar ström/spänning över tid.

Slutsatser från undersökningen var att med högre CMT+P-förhållande tillkommer högre temperaturer, vilket påverkar de mekaniska egenskaperna hos båda legeringarna. Detta förhållande är viktigt, eftersom endast optimal kalibrering uppnår defektfria fogar. När förhållandet inte uppnår detta krav kan det leda till dålig fusion av materialen. Den termiska påverkan vid upphettning och kylning för svetszonen orsakade strukturförändring på mikronivå, vilket ledde till att hårdheten runt HAZ ökade. Styrkan för fogen uppnådde ett värde på 60% av sträckgränsen för AA6061.

3.2 Lasersvetsning

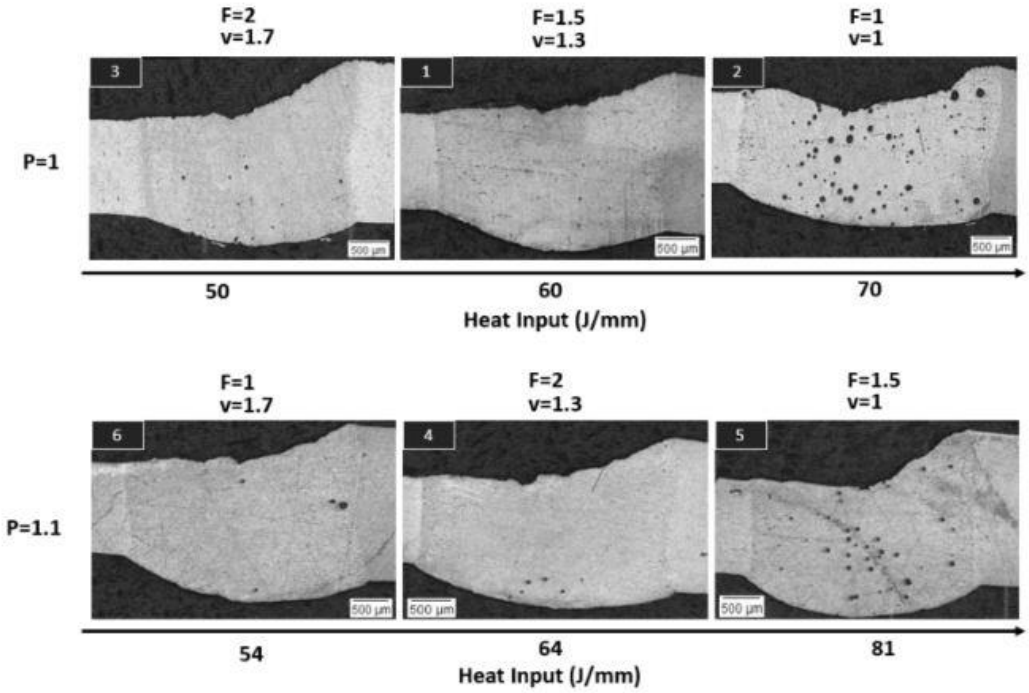
3.2.1 Sammanfogning av AA6016-T4 & AA6061

Basile et al (2022) undersökte lasersvetsningens egenskaper vid sammanfogning av ”tailor welded blanks” (TWB). Detta är en typ av förbearbetning som används för att skapa arbetsstycken med heterogena egenskaper, exempelvis olika tjocklekar eller materialegenskaper. Dessa arbetsstycken bearbetas sedan med stansning för att erhålla sin slutliga form, och metoden har med tiden fått ökad användning inom bilindustrin. Plattor av dissimilära legeringar (AA6061-T4 samt AA6061) med dimensionerna 122 x 408 mm (med tjocklek på 1,2 samt 2,0 mm) sammanfogades med hjälp av en TruLaser Cell Series 7040 system, med en Nd-YAG laser TRUMPF Trudisk 4001. Lasern kunde producera maxeffekt på 4000 W, våglängden på lasern var 1,030 μm, och svetsvinkeln var på 20 grader från fullt vertikal (se fig. 17). Mikrostrukturen hos fusionszonen (FZ) och HAZ undersöktes via mikrografi och dragprovning.



Figur 17. Illustration av setupen som användes vid experiment.

Med avseende på parametrarna för lasersvetsen resulterade hög värme-input i högre porbildning, och även ökad rot-konkavitet (se fig. 18), vilket var en av orsakerna till nedsatt mekanisk styrka för fogen. En smalare godstjocklek på plattorna (1,2 mm) medförde större töjning innan kollaps, jämfört med den tjockare varianten (2,0 mm). Proverna visade att när smalare och tjockare plattor sammanfogades tillsammans fick fogen tillräcklig styrka, om noga kontroll av parametrar vid svetsningen genomfördes (ex. värmeutveckling).

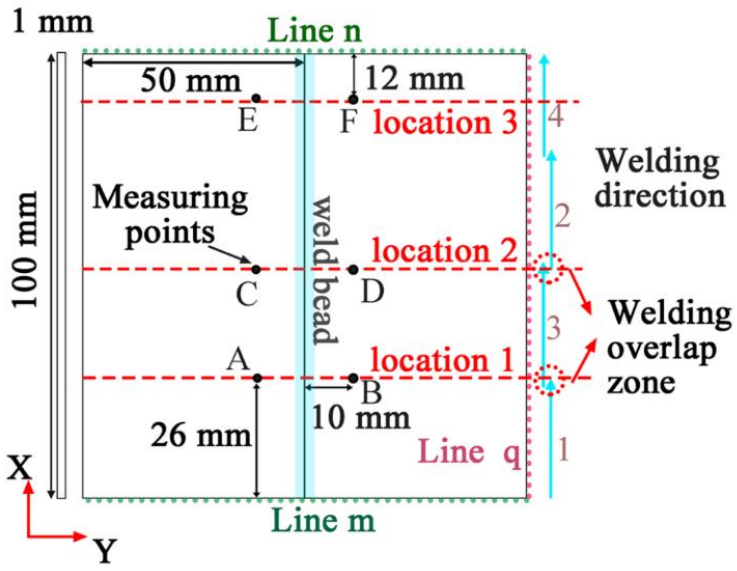


Figur 18. Tvärsnitt av ytor svetsade under olika förhållanden. P: Normaliserad effekt. v: Normaliserad svetshastighet. F: Fokuspositionen (mm).

3.2.2 Undersökning av segmenterad/kontinuerlig fog & FEM-analys av AA6061

He et al (2022) har undersökt hur lasersvetsning i segmenterade fogar jämförs med kontinuerliga fogar på plattor av AA6061 med dimensionerna 100 x 100x 1 mm (se fig. 19). Undersökningen genomfördes med experimentella prover med hjälp av en YSL-4000 laser (2000 W) och argon som skyddsgas. Numerisk undersökning med FEM skedde via ABAQUS- och Fortran-program. Svetsparametrarna var förvalda utifrån tidigare utförda experiment av denna typ. Kopplad termisk förskjutning, olinjärhet, thermo-mekaniska egenskaper, och värmekällans rörelse antogs för 3D-FEM-modellen.

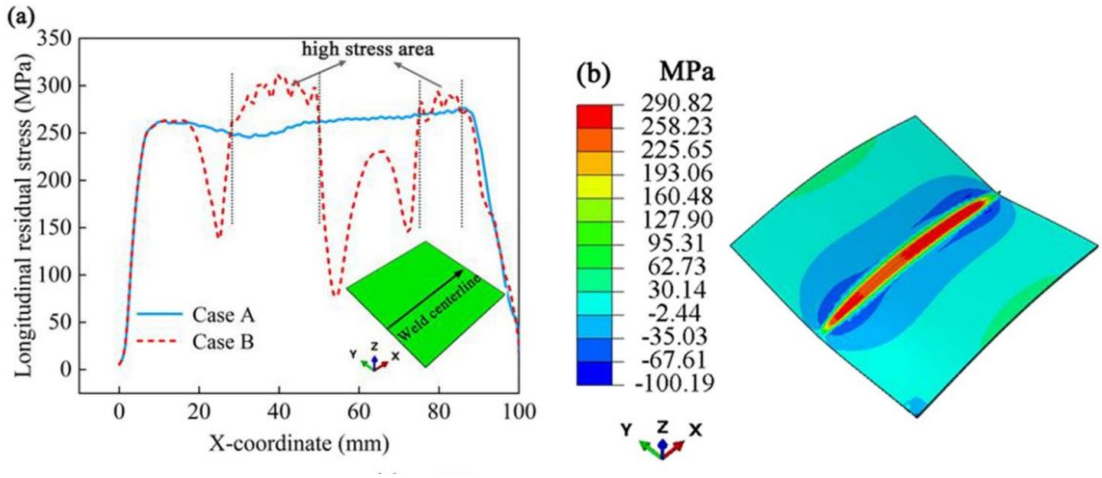
Plattorna för proverna slipades och ytbehandlades med vattenfri etanol för att förbättra svetsbarheten. Två typ av tester utfördes (Typ A och Typ B) som representerade hur fogen skulle genomföras.



Figur 19. Schematisk illustration av layouten för experimentet.

Proverna mättes med hjälp av mikrografi (SEM) och CMM för jämförelse med simuleringsresultaten för bland annat förvrängningar ur planet (transvers krympning), för att undersöka värmekällans bidrag till restspänningar. I FEM-modellen undersöktes total töjning som en summa av elastisk töjning, plastisk töjning, och termisk töjning (se fig. 20). Von Mises-effektivspänning mättes efter att termiskt beroende materialegenskaper använts. Värmekällan som modelleras utvecklas via subrutiner i ABAQUS.

Slutsatserna var att användningen av segmenterade fogar kan minska värmepåverkan och öka effektiviteten av nedkylningsprocessen. Konsekvenser av minskad värmepåverkan ledde till minskad krympning och därav färre deformationer. Den segmenterade fogen hade en minskad krympning på 12,9% jämfört med den kontinuerliga fogen. Påverkan av restspänningar varierade mellan fogtyperna, med mindre restspänningar i vissa områden samtidigt som andra områden visade på högre restspänningar vid segmenterad fog jämfört med kontinuerlig.



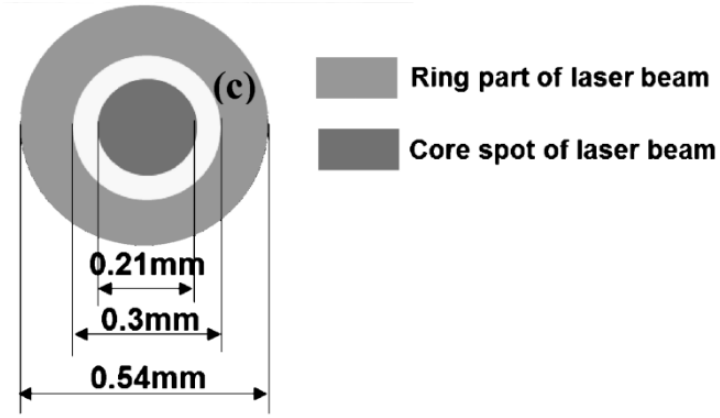
Figur 20. Graf av spänningsfördelningen i Case A samt B över respektive fog.

3.2.3 FEM-analys av ARM-laser för AA6061-T6

Kong et al. (2020) undersöker den termisk-mekaniska påverkan från “Adjustable Ring Mode Laser” (ARM-Laser) i form av restspänningar i ett aluminiumsubstrat. En 3D-ickelinjär-FEM-analys utfördes, samt experimentella försök för ytterligare verifiering. De experimentella testerna genomfördes på fogen av en AA6061-platta med godstjocklek på 3,1 mm.

ARM innebär att fokalpunkten för laser är uppdelad i två områden (se fig. 21);

1. Ringzonen, vars uppgift är att förvärma materialet för att minska reflektivitet hos metallen. Detta är vanligt förekommande hos aluminiumlegeringar, speciellt vid startpunkten av svetsfogen.
2. Fokalpunkten, som är den mer koncentrerade zonen, som skapar nyckelhålssmältan för sammanfogning.



Figur 21. Principen för en ARM-laser.

Svetsningen genomfördes med en treaxlig CNC-maskin, med en 4000 W Coherent Inc ARM-laser. Plattorna genomgick ytrengöring med etanol och skyddsgasen var ren argon med ett standardflöde på 40 kubikfot per timme. Parametrar som undersöktes vid svetsningen var energitillförseln till ringzonen och fokalpunkten. Två ytterligare fall av olika svetshastigheter testades, eftersom energitillförseln var konsekvent för båda fallen. Mikrostrukturen observerades efter genomförd provkörning (se tabell 1, s. 26).

Tabell 1. Parametrar för genomföringen av lasersvets med ARM.

No.	Laser Powers, kW		Travel speed, mm/s	Laser focus distance, mm
	Ring	Core spot		
1	1.0	3.0	60	0
2	0	3.0	60	0
3	4.0	0	60	0
4	2.0	3.0	60	0
5	2.0	2.0	60	0
6	2.0	4.0	60	0
7	2.0	3.0	40	0
8	2.0	3.0	80	0

Simulationer genomfördes i simuleringsprogrammet ANSYS. För FEM-modellen gjordes flera antaganden gällande termisk-mekanisk påverkan för att simplifiera modellen för simuleringen. Bland annat togs beslut att ignorera svetspoolens vätskebildning. Vid den termiska påverkan på de mekaniska egenskaperna antogs att värmen var kopplad till materialegenskaperna. Von Mises-effektivspänning mättes och bilinjär isotropiskt härdande antogs för materialet, efter sträckgränsen hade uppnåtts.

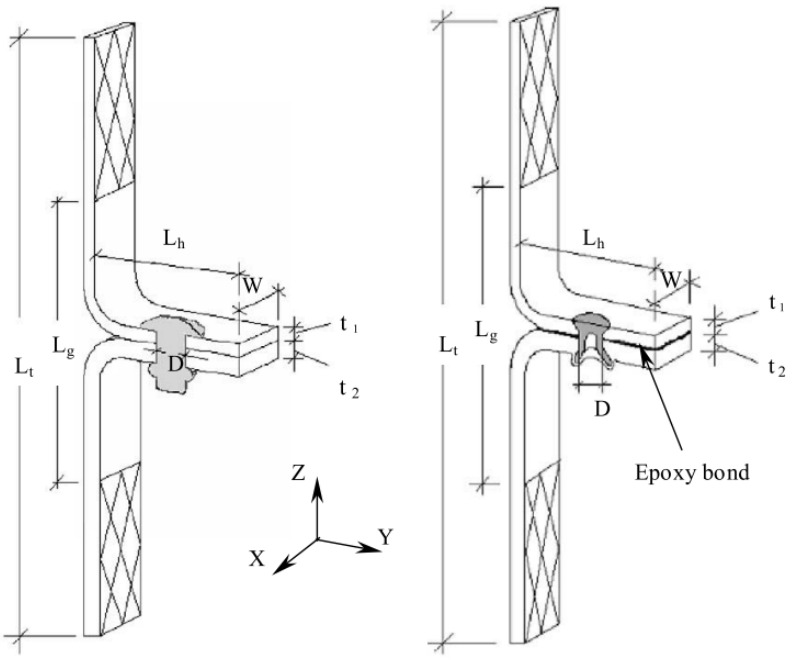
Vid jämförelse av FEM-simuleringar och resultat från experiment (som undersöktes via X-ray diffraktion) överensstämde resultaten väl vid undersökning av svetsen, FZ, och HAZ, med några få avvikelser gällande restspänningar.

Slutsatser från studien var att med korrekt justering av parametrar så kan svetsdjup, restspänningar, osv. förbättras vid användning av ARM. Detta bekräftades med FEM och experiment, som tydde på överensstämmelse av restspänningar. Utifrån justering i svetsparametrarna kunde synergin mellan ringzonen och fokalpunkten kopplas till minskad porositet i fogen för AA6061.

3.3 Nitning

3.3.1 SPR-epoxifog jämfört med PR-fog

Li och Fatemi (2006) jämförde fläkhållfastheten och utmattning av popnitade förband med en SPR-epoxi hybridfog, med skal- och utmattningsprovning på nitade T-förband av aluminiumplåt (se fig. 22). Experimentet utfördes med olika kombinationer av plåttjocklekar för översidan respektive undersidan av membranet. Valet av en hybridfog vid jämförelse gjordes eftersom förkunskaper finns att popnit tål högre krafter än självhålande nit, vilket också bekräftades i experimenten.



Figur 22. Illustration av T-fogarna som användes vid experiment. Den popnitade fogen kan observeras till vänster och SPR-fogen till höger.

Resultaten visar att popniten uppvisar motstånd mot ungefär dubbelt så stora krafter som SPR-epoxi-förbandet, vid denna typ av belastning av T-förband. Detta kan attribueras till de plastiska deformationer som SPR skapar inuti förbandet. Epoxin bidrog endast till den ultimata styrkan i fogen vid den tjockaste kombinationen av plåtarna.

De båda förbandstyperna kollapsar i materialet vid tunnare plåttjocklek, men kollaps sker i niten vid användande av tjockare plåtar. Kontaktskador mellan nithuvudet och materialet var de huvudsakliga orsakerna till begynnande kollaps.

Testning med cyklisk belastning utfördes för båda förbandstyper, för de tidigare bestämda kombinationerna av plåttjocklek med bestämda kraft-amplituder. Olika förhållanden mellan högsta och lägsta kraften för varje cykel introducerades också som en variabel.

