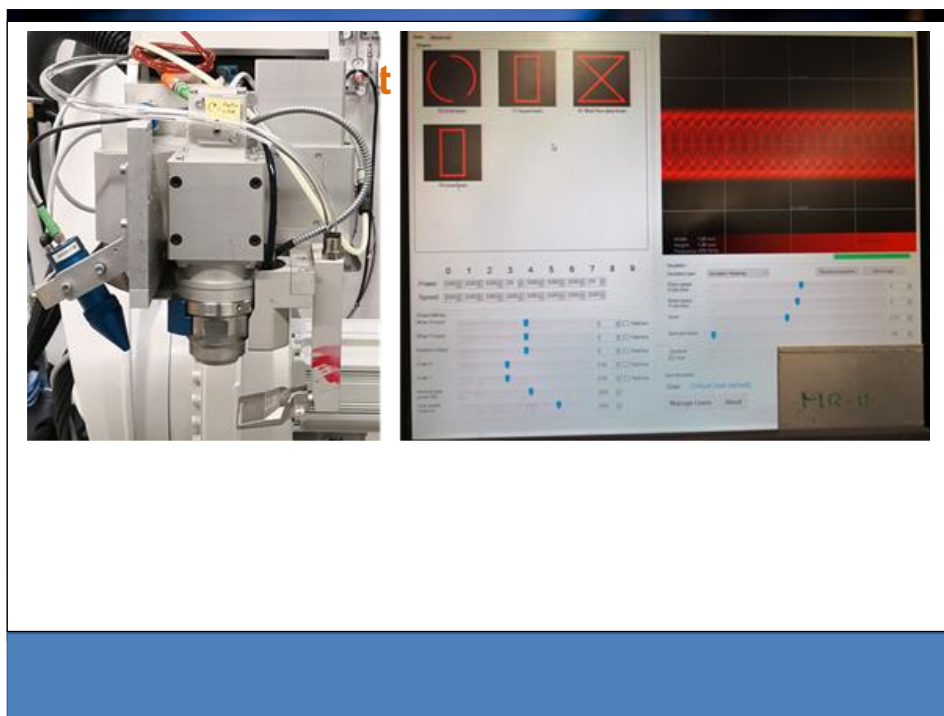


# LAWA - Production friendly solutions for laser

Publik rapport



Författare: Kjell-Arne Persson  
Datum: 2020-01-31  
Projekt inom Hållbar Produktion (projekt 2016-05464)

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>	<b>6</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>6</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>6</b>
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>7</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	7
7.2 Publikationer.....	7
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>7</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>7</b>

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Vissa aluminiumlegeringar är känsliga för varmsprickor i samband med svetsning. Syftet med detta projekt var att bättre förstå om och på vilket sätt olika svetsparametrar och även oscillerande laserstråle kan minska risken för varmsprickor vid lasersvetsning av aluminiumlegeringar i 6xxx-serien.

Sprickbildningsmekanismer har lett till olika modeller för sprickkriterier (baserade på rådande spännings-, töjnings- och töjningshastighetstillstånd kopplat till möjlighet för smälta att tränga in i det området med nästan fullt stelnat nätverket av dendriter). Genom att modellera dessa kriterier kopplat till svetsparametrar och randvillkor skulle det gå att prediktera ändringar i risken för varmsprickor. Den modell som tagits fram blev dock för krävande av datorkraft och de förenklingar som prövades gjorde att modellens noggrannhet blev lidande.

Olika svetestester (både sprick provocerande och icke sprick provocerande) har genomförts.

Lasersvetsning har också genomförts med fix och oscillerande laserstråle.

Design of Experiment har använts i syfte att optimera inställningar för oscillerande laserstråle.

Det har visats att risken för sprickbildning kan påverkas av inställningen av svetsparametrar som lasereffekt, svetshastighet, laserstrålens spot-diameter. Oscillerande laserstråle kan ge ännu större möjligheter. Det är dock svårt att förutsäga hur parametrar ska optimeras mer generellt utan ytterligare utvecklingsarbete av simuleringsmodellen.

Nyligen publicerade studier (2019) har gett intressanta uppslag och pekar på koppling till hur temperaturgradienten vid sist stelnande smälta kan påverkas av svetsparameterinställningar och via dendritstrukturen inverka på sprickbenägenheten.

# 2 Executive summary in English

Certain aluminium alloys are susceptible to hot cracking during welding. The aim of this project was a better understanding of if and how different welding parameters and advanced optics (with oscillating laser beam) could reduce the risk for hot cracking in laser welding of aluminium alloys in the 6xxx-series.