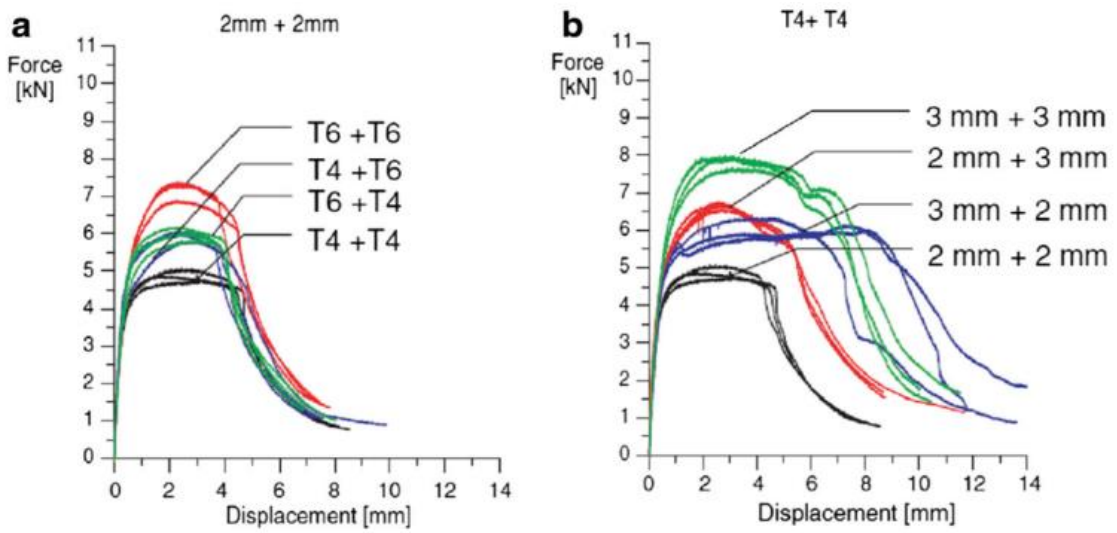
Båda förbandstyperna höll längre vid högre förhållande mellan högsta och minsta kraft, tack vare att plåtarna vreds mer vid högre kraftvariation och avlastade förbandet. Epoxin separerade också mycket senare vid användandet av lägre kraftamplituder, och epoxin bidrog inte avsevärt till ökad hållbarhet vid en hög cyklisk last. Sammanfattningsvis uppvisade SPR-epoxi- och PR-fogarna liknande egenskaper vid cyklisk belastning med högre amplitud, medan SPR-epoxi visade bättre hållfasthetsegenskaper än PR vid cyklisk belastning med lägre amplitud.

3.3.2 Utvärdering av SPR-förband

Li et al (2017) har jämfört och analyserat delar av den forskning som fanns tillgänglig vid publicering av artikeln.

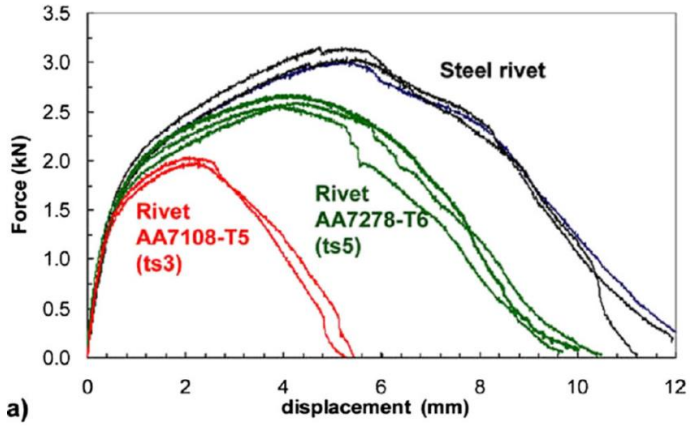
Experiment har visat att om två profiler med olika tjocklek sammanfogas erhålls oftast de bästa hållfasthetsegenskaperna om niten får penetrera det tjockare materialet först. Vissa kombinationer av legeringar och tjocklekar kan dock ge motsatt beteende vilket gör att geometrin, tjockleken på förbandet, materialegenskaperna, och staplingsordningen av materialen är alla lika viktiga vid utformning.

Experiment visar på att plåtar med högre tjocklek, högre styvhet och högre (samt likartad) tjocklek tenderar att ge starkare förband (se fig. 23).



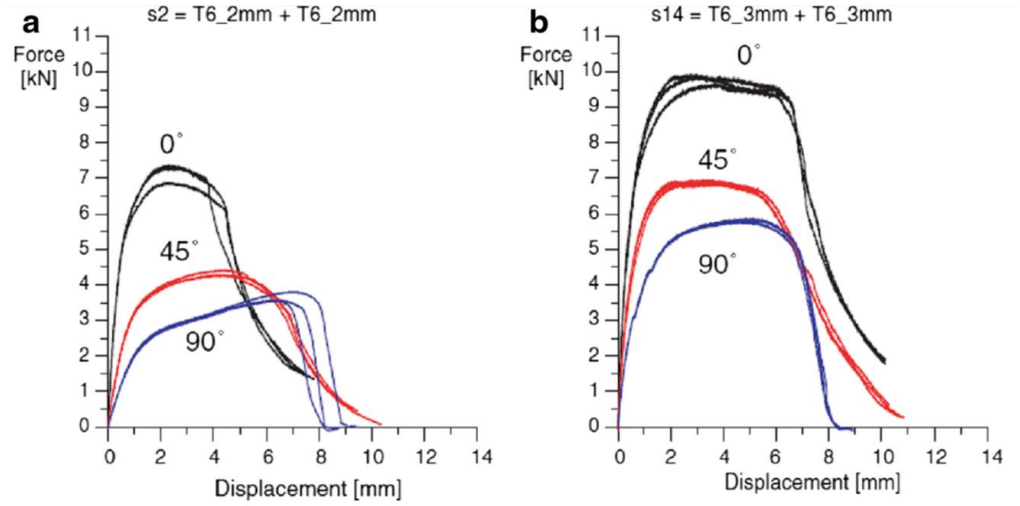
Figur 23. Grafer med skjuvkraft relativt förskjutning för olika substratskombinationer. Härdningen (T), tjockleken och sammansättningen på anhängarna i substratet varierades.

Materialval för nitarna är begränsat av att niten måste klara krafterna och deformationerna vid montering. De är ofta gjorda av Bohr-stål, men experiment med härdad aluminiumnit tillverkad av 7xxx-serien har gett goda resultat vid sammanfogning av 6060-aluminium, med viss försämring för hållfastheten (se fig. 24).



Figur 24. Graf med jämförelse mellan stål- och aluminiumnitar belastade i modus I & II.

Det mekaniska beteendet hos en SPR-fog förändras beroende på hur den belastas vinkelrätt mot nithuvudet (se fig. 25). Experiment visar på att styrkan minskar med ökad belastningsvinkel, med andra ord att ren skjuvspänning (vid 0° vinkel) ger den bästa styrkan i en fog, följt av kombinerad skjuv/drag (mellan 0° och 90° vinkel), följt av ren dragspänning (90° vinkel), och sämst styrka ger fläkbelastning (moment).

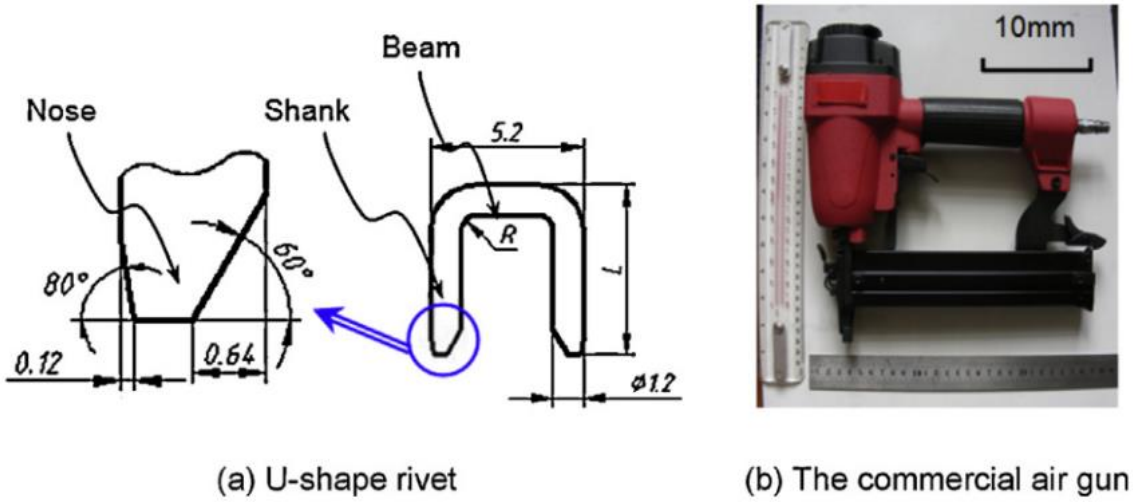


Figur 25. Grafer med jämförelse av kraft relativt förskjutning, mellan olika belastningsvinklar för ett par olika substratskompositioner.

Nitarnas placering och dess påverkan på en fog har undersökts experimentellt. I ett dubbelnitat förband (överlapp och T-fog) varierades nitarnas centrum-centrumavstånd, och avståndet mellan centrum och kanten på fogen. Experimenten visade på att styrkan i överlappsfogen ökade upp till när nitarna var placerade runt 11,5 mm från kanten, samtidigt som det longitudinala avståndet hade minimal påverkan. Antalet nitar är därför viktigare än avståndet mellan dem. För T-förbandet ökade styrkan i fogen allteftersom avståndet från kanten ökades, under hela spannet som testades (mellan 5 och 14,5 mm).

3.3.3 Single-sided piercing rivets (SSPR)

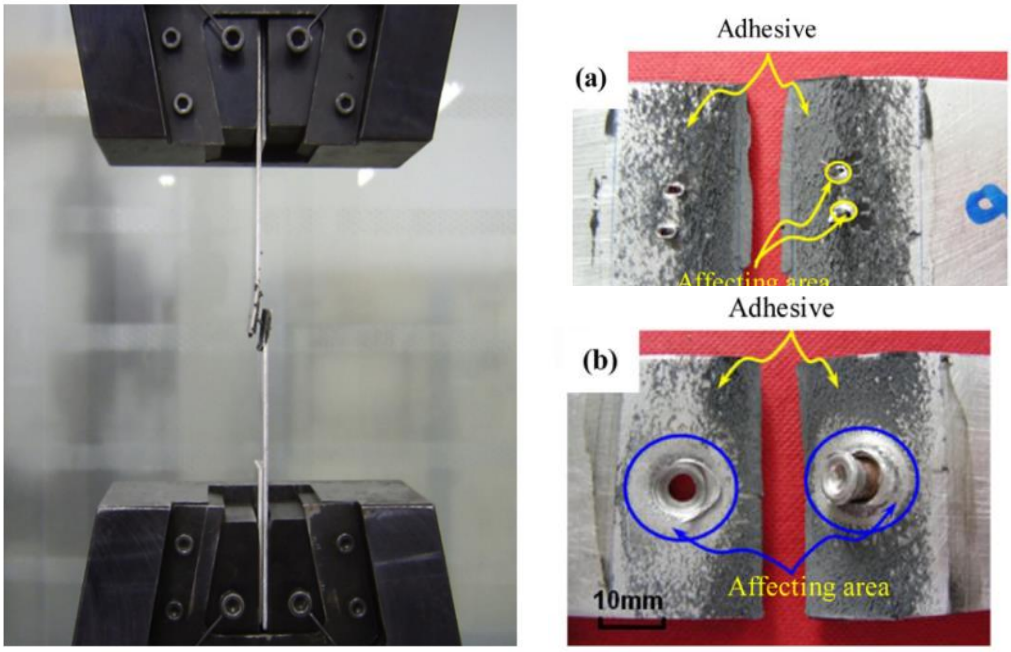
Enkelsidiga SPR-nitar är en variant av självhålande nit som Liu et al (2013) testade. Denna typ av nit möter behoven som SPR fyller; fixering vid adhesiv sammanfogning, goda hållfasthetsegenskaper, och lågt bidrag till vikten i en konstruktion, men med högre geometrisk kompatibilitet än traditionella SPR. Som omnämnt i punkt 2.3.6 i den teoretiska referensramen kan SSPR monteras utan åtkomst till baksidan av arbetsstycket, vilket gör att de kan användas för att sammanfoga anhängare mot olika typer av rörprofiler eller konstruktioner. I studien erhölls goda resultat vid montering med en standardiserad 422J luftpistol, och specialtillverkade nitar som liknar häftklamrar i utformning (se fig. 26).



Figur 26. Kommersiell SSPR-nit och nitpistol.

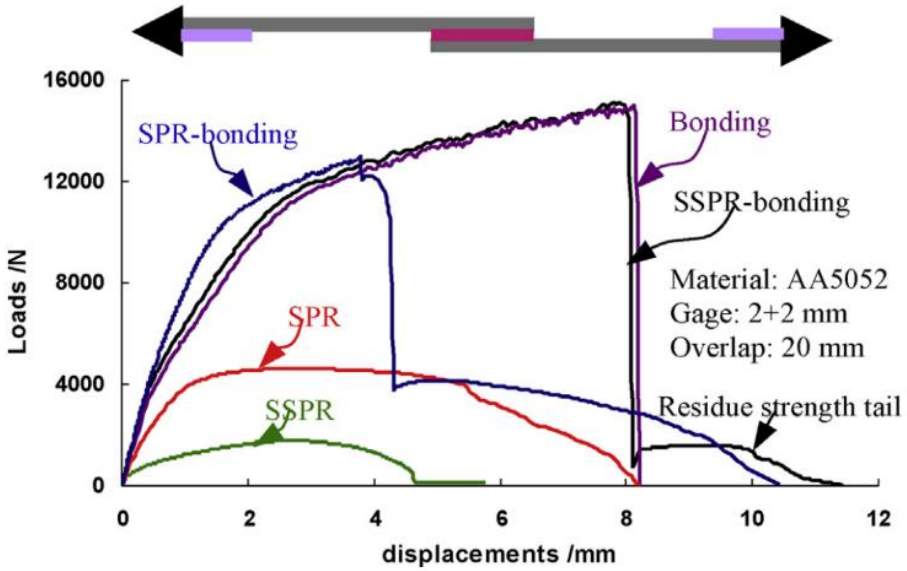
Dragprovning utfördes med 20 mm överlapp på SPR, SSPR, SPR-hybrid- och SSPR-hybridfogar, och en ren limfog för jämförelse (se fig. 27). Resultaten visar på att en ren SPR-fog tålde ungefär dubbelt så stora krafter som en ren SSPR-fog, men SSPR-hybrid tålde högre krafter än SPR-hybrid innan kollaps. Styrkan i SSPR-hybridfogen var dock nästan identisk med en ren limfog, vilket har två huvudsakliga anledningar (se fig. 28).

1. Limmet var den största bidragande faktorn till styrkan i hybridfogen.
2. De högre kompressiva krafterna som en SPR introducerar i förbandet påverkar limmets påverkan på fogen. Lim trycks ut från ytan runt niten och intern plasticering äger rum, vilket försvagar förbandet.



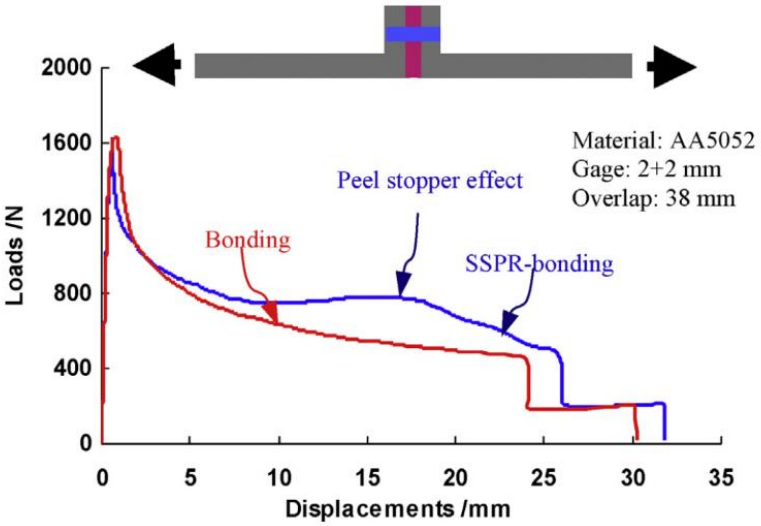
Figur 27. Brott vid dragprov av nitförband, och brott för a) SSPR och b) SPR.

För att återkoppla till vikten av limmets närvaro i en hybridfog testades även ett överlapp på 15 mm, med både SSPR-hybrid och en ren limfog. Vid överlapp på 15 mm uppvisade hybridfogen sämre hållfasthet än en ren limfog med samma överlapp, medan styrkan var jämförbar vid 20 mm överlapp. Slutsatserna som drogs var att nitens negativa påverkan på homogeniteten i limförbandet blir större vid mindre överlapp.



Figur 28. Graf av kraft relativt förskjutning vid dragprovning av förbanden.

Vid skaltestning av en SSPR-hybridfog bidrog niten positivt till prestandan i förbandet, men kraften som krävdes för att initiera delaminering var likvärdig (se fig. 29). Niten agerar som en form av stoppkloss för att motverka kollaps vid delaminering.

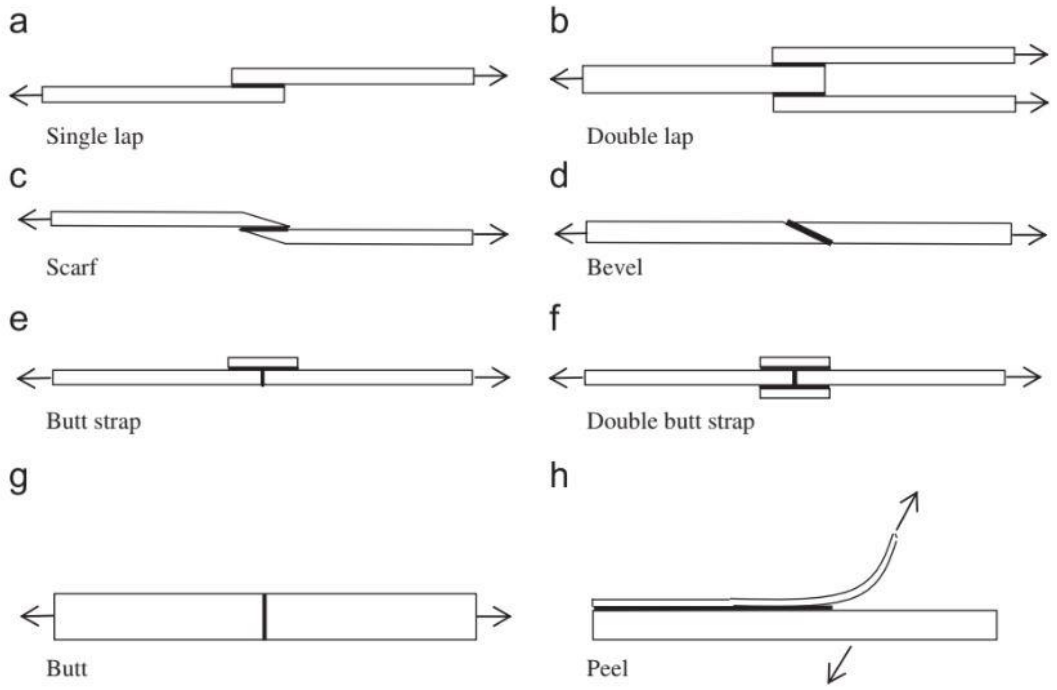


Figur 29. Graf av kraft relativt förskjutning vid fläkbelastat hybridförband.

3.4 Limning

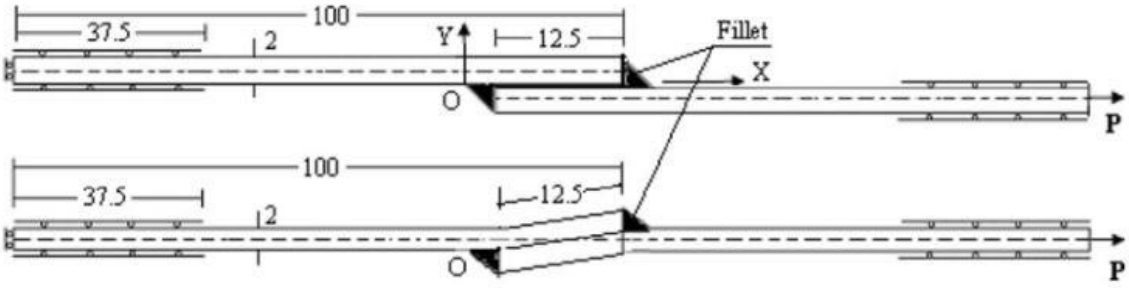
3.4.1 Recension av FEA av limfogar

He (2011) jämför och förklarar hur FE-analyser kan användas för att analysera limfogar. Inledningsvis beskrivs de olika typer av fogar som typiskt förekommer vid adhesiv sammanfogning (se fig. 30). Dessa utformas för att undvika skalning eller klyvning, eftersom dessa typer av spänningar leder till kollaps i fogen.



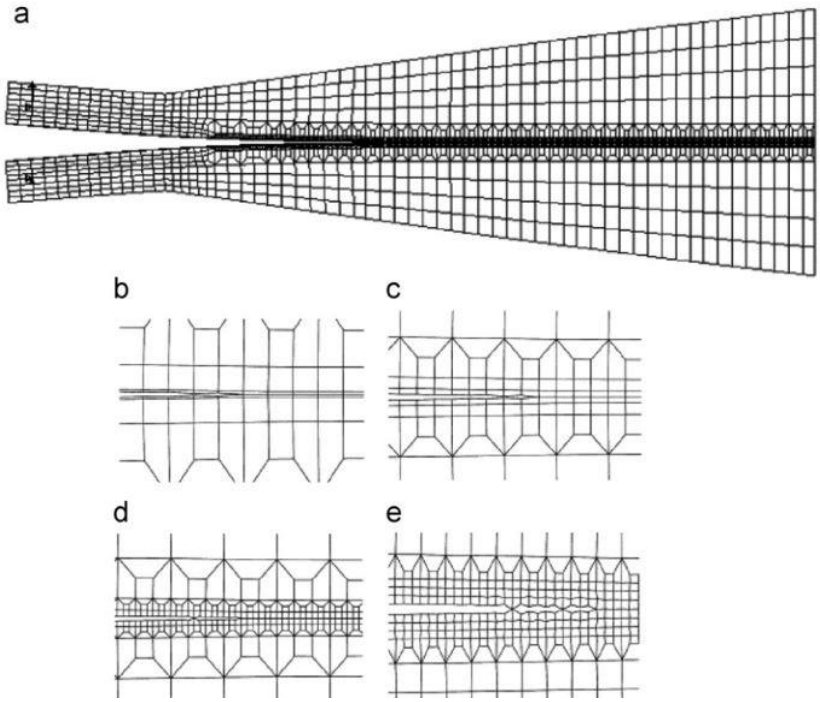
Figur 30. Exempel på fogar som används vid adhesiv sammanfogning.

Enkel överlappsfog är den vanligast förekommande fogtypen som har analyserats experimentellt. Singulariteterna som kan bildas i ytterkanten vid belastning bidrar till kollaps i fogen, och de bidrar till fogens styrka. Närvaron av en kantfyllning (se fig. 31) är ett sätt att bidra till minskad allvarlighet hos singulariteterna, och analyser påvisar att överlappet mellan anhängarna bidrar till hållbarheten upp till en viss nivå. Därefter blir kollaps i anhängarna mer förekommande.



Figur 31. Utformning av limfog med en kantfyllnad, samt hur lodlinjen i konstruktionen skiftar vid belastning.

Modellering av sprickpropageringen i det adhesiva lagret har utförts med FEM-analys (se fig. 32), med elastoplastisk skalning och separation av noder vid kritisk plasticering. I studien användes olika typer av mesh för olika områden. Analyser kan genomföras och stämma väl överens med experimentella data, och FEM-analys uppvisar god potential för att förutsäga styrkan i limfogar.



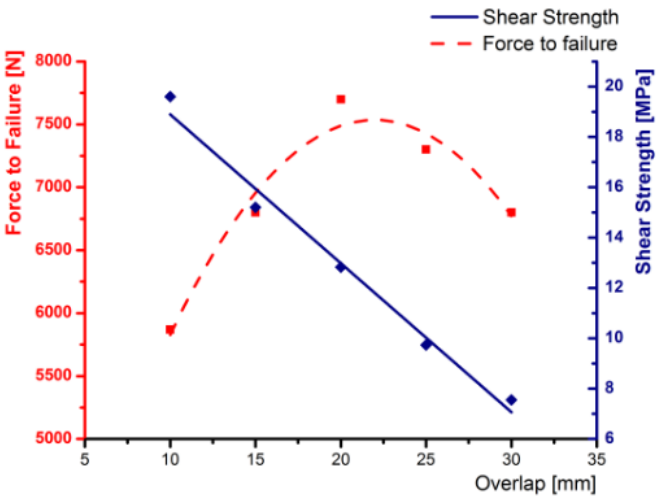
Figur 32. Exempel på meshing vid FE-analys av sprickpropagering i limförband

3.4.2 Adhesiv sammanfogning av A5754 med epoxi

Michalek & Marônek (2013) utförde tester på ett förband av 5754-aluminium, med två typer av tvåkomponents-epoxi: Hysol 9466 och Hysol 9492.

Dragprovning utfördes för att testa fogens motstånd mot skjuvspänningar. Testerna visade att Hysol 9466 gav en fog som var 55% starkare än Hysol 9492, men den sistnämnda hade bättre termisk stabilitet. Ökat överlapp bidrog till att skjuvhållfastheten i fogen sjönk linjärt, men den högsta kollapskraften erhölls vid ett överlapp på 20mm (se fig. 33), vilket ansågs märkligt. En fraktografisk analys utfördes för att förstå resultaten, och konstaterande gjordes att kollaps skedde i gränssnittet mellan lim och

anhängare. Detta betyder att de adhesiva krafterna mellan lim och anhängare var lägre än kohesiva krafter inuti limmet vid detta överlapp.

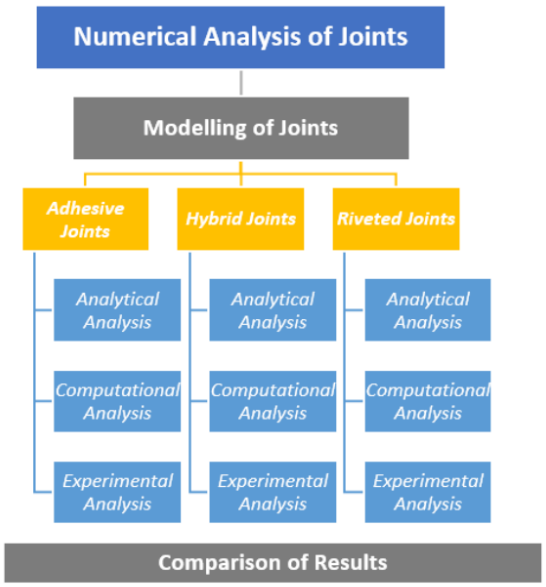


Figur 33. Kollapskraft och skjuvstyrka i förhållande till olika längder på överlapp i överlappsfogar.

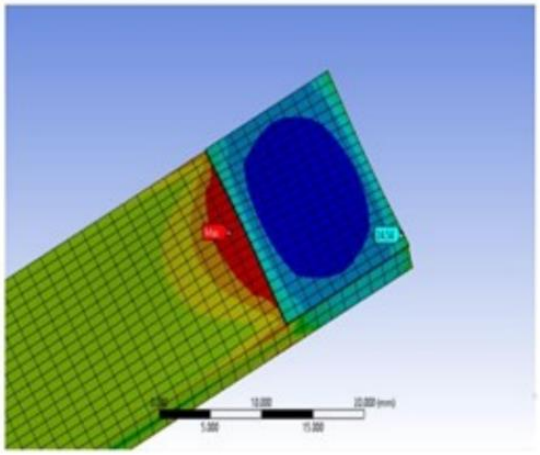
3.5 Hybridfogning

3.5.1 FEM-analys av nitning/limning/hybridfog

Khan et al. (2021) har undersökt hur styrkan för nitade förband kan förbättras med hjälp av adhesiva ämnen (se fig. 34). Utifrån FEM-analys (se fig. 35) undersöks tre fall av sammanfogning (nitförband, limförband och hybridförband) för att undersöka hur respektive förband har kvaliteter som kan utnyttjas vid sammanfogning. Plattor av AA2024 sammanfogades med en, två respektive tre nitar, både med endast nit och med Hydrosol 9394 epoxilim som hybridfogar. Dragprovet gjordes med en universell dragprovmaskin. Detta prov gjordes tre gånger för respektive typ för att få ut medelvärden på kraft- och materialdata. Författarna påpekar även att ingen ASTM-standard existerar för denna typ av prov.



Figur 34. Modell för analys av fogtyperna.



Figur. 35. Skjuvspänningsfördelning i en limfog.

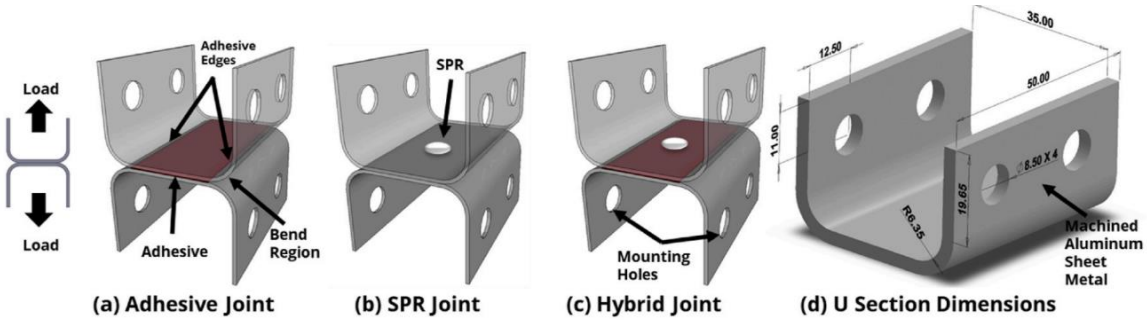
Limmet som modellerades var Hydrosol 9394 epoxi. Data från resultaten applicerades senare i FEM-analysen för att undersöka om hur ren nitning, ren limning och hybridförbanden jämförs. Skjuvspänning undersöktes, eftersom bi-axiala dragprov visar att skjuvspänningen orsakar brott först.

Modellering utfördes i simuleringsprogrammet ANSYS med en statisk analys av belastning, på samma konfiguration som provexemplaren från dragproven. Modeller av tre fogtyper gjordes och resultaten för effektivspänningar för vardera fogen jämfördes.

Sammanfattningsvis resulterade analyserna i att hybridförbanden hade 20-25% högre styrka vid påverkan av skjuvspänning utifrån alla simulationer. Denna slutsats är baserad på att Hydrosol 9394 epoxin absorberade en del av energin som niten/nitarna annars skulle absorberat. Vissa fel vid simuleringen uppträdde som kan ha påverkat resultaten för effektiviteten hos hybridförband. Enligt Khan et al. (2021) ska experimentella data stödja resultaten.

3.5.2 Jämförelse av SPR-nitning/limning/hybridfog

Cronin & Ibrahim (2022) genomförde en undersökning angående olika typer av sammanfogning för aluminiumprofiler (se fig. 36). Premissen var att undersöka hur väl styrkan, styvheten, och energiabsorptionen jämfördes mellan ren SPR-nitning, ren limning, samt hybrid för H-profiler av två olika legeringar (AA6061-T6 och AA5052-H32) och tre olika godstjocklekar (1, 2, samt 3 mm). Limmet som användes var ett epoxibaserat strukturellt lim (07333; 3M, Canada) som har maxlastförmåga på runt 40 MPa i Modus I. Lastningen skedde i form av dragspänning under konstant belastning.

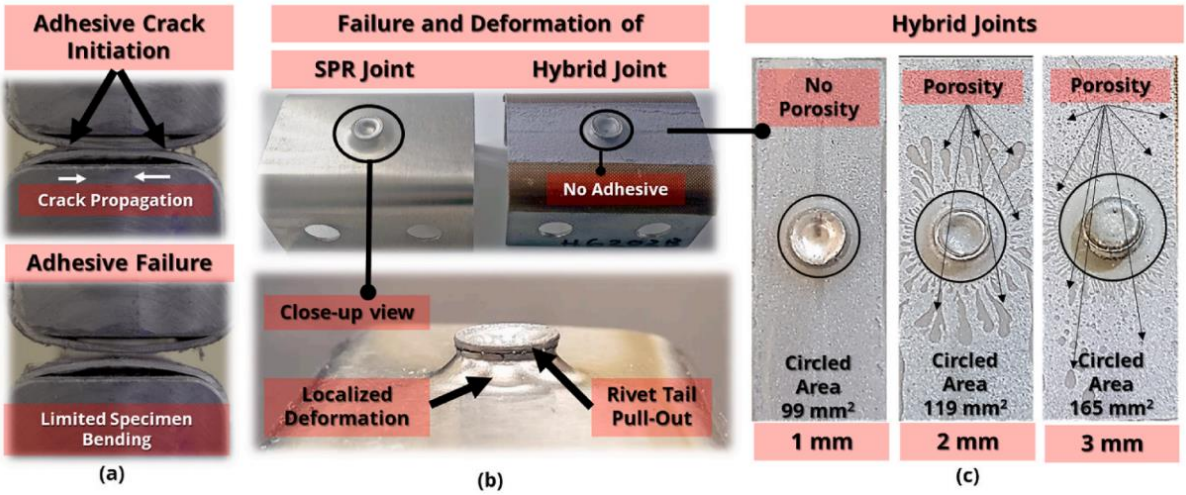


Figur. 36. Modell för testning av H-profil.

Ett limlager på 0,3–0,4 mm applicerades och härdades genom värmebehandling med 80°C under 90 min. SPR-niten som användes var en förzinkad stålnit, som applicerades med tre olika krafter (32, 40, respektive 50 kN). Fogningen utfördes genom att först applicera epoxin och sedan applicerades niten innan epoxin härdades. Mikrostrukturen av respektive fog undersöktes innan testerna.

Hybridfogen uppvisade en tunnare fördelning av epoxi i profilen jämfört med den rena limfogen (runt 25–40% mindre). Mekanisk låsning för SPR-niten var ungefär 37% högre för AA6061 jämfört med AA5052, men eftersom niten applicerade under liknande förhållanden var slutsatsen att skillnaden i djupet berodde på legeringarnas materialegenskaper. Detta betyder att den styvare 6061-legeringen tvingade niten att deformera mer än det omkringliggande materialet.

Den limmade AA6061-fogen klarade högre laster jämfört med SPR- och hybridfogen. Förskjutningen i limfogen innan brott var mindre, vilket berodde på minskade deformationer fram till brottet, jämfört med de övriga två fallen. Hybridfogen hade högst energiabsorptionsförmåga utav de tre, tack vare kombinationen av styrkorna hos epoxin och niten. Påverkan av godstjockleken hos de tre olika kombinationerna av tjocklekar var inte märkbar mellan 1 och 2 mm för samtliga fogtyper. Vid 3 mm var limfogen 20,5% respektive 18,5% starkare än både SPR- och hybridfogen. Porositeten i limmet i hybridfogen var högst vid kombinationen av godstjocklekar på 3 mm, och minst vid 1 mm godstjocklek (se fig. 37). Detta bedömdes vara till följd av monteringen av niten, och att större kraft behövs för monteringen i ett tjockare substrat.



Figur 37. Brottpropagering för testyperna av H-profiler.

Slutsatserna var att högre godtjocklek gav högre hållfasthet för samtliga fogtyper. Samma sak gällde för vilken typ av legering som sammanfogades, med starkaste fogar med AA6061 som var den starkare legeringen. Hybridfogen förlorade dock styrka i limmet vid 3 mm tjocklek på grund av porositeten för båda legeringarna.

3.6 Slutsatser från litteraturstudien

Här sammanfattas genomförda litteraturstudier till brukbar information för grundläggning för projektets metoder som bygger upp hur genomförandet skall gå till väga.

3.6.1 Genomförande och metod för analytiska undersökningar

FEM-analyser kan appliceras väl på samtliga sammanfogningsmetoder som valts för undersökning i detta projekt. För att verifiera att resultaten från FEM-analyser reflekterar verkligheten är det nödvändigt att parallellt jämföra med experimentella resultat. Verifieringen kan utföras i form av exempelvis dragprover, mikrografi, osv. Resultaten som kan vara intressanta att undersöka kan vara mikrostrukturer i materialet, påverkan av värmeutveckling (vid svetsning), materialegenskaper, och mekaniska egenskaper.

3.6.2 Svetsmetoder

Svetsparametrar är styrande för kvalitén hos svetsfogar, och justering behöver därför utföras med hög noggrannhet. Även materialegenskaperna och geometrin för strukturen är avgörande för fogens mekaniska egenskaper. CMT/CMT+P är bättre utvecklad för sammanfogning av dissimilära aluminiumlegeringar jämfört med lasersvetsningen, till följd av den högre värmeutveckling som sker vid lasersvetsning.

3.6.3 Limmade fogar

Limfogens dimensionering, och tjockleken på limmet som appliceras, påverka hur fogens hållfasthet manifesteras. Numeriska undersökningar tenderar att visa på samband mellan ökad tjocklek på det adhesiva lagret och ökad hållfasthet, men så är inte fallet. En limtjocklek på 0,2 mm har använts i ett flertal studier, och denna tjocklek ger bäst hållfasthet om flera tjocklekar jämförs. Ökad kontaktyta vid fogning ger ökad hållfasthet upp till den gräns där substratbrott blir mer troligt än kollaps i det adhesiva lagret, vilket utgör den optimala överlappsarean för en fog. Temperaturökningar påverkar effektiviteten på limmets styrka negativt, och resulterande försvagning i fogen beror på limmets karaktärsdrag. Limfogar har också mycket bättre skjuvhållfasthet än drag- eller fläkstyrka, vilket bör övervägas vid utformning.

3.6.4 Nitade fogar

Nitning är en billig och kostnadseffektiv sammanfogningsmetod, men kräver oftast åtkomst till båda sidor av arbetsstycket. Ett av de mest populära exemplen på dessa i modern industri är självhålande nit (SPR). De har goda hållfasthetsegenskaper men visar mindre lämplighet för spröda metallegeringar, till följd av de interna deformationerna i anhängarna. Orientering av över- och undersida av anhängarna, och respektive tjocklek, spelar en viktig roll för hållfastheten. Om endast en sida av arbetsstycket är tillgänglig finns några modeller av blindnit, men dessa kräver ofta förborrade/stansade hål. Det mest kända exemplet är popnit, vilket uppvisar ungefär dubbelt så hög styrka som SPR-hybridförband.

Dessutom finns enkelsidig självhålande nit (SSPR), som liknar häftstift i utformning, men styrkan för individuella nitar är ungefär hälften så hög som vanlig SPR.

3.6.5 Hybridfogar

Hybridfogar utnyttjar fördelarna hos både nitning och limning. Om limmet har högre hållfasthetsegenskaper än niten är limmets styrka avgörande för styrkan i fogen. Homogeniteten i det adhesiva lagret kan störas av niten, på grund av deformationer runt hålet, och påverka hållfastheten negativt. Effektiviteten för skiktet av det adhesiva materialet är beroende på kraften att applicera niten, eftersom en högre kraft trycker ut limmet runt hålet. Nitens viktigaste funktion vid hybridfogning är därför att hålla förbandet fixerat vid härdning, samt att agera som en stoppkloss vid fläkbrott. Enkelsidig självhålande nit har visat goda egenskaper för denna typ av applikation. Generellt krävs dock mer utrustning för att tillverka produkter med hybridfogning jämfört med ren nitning, eller ren limning, utifrån både tids- och kostnadsaspekter. Därav bör en övervägning göras om en hybridlösning är nödvändig, beroende på utseendet för strukturen på fogen samt hur den kommer belastas vid bruk.

4 Metod & Genomförande

Projektets natur var forskningsorienterat, eftersom krav på analys av olika metoder var ställda från uppdragsgivaren. Detta innebar att praktiska och teoretiska jämförelser mellan valda metoder är högst relevant, utifrån litteraturstudien och kunskapen som ingenjörer inom maskinteknik kan bidra med. Som staterat i syfte och mål (punkt 1.3) så undersöktes CMT och två-komponents epoxi praktiskt med experiment för båda typer, och analytiskt med FEM för limfogen. Avsikten var att få ökad förståelse för fogarnas respektive egenskaper, samt att jämföra hur stor mängd svets som krävs för att uppnå samma hållfasthet för en limfog med samma överlapp.

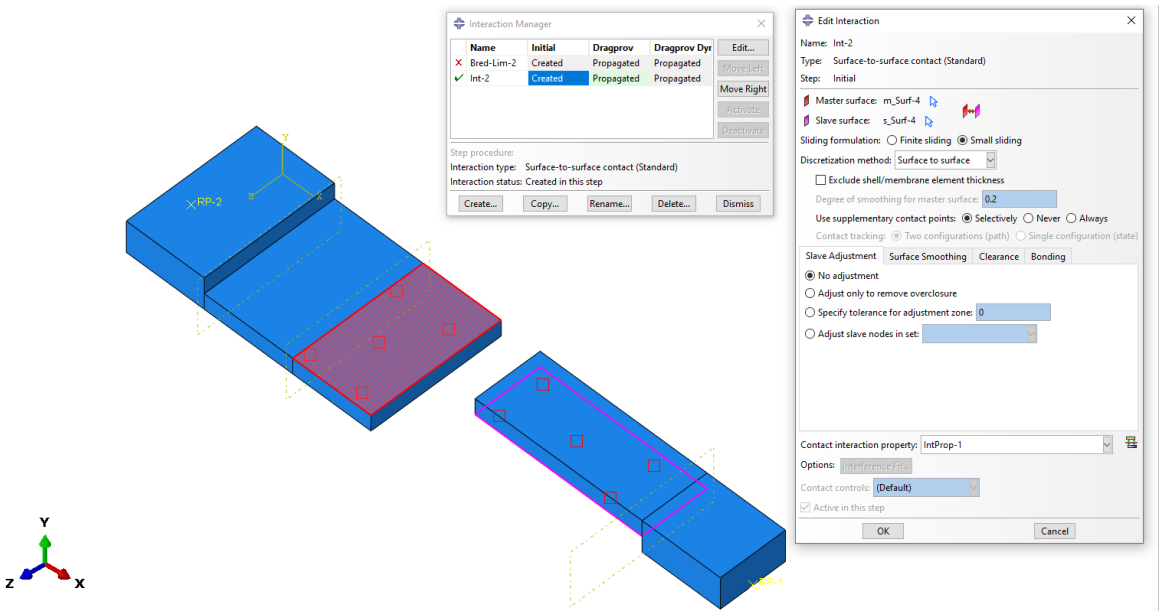
4.1 FE-analys

Olinjär simulering av limfogar designade utefter dragprovs-exemplar skedde i ABAQUS. Intresseområdet för simuleringen bestämdes av ren Modus II-belastning av designen. Modellering av adhesiva lager krävde applikationen av kohesiva element för att modellera beteendet för materialet, i bi-linjär modelleringsmetod. Modellen konstruerades för analys av ett 30 mm överlapp. Modellen kopplades till dragproven och ämnades att användas som en form av verifiering av data.

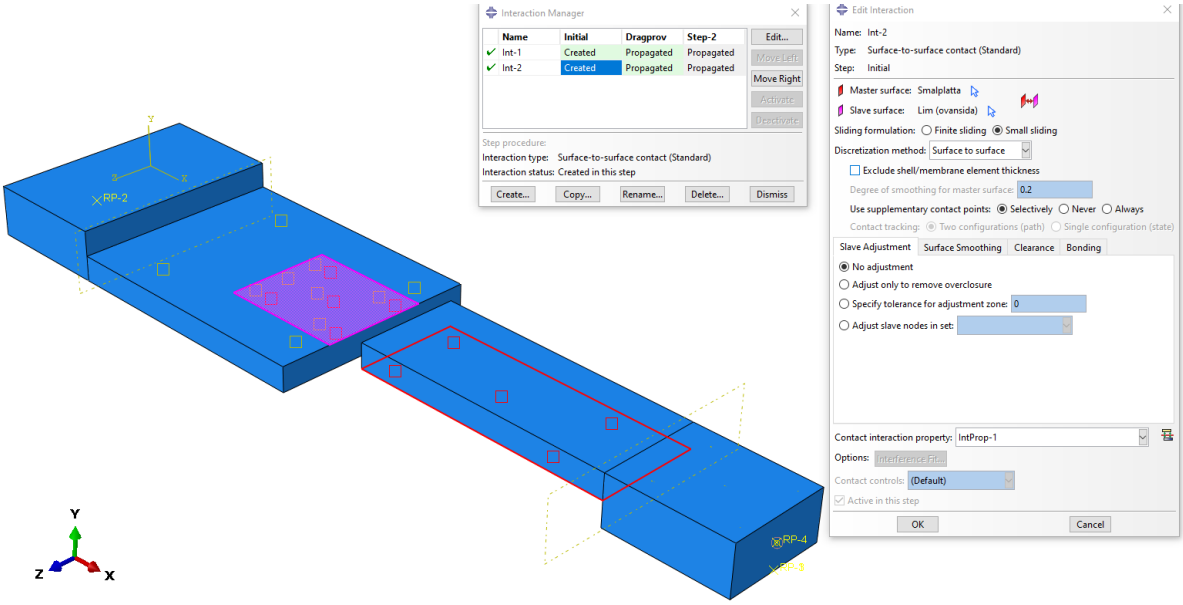
Anhängarna i substratet modellerades utifrån aluminiumlegeringen 5754-H111, med 6 mm tjocklek och samma material i båda plåtar. Den ena anhängaren var 25 mm bred och den andra var 50 mm bred. Dessa materialparametrar användes för både dragproverna och simuleringarna. I den numeriska analysen modellerades parten som 3D-deformable. Materialdata har tagits från Danubia METALS för rätt legering samt behandling. Legeringen har densitet ρ = 2700 kg/m^3, E-modul E = 70GPa, Poissons tal υ = 0.30, sträckgräns σ_y = 80 MPa, brottgräns $\sigma_{s\,min}$ = 190 MPa, $\sigma_{s\,max}$= 240 MPa då brott sker vid en plastisk töjning på 18%.

Dragproverna modellerades på olika tillvägagångssätt för att kringgå multituden av problem som kunde uppstå. Dessa innefattade exempelvis element som upplevde överstigande deformationer vid komplexa kalkyleringar. Den första modellen modellerade limmet enbart som en interaktion mellan plåtarna och då applicerades materialdatan via kriterierna för interaktionen (se fig. 38). En modell genomfördes sedan med lim modellerat med kohesiva element, och materialdatan applicerades via en sektion på limmet (se fig. 39).

Konvergensanalys av solida element genomfördes för att bestämma mesh-storleken, och kohesiva element ansattes till enklare mesh på grund av komplexiteten av simuleringen.



Figur 38. Modell 1; ren interaktionmodellering av kohesivt lager (ingen instans för limmet appliceras).



Figur 39. Modell 3:s instansmodellering av kohesivt lager (Den lila ytan representerar liminstansen).

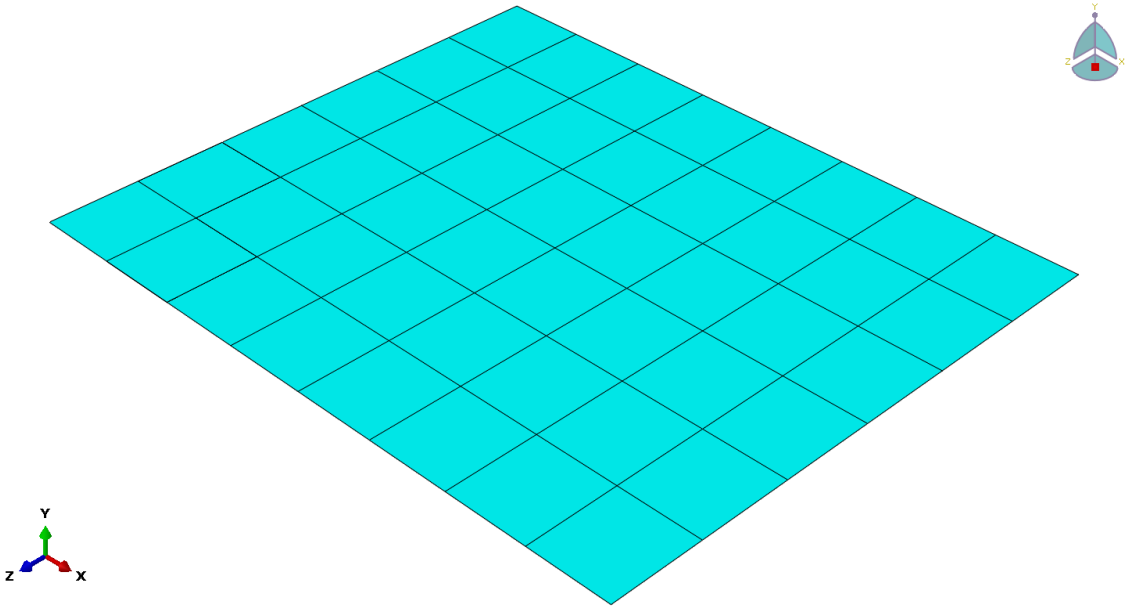
4.1.1 Hysol 9492 (Lim)

Denna typ av tvåkomponents-epoxi är ett strukturellt lim som appliceras för bilindustrin både för stål och aluminium. Andersson Lassila & Folcke (2018) har studerat strukturell epoxi, baserat på tidigare forskning, och formulerat materialdata som kom till användning vid modelleringen. Modellen av limmet baserades på kohesiva element, typ av analys för elementen bestämdes vara nodala vilket innebar att limmets verkliga tjocklek applicerades i modellen. Modellen baserades på bilinjär teori för kohesiva element. Elementtypen som applicerades var 3D kohesiva element med åtta noder i vartdera elementet, med namngivelsen COH3D8 (se fig. 40). För modellering med ren kontakt-interaktion (Modell 1) applicerades materialdata inom den kohesiva interaktionens materialparametrar. Materialegenskaperna

togs från experimentella data som applicerats i tidigare projekt på högskolan i Skövde, och endast data relevant för modus II applicerades (se tabell 2):

Tabell 2. Adapterade materialparametrar för Hysol 9492 för lagertjocklek på 0,2 mm (Andersson Lassila & Folcke, 2018).

Bi-linear model		General material properties
Mode I	Mode II	E = 981 MPa ν = 0.42 ρ = 1120 kg/m^3
σ_0 = 40 MPa	τ_0 =24 MPa	
J_{Ic} = 1100 J/m^2	J_{IIc} =7900 J/m^2	
w_0 = 3 μm	v_0 =14 μm	
w_c = 55 μm	v_c = 664 μm	
K_I = 12.5 MPa/ μm	K_{II} = 1.7 MPa/ μm	



Figur 40. Modell 3:s mesh av COH3D8-element för instansmodellering av kohesivt lager.

4.2 Dragprovning

Utifrån uppdragsbeskrivningen bedömdes det vara relevant att göra en praktisk jämförelse, och en möjlighet fanns att jämföra styrkan hos en CMT+P-fog med valfri sammanfogningsmetod. Limning verkade som det mest lättillgängliga alternativet, och provbitar utformades i samverkan med Aurobay för jämförelse med limfogen. Limfogen studerades både i ABAQUS och experimentellt. Maskinen som användes var en Instron 8802, kapabel till belastning med ±100 kN.

4.2.1 ASTM D1002-10 (Utformning av limmad överlappsfog)

Dragproverna utformades med avsikt att undersöka skjuvstyrkan i limmet. ASTM-standarder valdes utifrån praxis inom forskarvärlden. För denna typ av prov valdes ASTM D1002 (ASTM International, 2019). Målet med användandet av standardiserad testning är att öka verkningsgraden av pålitligheten hos dragproverna. Standardiserad dragprovning av limfogar och svetsfogar utförs dock på förband av olika natur, med stumfogar för svetsning och överlappsfogar för lim. Utformningen behövde därför anpassas för att möjliggöra sammanfogning med både lim och svetsning för en given geometri. Därför togs beslut att avvika från standarden, till fördel för att provexemplaren ska vara så geometriskt likvärdiga som möjligt, och försöka imitera ett verkligt scenario. Bestämmelse av måtten för längden på provexemplaren gjordes med hjälp av standarden, men bredden ökades från 25 till 50 mm på en av anhängarna. Detta gjordes för att möjliggöra helsvetsning av överlappsfogen runt den smalare anhängaren.

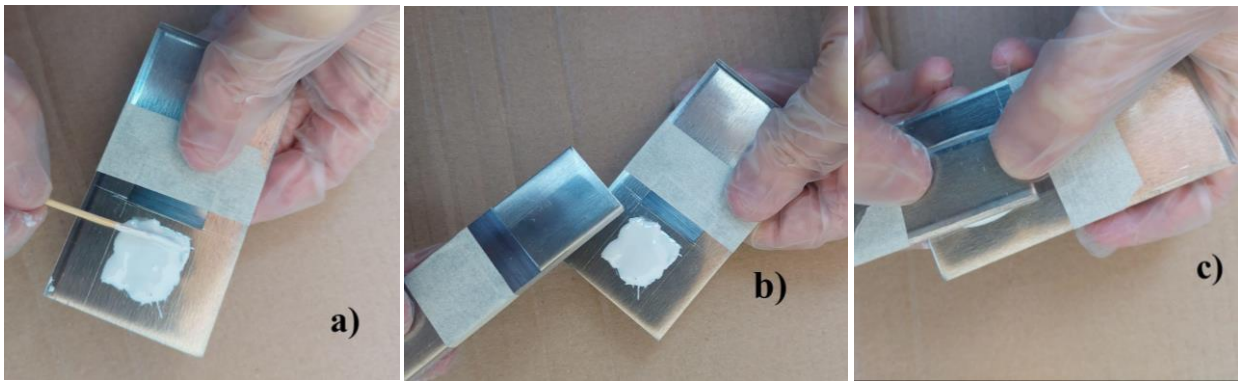
4.2.2 ASTM D2651-01 (Förberedning av limmade ytor)

För adhesiv sammanfogning av metaller krävs åtgärder för att ytan ska hålla en viss standard vid testning. Detta involverar någon form av rengöring, med avsikt att avlägsna svaga gränsskikt för bättre fästning. ASTM D2651-10 (ASTM International, 2016) beskriver hur ytan på aluminiumet skall beredas och hur processen går till (Sektion 7). Loctite 7063 valdes godtyckligt som avfettningsmedel för rengöring av ytorna, eftersom denna typ av rengöring är vanligast förekommande (Enbesajjad & Landrock, 2008), och bedömdes utgöra en god kombination av verkningsgrad och tillgänglighet.

4.2.3 Substrat

Kollapskraften beräknades för en aluminiumplåt av 5754-H111, med tvärsnitt 25 x 6 mm, med hjälp av brottgränsen. Kraften motsvarade 36,6 kN (max) och 29 kN (min). Utifrån materialdata på limmet bestämdes arean för limfogen, med avsikt att undvika att passera max tillåten last för den smala anhängaren, där brott kommer att ske om fogen håller.

Överlappet för limfogen varierades med 30 mm, 35 mm och 40 mm. För varje kategori sammanfogades 10 exemplar. För svetsfogarna varierades överlappet med 30 mm och 35 mm, med 10 exemplar i varje kategori. Godtyckligt valdes helsvetsning runt överlappet för respektive överlapp. För de limmade exemplaren avfettades aluminiumbitarna med Loctite 7063, varpå skims med 0,2 mm tjocklek fixerades vid varje bit. Detta utfördes för att kontrollera tjockleken på limmet till 0,2 mm. Epoxin blandades därefter, och applicerades över en markerad yta på den breda anhängaren. Sedan positionerades den smala anhängaren (se fig. 41), och bitarna fixerades med klämmor. De härdade sedan i rumstemperatur i ungefär 40 timmar innan dragprovet utfördes.



Figur 41. a)-c) Applicering och positionering av epoxi, innan fixering och härdning av fog.

4.3 Dragprovsdata

Data sparades från de genomförda dragprover som dragprovsmaskinen registrerade, och överfördes sedan till excel för analys. Sammanställning av medelkrafter och standardavvikelser gjordes efter analysering av proverna, samt trender.

5 Analys och Resultat

5.1 Sammanställning av sammanfogningsmetoder

Inför jämförelsen av metoderna kommer en sammanställning presenteras, där metodernas fördelar och nackdelar sammanfattas (se tabell 3).

Tabell 3. Sammanställning av fördelar/nackdelar för sammanfogningsmetoder

Metod och referenser	Fördelar (+) och nackdelar (-)
CMT 13, 19, 21, 41, 49, 65, 67, 68.	+ Foga dissimilära material/legeringar. + Mindre värmepåverkan än vanlig MIG/MAG. + Fogarna är tåliga mot temperatur/väder. + CMT Puls finns för sammanfogning av tjockare material. - Oxidbildning, bildar UV-ljus, bullrigt. - Värmepåverkan på material. - Deformationer uppstår i material. - Försvårar återvinning vid dissimilär sammanfogning.
Lasersvetsning 7, 9, 11, 27, 39, 43, 44, 58, 63, 71.	+ Liten zon av värmepåverkan. + Fogar är tåliga mot temperatur/väder. + Hög sammanfogningshastighet + Hög precision. - Mindre lämplig för dissimilär. sammanfogning. - Mindre lämplig för tjockare material. - Ej lämpligt för material med hög reflexivitet.
SPR 3, 14, 20, 23, 29, 31, 47, 48, 49, 60, 61.	+ Ingen värmepåverkan på material. + Foga dissimilära material. + Mycket hög renlighet. + Ingen materialberedning krävs. - Kräver åtkomst till båda sidor av substrat. - Risk för spaltkorrosion runt nit. - Försvårar återvinning till viss del. - Mindre lämplig för spröda material.
Popnit 11, 47.	+ Ingen värmepåverkan. + Foga dissimilära material. + Mycket hög renlighet. + Kräver endast åtkomst till en sida av substratet. - Kräver beredning av hål. - Skapar utbuktning på undersidan. - Försvårar återvinning till viss del.
Enkomponents-epoxi 8, 10, 11, 15, 17, 26, 57, 59.	+ God absorption av vibrationer/krafter. + Foga dissimilära material. + Hög livslängd på lim. + Härdar snabbare än tvåkomponents-epoxi. - Kräver värmebehandling för härdning. - Kräver förbehandling av material. - Känsligt för miljö/temperatur.

	- Krav på utformning för att nyttja hållfasthetsegenskaper. - Miljöfarliga/hälsofarliga kemikalier. - Försvårar återvinning.
Tvåkomponents-epoxi Referenser: 1, 8, 10, 11, 17, 26, 54, 59.	+ God absorption av vibrationer/krafter. + Foga dissimilära material. + Härdar i rumstemperatur (24 - 48h). + Ingen värmepåverkan på material vid härdning i rumstemperatur. - Känsligt för miljö/temperatur. - Krav på utformning för att nyttja hållfasthetsegenskaper. - Miljöfarliga/hälsofarliga kemikalier. - Kräver förbehandling av material. - Försvårar återvinning.
Hybridfogning (epoxi och nit) 23, 24, 30, 31, 48, 51, 56.	+ Ingen värmepåverkan på material (endast för 2-komponentepoxi). + Mångsidiga mekaniska egenskaper med hög hållfasthet. + Foga dissimilära material. - Fler delprocesser krävs. - Ökar cykeltiden jämfört med endast lim/nit. - Samma nackdelar som respektive epoxi och nit. - Försvårar återvinning avsevärt.

5.2 Jämförelse av sammanfogningsmetoder

Utifrån sammanställningen, kombinerat med data från referensramen och litteraturstudien, har en rangordning gjorts i tabell 4 nedan. Medvetenhet finns att vissa nivåer av subjektivitet existerar, eftersom tid och erfarenhet saknas för att pålitligt erhålla några av de relevanta parametrarna. Vissa parametrar är också svåra att jämföra, exempelvis cykeltid för nitning jämfört med sammanfogningshastigheten hos svetsning, eftersom foggeometrin har stor påverkan från fall till fall.

Tabell 4. Rangordning av utvalda metoder.

Betyg	**Hållfasthet**	**Hållbarhet**	**Produktionsaspekter**
Bäst	CMT Svetsning	SPR	Lasersvetsning
	Hybridfogning	Popnit	CMT Svetsning
	Lasersvetsning	Laser	SPR
	Popnit	CMT Svetsning	Popnit
	2-Komp. Epoxi	1-Komp. Epoxi	1-Komp. Epoxi
	1-Komp. Epoxi	2-Komp. Epoxi	2-Komp. Epoxi
Sämst	SPR	Hybridfogning	Hybridfogning

Ur hållfasthetssynpunkt är de fysiska sammanfogningsmetoderna högt rangordnade, eftersom homogena förband ofta gör att materialet som sammanfogas blir den svaga länken. Detta är optimalt i samtliga fall, eftersom den totala hållfastheten huvudsakligen kan styras med materialvalet, utan att behöva ta avsevärd hänsyn till sammanfogningsmetoden. Värmepåverkan som de fysiska sammanfogningsmetoderna medför leder dock till förändringar i materialstrukturen, vilket minskar flexibiliteten i materialet. Detta kan orsaka spröda brott runt fogarna, eller sprickbildning i fogarna vid cyklisk belastning eller vibrationer. Dessa strukturförändringar undviks helt med hybridfogning, och metoden placeras högt upp på denna del av listan. Limmets förmåga att ta upp skjuvspänningar och vibrationer kompletteras av nitens draghållfasthet, och niten motverkar delaminering i fogen. Dissimilära material kan även sammanfogas med lätthet, vilket kan nyttjas för att skapa höghållfasta fogar. Limmet förlorar dock hållfasthet vid höga temperaturer, och har ofta olika nivåer av miljökänslighet vid långsiktigt bruk. Enligt litteraturstudien har epoxi oftast högre hållfasthet än SPR, och popnit har jämförbar styrka med epoxi, men högre draghållfasthet.

Ur hållbarhetsperspektiv är nitning den renaste och mest energieffektiva metoden. Metoderna kan både utföras manuellt och automatiseras, samt anpassas för god ergonomi med minimal påverkan på arbetsmiljön. SPR kräver ingen speciell förberedelse av material, jämfört med popnit som kräver hål för montering. Inget spill bildas därför vid användning av SPR, vilket med de övriga punkterna gör att den hamnar högst upp på listan. Permanenta mekaniska förband medför vissa problem med underhåll, samt demontering vid slutet av livscykeln om dissimilära material sammanfogas. Svetsning medför större negativ påverkan på arbetsmiljö, vilket kräver implementering av säkerhetsutrustning som exempelvis utsug, och speciell avskärmning mot UV-ljus eller buller. Vid slutet av livscykeln kan oftast svetsade produkter skrotas i ett stycke, vilket förenklar återvinning. Limning och hybridfogning medför problem med kemikaliehantering, samt avsevärt försvårad separation inför återvinning vid slutet av livscykeln, vilket gör att de hamnar längst ner i denna kategori.

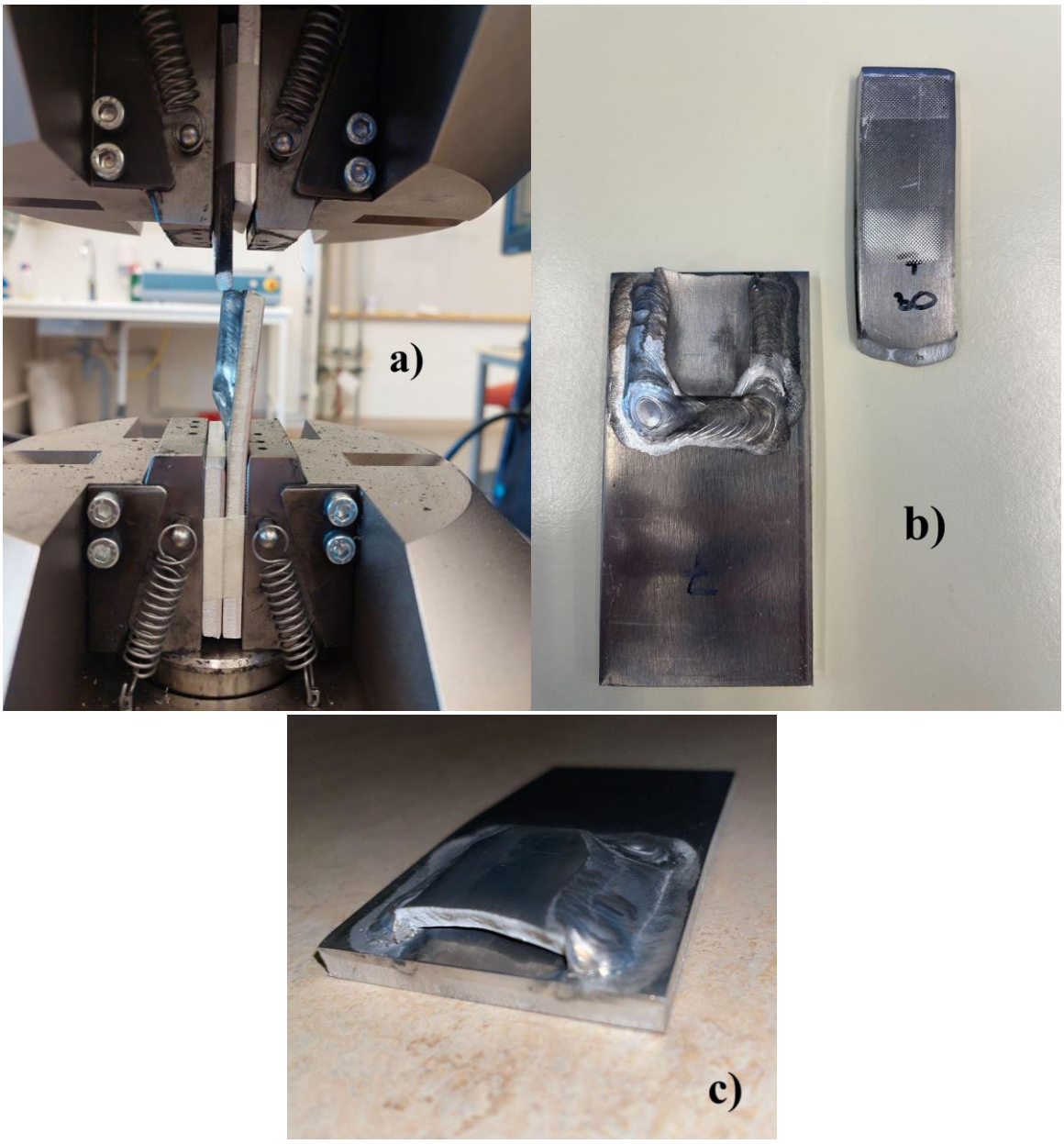
Produktionsaspekter som övervägts är bland annat sammanfogningshastigheter, som exempelvis uppskattning av cykeltider, geometriska begränsningar som finns hos metoden, och antal delprocesser som krävs för sammanfogning. Den högsta produktionshastigheten återfinns hos lasersvetsning, med upp till 80 meter per minut i svetshastighet. Med fleraxliga lasersvetsar fås även hög flexibilitet. Svetsning överlag är en flexibel och förhållandevis snabb sammanfogningsmetod, som ofta möjliggör sammanfogning med en enda delprocess. Förberedning av material är dock ofta nödvändigt, och svetsoxiderna som bildas på materialet behöver ibland avlägsnas efter sammanfogning. SPR har därefter den lägsta cykeltiden, med 1–4 sekunder per nit. Substratet kräver ingen förbehandling och ingen efterbehandling, men applikationen är begränsad på grund av att åtkomst krävs till båda sidor av substratet. Popniten får marginellt lägre betyg på grund av att förborrade hål krävs, och en automatisk lösning som både borrar hål och nitar ökar cykeltiden med några sekunder. Trots detta är popniten är mer flexibel ur ett produktionsperspektiv, eftersom inga större geometriska begränsningar finns och blindnitning är möjligt. Limning placerar långt ner på listan, med krav på förberedning av material (varierande omfattning) och torktider som varierar från enstaka timmar till ett par dygn. För de kortare torktiderna krävs ofta värmebehandling, vilket kräver extra utrustning och mer energi. Flera processer behövs också för applikation av lim och placerande/fixerande/härdande av komponenter, med hybridfogning som den mest komplexa i förhållande till de övriga.

5.3 Dragprov

Beräknad stryka på den smala anhängaren (med tvärsnitt 25 x 6 mm) befanns inom spannet på 29-37 kN, beroende på vilken typ av AA 5754 som testades. Dragning av ett exemplar av endast den smala anhängaren resulterade i brott vid 28 kN, och brottet skedde precis vid den övre infästningen i maskinen. En oväntad egenskap hos dragprovningsmaskinen var att en kompressiv kraft applicerades längs med substratet vid inspänning av provbitarna. Detta resulterade i kompressiva krafter på 2-5 kN, och i kombination med otillräcklig parallellitet gjorde detta att ett fåtal limmade provbitar upplevde brott vid fixering i maskinen.

5.3.1 Svetsfogar

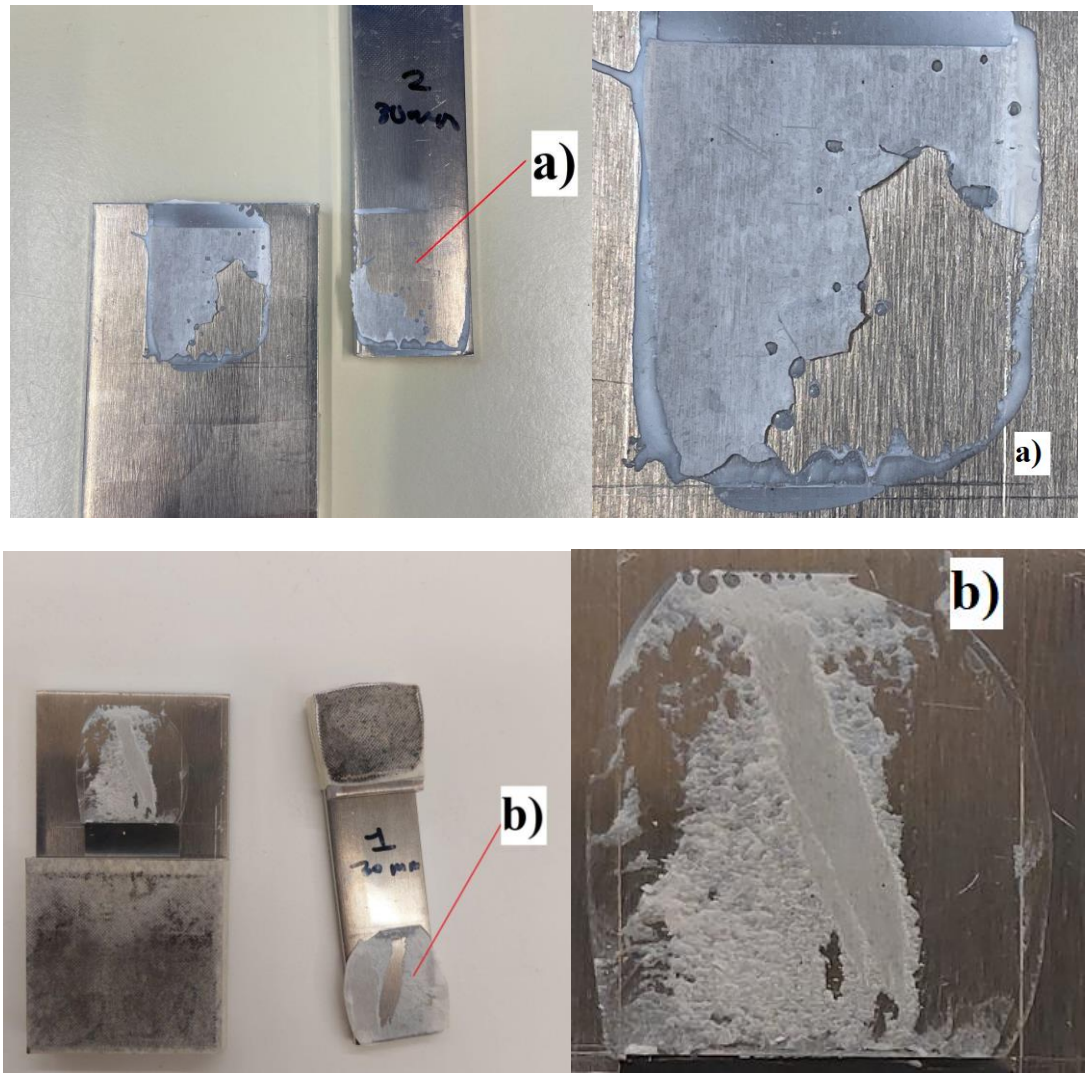
Resultaten för båda överlappslängderna (35 mm och 40 mm) var överväldigande lika i flera aspekter. För samtliga prover blev den kompressiva kraften vid fixering blev mellan 2-4 kN, och vid dragning uppnåddes en maxkraft på mellan 28-30 kN innan kollaps av den smalare aluminiumplåten. Sprickpropageringen inleddes vid gränssnittet mellan svets och anhängare och propagerade i ett vinklat plan, med runt 45 graders vinkel, fram till kollaps. Provbiten genomgick också böjning vid dragning (se figur 42 a-c).



Figur. 42 a)-c) Typiskt brott vid dragprov av svetsfog

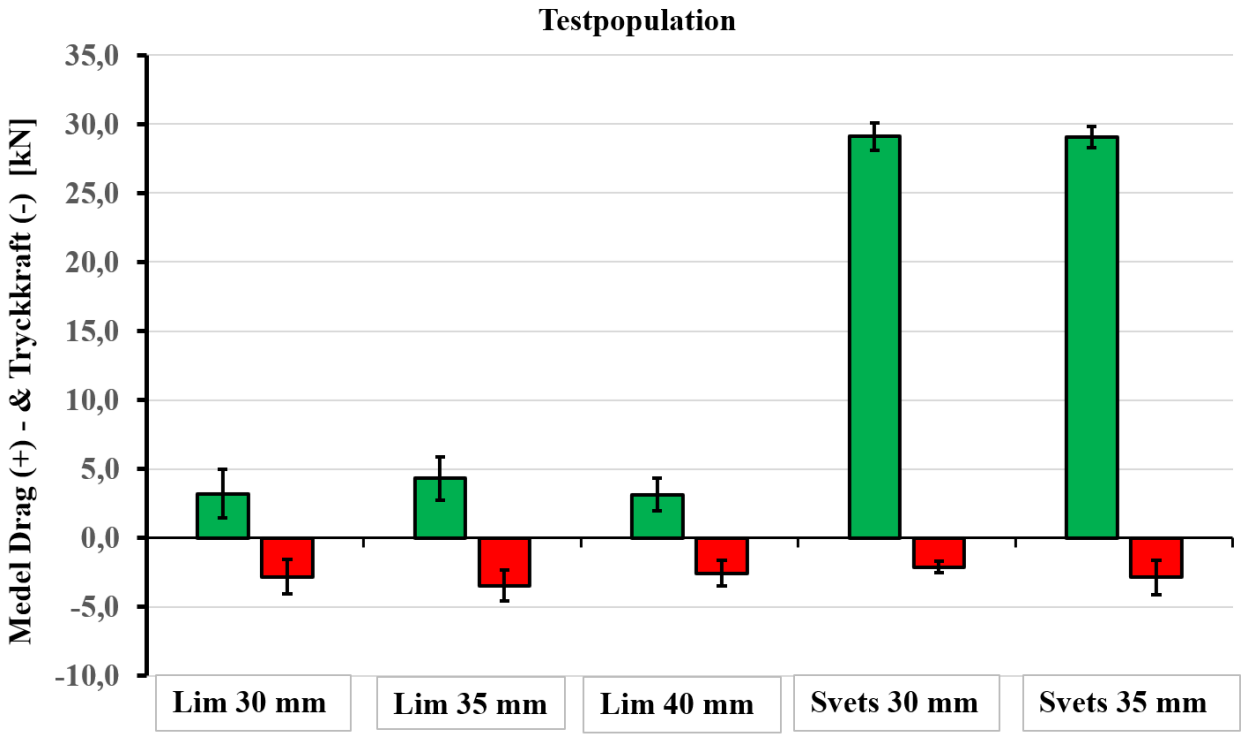
5.3.2 Limfogar

Resultaten för respektive överlapp (30 mm, 35 mm samt 40 mm) var snarlika. Vid montering i maskinen upplevde provbitarna en kompressiv kraft på mellan 3-5 kN innan dragningen påbörjades. Vid inledande av dragning upplevdes krafter på mellan 1-6 kN för samtliga exemplar. Den bristfälliga parallelliteten kombinerat med dragkraften resulterade sedan i fläkbrott, vilket förekom som substratsbrott (brott i svaga gränsskikt mellan lim och anhängare) i majoriteten av fallen (se fig. 43 a). Detta blir särskilt tydligt genom observation av hur de svetsade provexemplaren böjdes under dragning. Vid enstaka dragprov (oavsett överlappslängd) erhölls endast lägre nivåer av kohesiva brott (se fig. 43 b).



Figur 43. ***a)*** *Dragprov av 30 mm överlapp med endast substratsbrott.* ***b)*** *Dragprov av 30 mm överlapp med större områden av kohesivt brott.*

5.3.3 Sammanställning av belastningsvärden



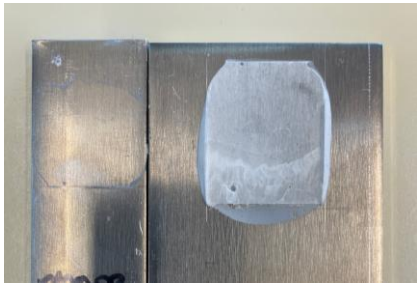
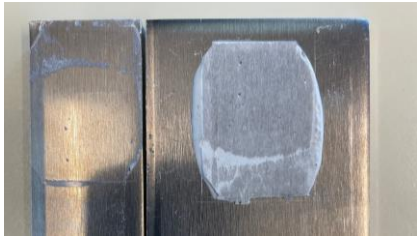
Figur 44. Sammanställande graf av medelvärden av dragkraft (gröna staplar) och tryckkraft (röda staplar) med respektive standardavvikelse för vardera fogvariant.

Det högsta medelvärdet av både dragkrafter och tryckkrafter som limfogarna genomgick observerades hos fogarna med 35 mm överlapp (se fig. 44). Fogarna med 30 mm överlapp upplevde en högre medelkraft än överlappet på 40 mm, till följd av de faktorer som nämnts i tidigare punkt. Enligt standardavvikelsen kan dock ingen skillnad påvisas mellan överlappen för respektive sammanfogningsmetod.

5.3.4 Analys av brottytor

I tabell 5 nedan sammanställs typiska brottytor för respektive fogtyp och överlapp.

Tabell 5. Sammanställning av typiska karaktärsdrag av brott för respektive fogtyp och överlapp.

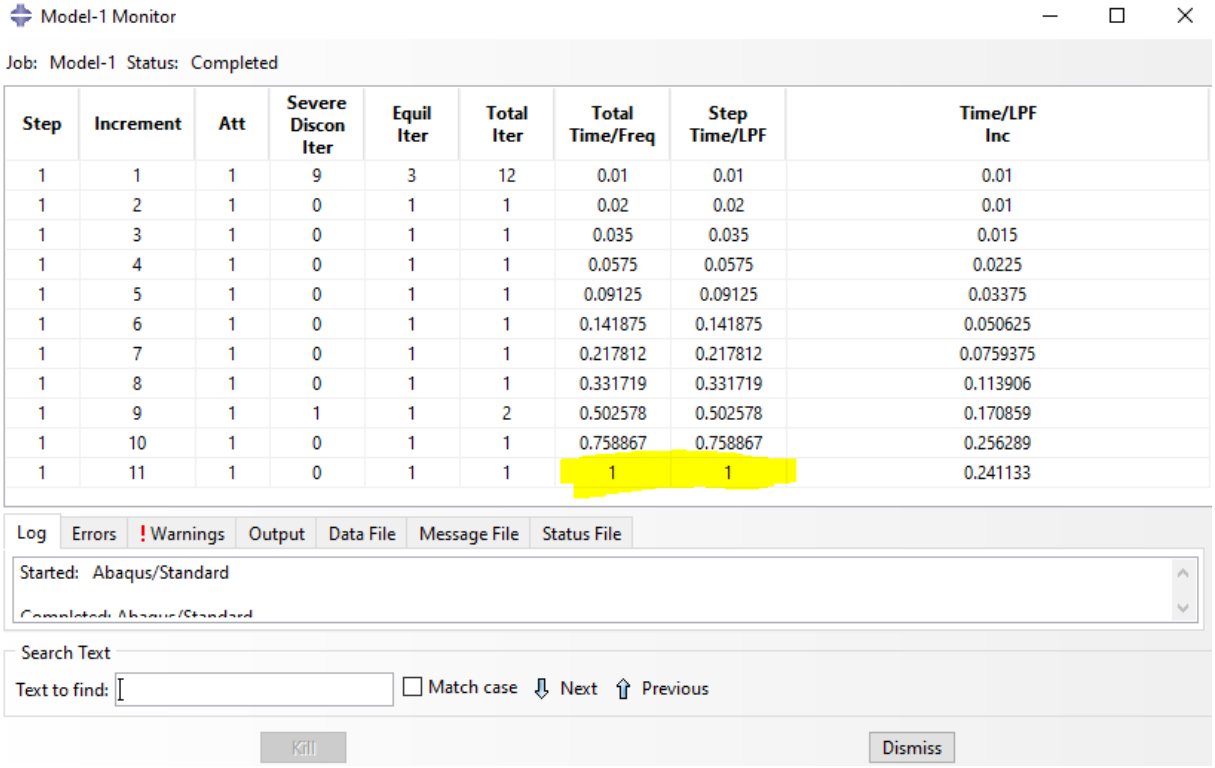
Fogtyp	Krafter	Kommentar	Bild av typisk brottyta
CMT Svets 30mm	Max drag: 30,6 kN Max tryck: 2,9 kN	Kollapskraft, läge och utseende på brottet är nästan identiska på samtliga bitar.	
CMT Svets 35mm	Max drag: 30,5 kN Max tryck: 5,5 kN	Minimala skillnader i beteende från tidigare överlappslängd.	
Lim 30mm	Max drag: 6,2 kN Max tryck: 4,6 kN	Kohesivt brott, på ungefär 20% av den limmade ytan, observerades på en enda bit. Substratsbrott dominerade. Släpp skedde delvis på 2 av bitarna, och släpp från den smala anhängaren var vanligast.	
Lim 35mm	Max drag: 5,5 kN Max tryck: 4,6 kN	Inget kohesivt brott kunde observeras, men på 4 bitar skedde släpp delvis från båda sidor. Den smala sidan upplevde dock mest släpp.	
Lim 40mm	Max drag: 4,3 kN Max tryck: 3,9 kN	Samma antal släpp från både smala och breda plåten. Kohesivt brott observerades endast på mycket små områden på 3 av 10 bitar. Substratsbrott dominerade.	

5.4 Modellering

Totalt prövades 4 modeller. Vardera inkluderade en typ av modellering av kohesiva sammanfogningar. Enbart modell 1 och 3 bedömdes vara relevanta att presentera i rapporten, därav modellnumreringen.

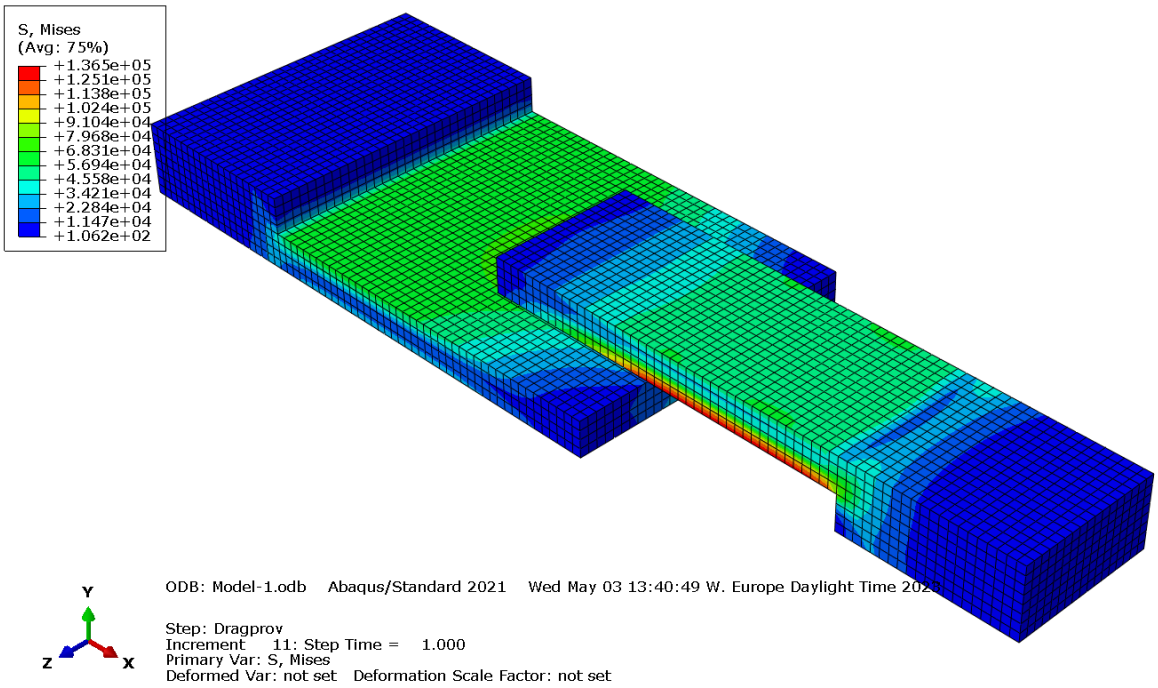
5.4.2 Modell 1

Med enbart kontakt-interaktion simplifieras modellen med avseende på beräkningstiden. Hela simuleringen beräknades på 2 minuter och kunde genomföras för hela Step-intervallet (se fig. 45). Resultatet medförde en realistisk effektivspänningsfördelning, samt den mest rimliga magnituden på Von Mises-spänningarna (se fig. 46).



Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	9	3	12	0.01	0.01	0.01
1	2	1	0	1	1	0.02	0.02	0.01
1	3	1	0	1	1	0.035	0.035	0.015
1	4	1	0	1	1	0.0575	0.0575	0.0225
1	5	1	0	1	1	0.09125	0.09125	0.03375
1	6	1	0	1	1	0.141875	0.141875	0.050625
1	7	1	0	1	1	0.217812	0.217812	0.0759375
1	8	1	0	1	1	0.331719	0.331719	0.113906
1	9	1	1	1	2	0.502578	0.502578	0.170859
1	10	1	0	1	1	0.758867	0.758867	0.256289
1	11	1	0	1	1	1	1	0.241133

Figur 45. Monitor-skärmen för modell 1. Hela simuleringen genomfördes (Step har nått tidslängd 1.00 av 1.00)



Figur 46. Von Mises-spänning för modell 1.

5.4.2 Modell 3

Med kohesiva element så ökade komplexiteten för modellen med avseende på beräkningstiden. Hela simuleringen beräknades på 1 timme och kunde inte genomföras för hela Step-intervallet (se fig. 47). Resultatet medförde en relativt realistisk effektivspänningsfördelning på lim-instansen (se fig. 48) men inte på hela dragprovsmodellen. Utifrån litteraturstudien bedömdes magnituden på Von Mises-spänningarna vara orimliga (se fig. 49).

Model-3 Monitor

Job: Model-3 Status: Aborted

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	267	6U	6	0	6	0.0306154	0.0306154	1.30708e-13
1	267	7U	4	0	4	0.0306154	0.0306154	3.2677e-14
1	267	8U	15	0	15	0.0306154	0.0306154	8.16925e-15
1	267	9U	24	0	24	0.0306154	0.0306154	2.04231e-15
1	267	10U	9	0	9	0.0306154	0.0306154	5.10578e-16
1	267	11U	5	0	5	0.0306154	0.0306154	1.27644e-16
1	267	12U	19	0	19	0.0306154	0.0306154	3.19111e-17
1	267	13U	6	0	6	0.0306154	0.0306154	7.97778e-18
1	267	14U	8	0	8	0.0306154	0.0306154	1.99444e-18
1	267	15U	8	0	8	0.0306154	0.0306154	4.98611e-19
1	267	16U	5	0	5	0.0306154	0.0306154	1.24653e-19
1	267	17U	10	0	10	0.0306154	0.0306154	3.11632e-20
1	267	18U	5	0	5	0.0306154	0.0306154	1e-20

Log | ! Errors | ! Warnings | Output | Data File | Message File | Status File

Time increment required is less than the minimum specified

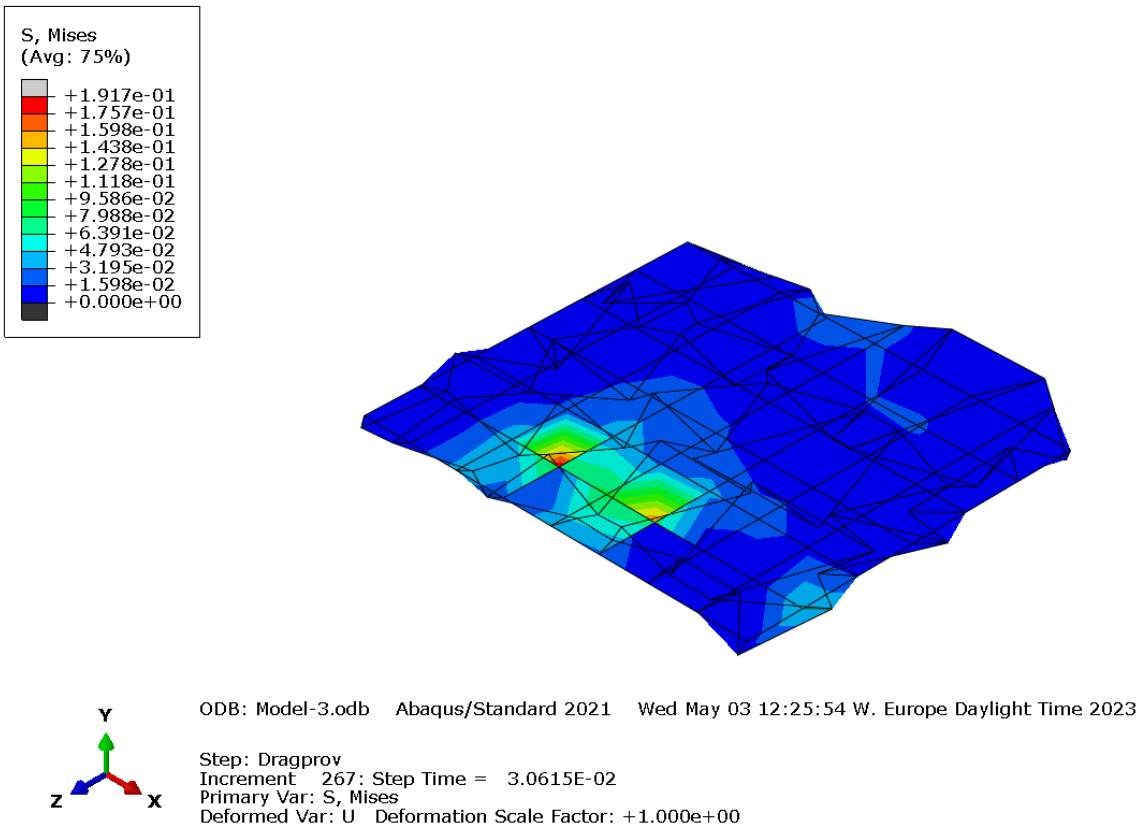
The analysis has been terminated due to previous errors. All output requests have been written for the last converged increment.

Search Text

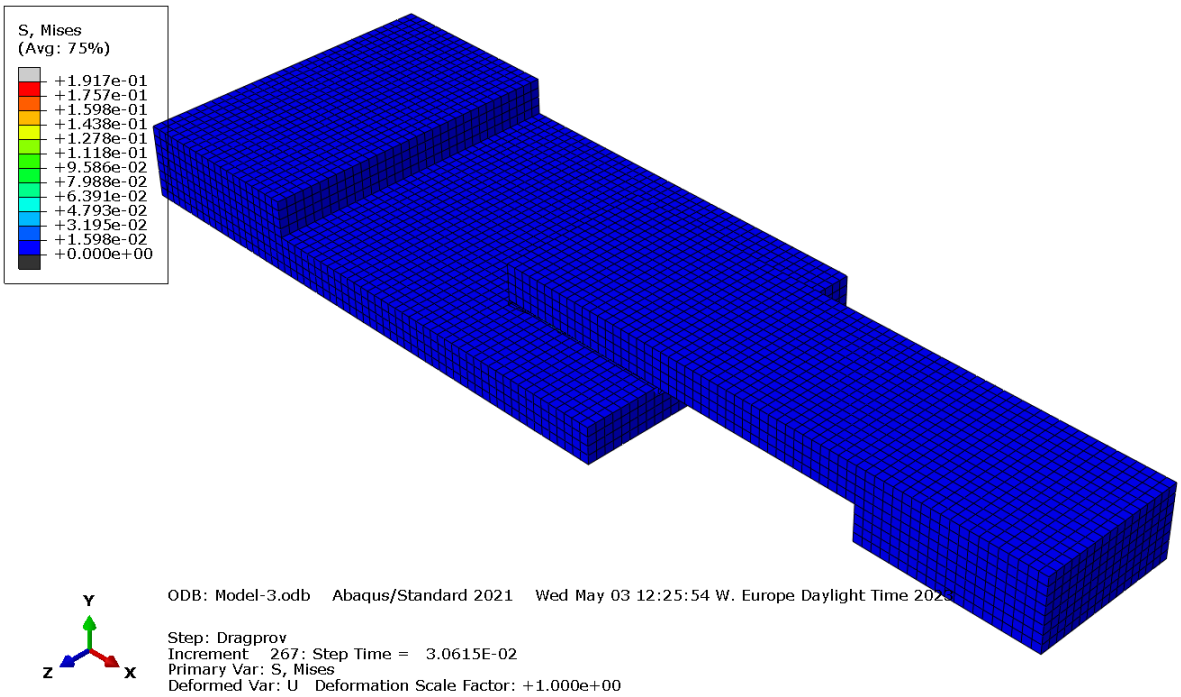
Text to find: Match case Next Previous

Kill Dismiss

Figur 47. Monitor-skärmen för modell 3. Simuleringen avbröts på grund av för liten inkrementstorlek (Step har nått ungefär 0.03 av 1.00)



Figur 48. Von Mises-spänning i det kohesiva lagret för modell 3.



Figur 49. Von Mises-spänning i det kohesiva lagret för modell 3.

6 Diskussion

6.1 Avgränsningar i metodval & material

Eftersom arbetet har varit kopplat till en produkt i ett utvecklingsstadium har fokus lagt på att utvärdera metoder ur ett generellt perspektiv, enligt punkt 1.4 samt 2.3. De metoder som valdes för analys bedömdes utgöra ett representativt urval från de tre huvudkategorier av sammanfogningsmetoder som projektet har fokuserat på (Kapitel 2.1), kombinerat med tillgänglighet och kompatibilitet med de preliminära ritningarna över referensprodukten. Vid inledande av informationssökningen bedömde vi tidigt att det fanns mycket information om respektive sammanfogningsmetod, vilket också involverade underkategorier. Beslut togs gällande avgränsningar om fördjupningsområdena, och detta resulterade i vad som togs upp i helheten av kapitel 2 samt kapitel 3. Avgränsningarna och beslut hur inkludering/exkludering av punkter påverkade projektets omfång, storlek och innehåll i relation med kursmål, samt hur bidragande kunskap skulle relatera till industrin överlag.

6.2 Dragprover & Standarder

Motivationen att utgå ifrån standarden för dragprovning var en viktig utgångspunkt för oss då vi trodde att pålitliga resultat skulle kunna erhållas vid jämförelse av styrkan. Eftersom svetsfogar och limfogar dragprovas på olika sätt konstaterades att det skulle bli svårt att jämföra metoderna helt enligt standard. I genomförandet (kapitel 4, och mer ingående i punkt 4.2) gjordes motivationen att avvika från limfogens standard, samt att applicera denna på svetsfogen, för att kunna konstruera en fog som skulle ge en rättvis jämförelse mellan de två typerna med en likvärdig geometri. Utifrån litteraturstudien angående undersökta metoder (Kapitel 3) så var det tydligt att det vanligtvis inte sker utredningar av denna karaktär mellan sammanfogningskategorier.

Sammanfogandet av de svetsade dragproven som presenteras i punkt 5.3.1, utfördes utan fixtur eller färdiga program, vilket betyder att utförandet saknade den typ av kontroll som vanligtvis är nödvändig för projekt av denna natur. En teoretisk uppskattning av hållfastheten för svetsfogen hade också varit lämplig inför dimensionering av svetsen, eftersom helsvetsning godtyckligt valdes (punkt 4.2.3). En heldragen svets av denna karaktär är inte optimal utifrån ett produktions- och kostnadsperspektiv, eftersom styrkan i fogen överskrider materialets brottgräns i överdriven utsträckning. Som konstaterat i punkt 5.3.3 uppvisade de svetsade proverna likvärdiga egenskaper, med minimal variation. Samtliga provbitar upplevde dessutom brott på samma ställe, även där med minimal variation.

Som nämnt i punkt 5.3 applicerade dragprovsmaskinen en tryckande kraft vid fixering av provbitarna i dragprovningsmaskinen, till följd av maskinens fixeringsmekanism. Detta ledde till att vissa bitar upplevde brott vid fixering, och vissa bitar klarade en mycket högre tryckkraft än dragkraft. Teoretiskt sett har varje bit därför upplevt en form av belastningscykel, vilket kan ha påverkat resultaten jämfört med belastning från ett obelastat läge. Vid analys av resultaten av medelvärden för de limmade exemplaren i punkt 5.3.3, som erhölls från dragproverna, kan vi med hjälp av standardavvikelsen påvisa att ökandet av överlapp INTE bidrog till ökad hållfasthet utifrån utförda experiment. Det finns ett flertal parametrar som bidrar till hållfastheten i en fog, oberoende av mängden lim som appliceras.

Vid dragprovningen var det uppenbart att enbart avfetta ytan utan mekanisk rengöring, som exempelvis blästring eller användande av sandpapper, resulterade i brott i svaga gränsskikt. Om detta var på grund av ytfinheten eller oxidbildning är oklart. Eftersom anhängarna inte heller var helt raka, eller parallella

med varandra, så utvecklades böjande moment vid dragprovningen. Ändbitarna som fixerades vid varje provexemplar, för att bitarna skulle fixeras rakt i maskinen, genomgick också viss deformation vid fixering. Nämnda faktorer resulterade i att den planerade belastningen enbart i modus II i stället blev en kombination av modus I & II (blandad modus). Detta orsakade viss fläkbelastning av limfogarna, och brottpropagering inledde tidigare än förväntat. Det gav ett tydligt exempel på hur viktigt det är med ytberedning vid limning, och hur limfogar inte är optimerade för böjande belastning och fläkning, vilket stöds av litteraturen (exempelvis punkt 3.3.3). Därav bör noggranna optimeringar av design utföras för att motverka böjande lastfall, och lämplig ytbehandlingen måste väljas vid applikation i produktion.

6.3 Modellering

Valet av tvåkomponents-epoxi, för genomförandet av både simulering (punkt 4.1 samt 4.1.1) samt dragprovning (punkt 4.2), innefattade många potentiella val av epoxi. För att modellera strukturella lim krävs dock en mängd materialdata som endast kan erhållas vid experimentell undersökning av limmet. Av den anledningen valdes materialdata för Dow Betamate 2098, som är en strukturell tvåkomponents-epoxi. Personal på Högskolan i Skövde kunde bistå med den experimentella data för limmet (tabell 2, punkt 4.1.1), samt bistå med ytterligare hjälp vid olika faser i genomförandet. Efter diskussion experterna på högskolan, som genomfört analyser för materialdata relaterat till Betamate 2098, konstaterades att data för denna epoxi lämpligen kunde ersätta saknade materialdata vid avsaknad.

Limmet som vi valde att tillgå var Hysol 9492, en strukturell tvåkomponents-epoxi som utvärderats i en av artiklarna i litteraturstudien (punkt 3.4.2). Hysol 9492 modellerades både i ABAQUS och användes vid sammanfogning av dragproverna (punkt 4.2.3). Modellering av kontakt-analyser med kohesiva bindningar var utmanande, speciellt när metoden var att applicera kohesiva element i modellen (Modell 3, från kap. 4.1). Korrigering av modellen har behövt göras otaliga gånger på grund av ett flertal olika problem som uppstått. Vid övergång till 3D-analys, eftersom beslut togs att replikera våra egna dragprover, blev utmaningen större. Det är betydligt svårare att skapa en genomförbar modell som ger relativt verklighetstrogna värden, eftersom komplexiteten hos modellen ökar. En ren kontakt-interaktion för 3D-solida element jämfördes också med kohesiva element vid simuleringen (Modell 1, från kap 4.1). Resultaten bedömdes vara närmare verkligheten, men den omfattande spridningen bland värdena hos de två modelleringstyperna indikerade att en verklighetstrogen modell krävde mer tid än vad som fanns att tillgå. Lösningar utforskades för att eftersträva rimliga utfall, men inga definitiva resultat erhölls.

6.4 Hållbarhetsaspekter

Hållbarhetsperspektivet har varit en röd tråd genom hela arbetet, speciellt från den teoretiska referensramen (Kapitel 2.1) och jämförelsen (Punkt 5.1 & 5.2). De mest uppenbart centrala och påtagliga hållbarhetsaspekterna har presenterats, till exempel återvinningsmöjligheter. Den största återkopplingen har gjorts till social hållbarhet, med avseende på säkra arbetsplatser. Dessa punkter har varit exempelvis hälsoriskerna med svetsning, eller exempel på den hälsofarliga karaktären hos epoxilim. Hållbarhetsanalysen hos varje metod skulle kunna kompletteras med ytterligare undersökningar, som exempelvis en livscykelanalys (LCA), för att ge analysen ett större djup. Ofta är miljöförorening eller utsläpp av växthusgaser lokaliserade i dolda stadier av en produkts livscykel, som exempelvis frakt av råmaterial, vilket lättare kan identifieras med en LCA.

7 Slutsats

Den sammanfogningsmetod som Aurobay valt (CMT Puls) är utmärkt för ändamålet, jämfört med de metoder som skulle kunna användas i stället. Att sammanfoga material är ett dock multidimensionellt problem, och svetsning har vissa svagheter ur ett arbetsmiljöperspektiv. Den metod som annars visar bäst kvalitéer ur ett helhetsperspektiv skulle vara nitning, på grund av dess renhet, hållfasthet, lättviktighet, och automatiserbarhet. Ofta riktas fokus direkt mot hållfasthet, men olika sammanfogningsmetoder kan oftast uppnå liknande nivåer av hållfasthet med hjälp av dimensionering och utformning. Faktorer som exempelvis kostnad, cykeltider, säkerhet, eller miljövänlighet kan då bli viktiga vid val av metod. Detta är särskilt aktuellt vid sammanfogning av mjukare material, som exempelvis aluminium. Metodvalet bör därför ske utifrån vilka aspekter av en tillverkningsprocess som är viktigast, eftersom en perfekt lösning sällan existerar utifrån samtliga perspektiv. Expertis inom hållfasthetslära, modellering, bearbetningsteknik, produktionsteknik, och materiallära blir då viktiga verktyg för att kunna ta ett informerat beslut, och bidra till produktionen av produkter som möter kraven från samtliga intressenter.

8 Framtida arbete

Som tidigare konstaterat gav dragproverna oväntade resultat. Sammanfattningsvis skulle ytterligare experiment utföras, med implementation av de erfarenheter som erhölls. Denna typ av jämförelseanalys skulle också kunna utföras mellan andra metoder än de som valdes för detta arbete. Urvalet av undersökta metoder var kraftigt begränsat av tiden, men även av kraven på rapporten. Ett flertal metoder existerar som potentiellt skulle kunna visa lämplighet för applikation, exempelvis friktionssvetsning, och övriga kombinationer av hybridfogning. Dessa valdes bort i begränsningssyfte, eftersom de preliminärt visade mindre lämplighet för den aktuella referensdetaljen. Denna preliminära analys var mycket ytlig, eftersom avgränsningen behövde ske i ett tidigt stadium för att definiera arbetet. Sammanfogningsmetoder som inte avhandlats i denna rapport skulle kunna vara föremål för ytterligare studier i framtiden.

Med avseende på modelleringen var tidskravet för kompetensutveckling avsevärt för att utföra denna typ av modellering. Om modellering av limfogar är ett framtida intresseområde krävs konsultation av experter inom området.

Ett av de satta delmålen i arbetet var att utvärdera metoderna ur kostnadsperspektiv. Detta perspektiv har varit aktuellt genom hela arbetet, men att producera konkreta siffror och uppskanningar lämnas till framtida arbete. Verktyg, robotar, robotceller, ventilation, avskärmning, förbrukningsmaterial osv. kan förändra kostnadsbilden avsevärt från metod till metod.

Referenser

1. A. Andersson Lassila, & M. Folcke, (2018). Numerical and experimental analysis of adhesively bonded T-joints (diva-portal.org)
2. American Cancer Society. (2019, Juli). *Ultraviolet (UV) Radiation*. [Internet]. Hämtad från: https://www.cancer.org/healthy/cancer-causes/radiation-exposure/uv-radiation.html
3. Ang, H. Q. (2021). An overview of self-piercing riveting process with focus on joint failures, corrosion issues and optimisation techniques. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *34*(1), 1-25. Hämtad från: https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-020-00526-3
4. Ashley, K., & Harper, M. Analytical Performance Criteria. (2005). *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2(6), 1545-9624.
5. ASTM International. (2016, December). *ASTM D2651-01, Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding* [Internet]. Hämtad från: https://www.astm.org/d2651-01r16.html
6. ASTM International. (2019, April). *ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)* [Internet]. Hämtad från: https://www.astm.org/d1002-10.html
7. Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I—solid and liquid phase welding. *Journal of materials processing technology*, *99*(1-3), 62-71. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.235
8. Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part II—adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of materials processing technology*, *99*(1-3), 72-79. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00361-1
9. Basile, D., Sesana, R., De Maddis, M., Borella, L., & Russo Spena, P. (2022). Investigation of Strength and Formability of 6016 Aluminum Tailor Welded Blanks. *Metals*, *12*(10), 1593. Hämtad från: https://doi.org/10.3390/met12101593
10. Beevers, A., Steidler, S. M., Durodola, J., & Coackley, M. (2001). Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *Journal of materials processing technology*, *118*(1-3), 95-100. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00895-0
11. Brandon, D. G., & Kaplan, W. D. (1997). Joining processes: an introduction. John Wiley & Sons Inc. ISBN 9780471964889
12. ChemicalSafety. (2016, Juli 16). *ISO 45001 For Workplace safety* [Internet]. Hämtad från: https://chemicalsafety.com/iso-45001-workplace-safety/
13. Chen, X., Wang, X., Huan, P., Hu, Z., Wu, Z., Zhang, B., & Nagaumi, H. (2023). Effect of Cold Metal Transfer Mix Synchro-Pulse Process on the Overall Morphology, Microstructure and Mechanical Properties of Wire+ Arc Additively Manufactured AA2219 Alloy. *Metals and Materials International*, *29*(2), 552-563. Hämtad från: https://doi.org/10.1007/s12540-022-01240-6
14. Chrysanthou, A., & Sun, X. (Eds.). (2014). Self-piercing riveting: properties, processes and applications. Woodhead Publishing. ISBN 9780857098849
15. Cui, J., Wang, S., Wang, S., Chen, S., & Li, G. (2020). Strength and failure analysis of adhesive single-lap joints under shear loading: Effects of surface morphologies and overlap zone parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, *56*, 238-247. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.042

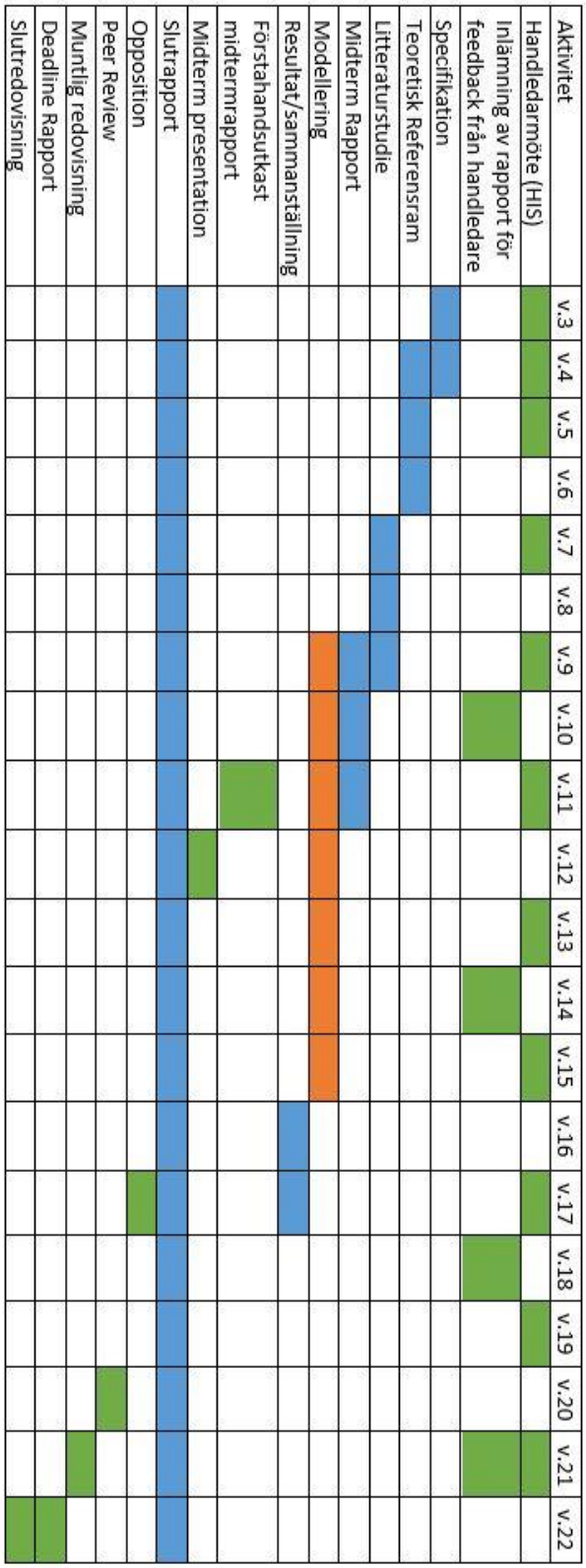
16. da Silva, L. F., das Neves, P. J., Adams, R. D., Wang, A., & Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *29*(3), 331-341. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.007
17. Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2008). Adhesives technology handbook (2nd edition). William Andrew. ISBN 978-0-323-35595-7
18. Elkington, J. (1994). Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California management review*, *36*(2), 90-100. Hämtad: https://doi.org/10.2307/41165746
19. Escribano-García, R., Rodriguez, N., Zubiri, O., Piccini, J., & Setien, I. (2022). 3D numerical simulation of GMAW Cold Metal Transfer using response surface methodology. *Journal of Manufacturing Processes*, *76*, 656-665. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.043
20. Fu, M., & Mallick, P. K. (2003). Fatigue of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 6111. *International journal of fatigue*, *25*(3), 183-189. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00115-9
21. Furukawa, K. (2006). New CMT arc welding process–welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding international*, *20*(6), 440-445. Hämtad från: https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598
22. Galińska, A. (2020). Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part I: Bolted Joining. *Polymers*, *12*(10), 2252. https://doi.org/10.3390/polym12102252 https://www.mdpi.com/2073-4360/12/10/2252
23. Hahn, O., Meschut, G., Bergau, M., & Matzke, M. (2014). Self-pierce riveting and hybrid joining of boron steels in multi-material and multi-sheet joints. *Procedia CIRP*, *18*, 192-196. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.130
24. Haraga, K., Taguchi, K., Yoda, K., & Nakashima, Y. (2003). Assembly technique for control panel enclosures with the combined use of adhesive and rivets and the reduction of energy consumption. *International journal of adhesion and adhesives*, *23*(5), 371-376. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00066-6
25. Harris Jr, C. E., Pritchard, M. S., Rabins, M. J., James, R., & Englehardt, E. (2013). *Engineering ethics: Concepts and cases*. Cengage Learning. (Chapter 2). ISBN: 9781285545882
26. He, X. (2011). A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *31*(4), 248-264.
27. He, Y. et al. (2022). The effect of laser segmented skip welding on welding distortion and residual stress in butt weld of 6061 aluminum alloy thin plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-17. Hämtad från: https://doi-org.libraryproxy.his.se/10.1007/s00170-022-10663-9
28. Henkel (2020) Säkerhetsdatablad enligt förordning (EC) 1907/2006 i den senast giltiga versionen. Hämtad från: https://cdn.abicart.com/shop/17728/art21/184737021-fbf944-loctite_9492.pdf
29. Hoang, N. H., Porcaro, R., Langseth, M., & Hanssen, A. G. (2010). Self-piercing riveting connections using aluminium rivets. *International Journal of Solids and Structures*, *47*(3-4), 427-439. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.10.009
30. Hoang-Ngoc, C. T., & Paroissien, E. (2010). Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *30*(3), 117-129. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2009.12.002

31. Ibrahim, A. H., & Cronin, D. S. (2022). Mechanical testing of adhesive, self-piercing rivet, and hybrid jointed aluminum under tension loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *113*, 103066. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103066
32. International Standardization Organization. (2011, Oktober). *ISO 10882-1:2011,Health and safety in welding and allied processes — Sampling of airborne particles and gases in the operator's breathing zone — Part 1: Sampling of airborne particles* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/43385.html
33. International Standardization Organization. (2016, Augusti). *ISO 15858:2016, UV-C Devices — Safety information — Permissible human exposure* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/55553.html
34. International Standardization Organization. (2016, November). *ISO 20581:2016* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/68455.html
35. International Standardization Organization. (2018, Mars). *ISO 45001:2018* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/63787.html
36. International Standardization Organization. (2020, Februari). *ISO 21904-1:2020, Health and safety in welding and allied processes — Equipment for capture and separation of welding fume — Part 1: General requirements* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/72132.html
37. International Standardization Organization. (2022, September). *ISO 23861:2022* [Internet]. Hämtad från: https://www.iso.org/standard/77190.html
38. Jarfors, A. E., Ghasemi, R., Awe, S., & Jammula, C. K. (2021). Comparison between high-pressure die-cast and rheo-cast aluminium-SICp MMC; wear and friction behaviour. *La Metallurgia Italiana*, (11-12), 13-18.
39. Jeyaprakash, N., Yang, C.-H., & Bhuvanesh Kumar, M. (2021). Laser Machining. Practical Applications of Laser Ablation. Hämtad från: doi: https://doi.org/10.5772/intechopen.93779
40. Kalpakjian, S. and Schmid. S. (2014) Manufacturing Engineering & Technology. 7th Edition, Pearson Publishing Company, Upper Saddle River, New Jersey.
41. Kannan, A. R., Shanmugam, N. S., Palguna, Y., Girinath, B., Lee, W., & Yoon, J. (2023). Effect of double-side welding on the microstructural characteristics and mechanical performance of dissimilar AA6061-AA5052 aluminium alloys. *Materials Letters*, *331*, 133444. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133444
42. Karlsson, N. P. (2019). Business models and business cases for financial sustainability: Insights on corporate sustainability in the Swedish farm-based biogas industry. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 115-129. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.01.005
43. Katayama, S. (2013). Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-85709-264-9
44. Kong, F., Lavoie, J. P., Kleine, K., & Kovacevic, R. (2020). Computational Modeling and Experimental Validations of the HeatTransfer and Residual Stresses in the Aluminum 6061-T6 PlateWelded by an Adjustable Ring Mode (ARM) Laser. *Journal of Light Metal Welding*, *58*(8), 19-25. Hämtad från: https://doi.org/10.11283/jlwa.58.19
45. Lanzerath, D. (2023). Research Ethics and Research Ethics Committees in Europe. In *Medical Research Ethics: Challenges in the 21st Century* (pp. 423-439). Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-031-12692-5

46. LeBacq, C., Brechet, Y., Shercliff, H.R., Jeggy, T. & Salvo, L. (2002). Selection of joining methods in mechanical design. *Materials & Design*, 23(4), 405-416. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00093-0
47. Li, B., & Fatemi, A. (2006). An experimental investigation of deformation and fatigue behavior of coach peel riveted joints. *International journal of fatigue*, *28*(1), 9-18. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.04.003.
48. Li, D., Chrysanthou, A., Patel, I., & Williams, G. (2017). Self-piercing riveting-a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *92*, 1777-1824. Hämtad från: https://doi.org/10.1007/s00170-017-0156-x
49. Li, J., Shen, J., Hu, S., Liang, Y., & Wang, Q. (2019). Microstructure and mechanical properties of 6061/7N01 CMT+ P joints. *Journal of Materials Processing Technology*, *264*, 134-144. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.011
50. Li, W. W. (2020). Air pollution, air quality, vehicle emissions, and environmental regulations. Traffic-Related Air Pollution (pp. 23-49). Elsevier. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818122-5.00002-8
51. Liu, Y., Zhang, L., Liu, W., & Wang, P. C. (2013). Single-sided piercing riveting for adhesive bonding in vehicle body assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, *32*(3), 498-504. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.005
52. Lozano, R. (2008). Envisioning sustainability three-dimensionally. Journal of Cleaner Production, 16(17), 1838–1846. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.02.008
53. Merklein, M., Graser, M., & Lechner, M. (2015). Experimental investigation of heat-treated aluminum profiles. *Key Engineering Materials* 651, 59-64. Trans Tech Publications Ltd. Hämtad från: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.651-653.59
54. Michalec, I., & Marônek, M. (2013). Adhesive Bonding of Aluminium Alloy A5754 by Epoxy Resins. *Acta Polytechnica*, *53*(4). Hämtad från: https://doi.org/10.14311/1835
55. Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. J. M. S. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, *280*(1), 37-49. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X
56. Moroni, Fabrizio & Pirondi, Alessandro. (2010). Technology of Rivet: Adhesive Joints. Hämtad från: https://doi.org/10.1007/8611_2010_37
57. Norton, T. W., Pujol, S., Johnson, M. S., & Turner, T. A. (2011). Cold-Cure Adhesives for Use in Structural Aluminium Bonding. *The Journal of Adhesion*, *87*(7-8), 858-883. Hämtad: https://doi.org/10.1080/00218464.2011.597323
58. Olabode, M., Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *227*(8), 1129-1137. Hämtad från: https://doi.org/10.1177/0954405413484015
59. Piekarczyk, M., & Grec, R. (2012). Application of adhesive bonding in steel and aluminium structures. *Archives of Civil Engineering*, *58*(3), 309-329. Hämtad från: https://doi.org/10.2478/v.10169-012-0018-8
60. Porcaro, R., Hanssen, A. G., Langseth, M., & Aalberg, A. (2006). Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation. *Journal of Materials Processing Technology*, *171*(1), 10-20. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.048
61. Porcaro, R., Hanssen, A. G., Langseth, M., & Aalberg, A. (2006). The behaviour of a self-piercing riveted connection under quasi-static loading conditions. *International journal of solids and structures*, *43*(17), 5110-5131.Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.10.006

62. Rahul, M., Sivapirakasam, S. P., Vishnu, B. R., Balasubramanian, K. R., & Mohan, S. (2021). Health issue owing to exposure with welding fumes and their control strategies at the source–A review. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 9239-9245. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.516
63. Rajan, R., Kah, P., Mvola, B., & Martikainen, J. (2016). TRENDS IN ALUMINIUM ALLOY DEVELOPMENT AND THEIR JOINING METHODS. *Reviews on Advanced Materials Science*, *44*(4). Hämtad från: https://www.researchgate.net/profile/Belinga-Mvola/publication/305768931_Trends_in_Aluminium_Alloy_Development_and_Their_Joining_Methods/links/57a056c808aec29aed22ad2e/Trends-in-Aluminium-Alloy-Development-and-Their-Joining-Methods.pdf
64. Rauter, R., Jonker, J., & Baumgartner, R. J. (2017). Going one's own way: drivers in developing business models for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 144-154. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.104
65. Rong, Y., Xu, J., Huang, Y., & Zhang, G. (2018). Review on finite element analysis of welding deformation and residual stress. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(3), 198-208. Hämtad från: https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1361673
66. Rybczyński, A., Wolska, A., Wisełka, M., Matusiak, J., & Pfeifer, T. (2019). Ignition of welding arc and UV actinic hazard evaluation. *Energies*, *12*(3), 512. Hämtad från: https://doi.org/10.3390/en12030512
67. Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology-An overview. *Defence technology*, *14*(1), 28-44. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002.
68. Serindag, H.T, & Çam, G. (2019, September 19-21). Investigation of the Influence of Weld Defects on the Mechanical Behaviour of Cold Metal Transfer (CMT) and Cold Metal Transfer Pulsed (CMT-Pulsed) Arc Welded AA7075-T6 Al-Alloy Butt Joints [Paper Presentation]. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey. Hämtad från: https://www.researchgate.net/publication/336937659_Investigation_of_the_Influence_of_Weld_Defects_on_the_Mechanical_Behaviour_of_Cold_Metal_Transfer_CMT_and_Cold_Metal_Transfer_Pulsed_CMT-Pulsed_Arc_Welded_AA7075-T6_Al-Alloy_Butt_Joints/citation/download
69. Soltanpour, Z., Rasoulzadeh, Y., & Mohammadian, Y. (2023). Occupational exposure to metal fumes among iranian welders: Systematic review and simulation-based health risk assessment. *Biological Trace Element Research*, *201*(3), 1090-1100. Hämtad från: https://doi.org/10.1007/s12011-022-03246-y
70. Soo, V. K., Peeters, J., Paraskevas, D., Compston, P., Doolan, M., & Duflou, J. R. (2018). Sustainable aluminium recycling of end-of-life products: A joining techniques perspective. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 119-132. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.235
71. Svenungsson, J., Choquet, I., & Kaplan, A. F. (2015). Laser welding process–a review of keyhole welding modelling. *Physics procedia*, *78*, 182-191. Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.042

72. (United Nations, 2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Hämtad från: https://sdgs.un.org/2030agenda

Appendix

Appendix 1: Gantt-schema