The mechanism for cracking has resulted in different cracking criteria (based on local stress, strain and strain rate conditions and possibility for melt feeding into the almost fully solidified network of dendrites). By modelling these criteria correlated to the welding parameters and boundary condition it would be possible to predict the risk for hot cracking. The model that was developed was however demanding too much processing power and tried simplifications reduced the accuracy of the model.

Different welding tests has been performed (both cracking provoked and non-provoking tests). Laser welding with fixed and oscillating laser beam has also been performed.

Design of Experiments has been used to optimize settings for the oscillating laser beam.

It has been shown that the risk for cracking can be influenced by setting of welding parameters such as laser power, welding speed and laser beam spot size. Oscillating laser beam can have an even greater influence. It is however difficult to predict how to optimize the parameters more generally without a further development of the simulation model.

Newly published research (2019) shows interesting ideas and demonstrates the correlation between how the temperature gradient at the last solidifying melt can be influenced by the setting of welding parameters and through controlled grain growth reduce the risk for hot cracking.

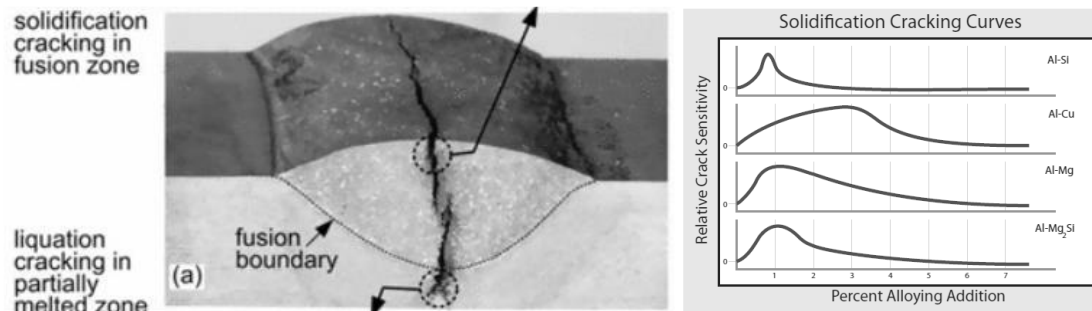
### 3 Bakgrund

Viktbesparing är, som många gånger belysts, mycket viktigt för att minska bränsleförbrukningen och utsläppen av CO<sub>2</sub>. Vid ett byte av stål mot aluminium kan man typiskt uppnå viktbesparingar i storleksordningen 30 % inom fordonsindustrin.

Tillgång till effektiva tillverkningsmetoder såsom svetsning är nyckelfaktorer för ökad användning av aluminiumlegeringar med sina specifika egenskaper (framförallt vikt men även korrosion, elektriska och termiska egenskaper). Att utveckla svetsprocedurer för nya material är tids- och kostnadskrävande, i synnerhet för material och komponenter som är benägna att resultera i oacceptabla nivåer av defekter.

Lasersvetsning är idag en väletablerad process i många branscher och är, tack vare hög svetshastighet, produktivitet, kvalitet och flexibilitet, förstahandsvalet i högvolymtillverkning jämfört med andra sammanfogningsprocesser (t.ex. TIG-svetsning (TIG), Metal Inert Gas svetsning (MIG), motståndssvetsning (RSW), friktionssvetsning, eller mekaniska fogningsprocesser såsom nitning (SPR) eller limning).

Däremot är lasersvetsning av aluminiumlegeringar förhållandevis svårt och associerat med hög risk för svetsdefekter, såsom nyckelhålsinstabilitet, deformationer, porbildning, sprickbildning (se figur 1) i smältzonen och i den delvis smälta zonen, som också är mycket svåra att upptäcka. Dessutom kan förändringar i mikrostrukturen leda till låg styrka. Framförallt sprickbildning och deformationer anses utgöra största hindret för lasersvetsning av aluminiumlegeringar.



Figur 1 Varmsprickning i smältzonen och stelningsprickning i den delvis smälta zonen (Kou et al). Känslighet för stelningsprickor för olika aluminium legeringar (Maxal Guide)

Nämnda problem hämmar användningen av aluminium i möjliga lättviktstillämpningar inom flera sektorer, och för att göra aluminium accepterat inom tillverkningsindustrin krävs hög svetskvalitet utan risk för sprickbildning eller andra defekter.

Aktuella svetsdefekter är starkt relaterade till svetsparametrar i kombination med egenskaperna hos aluminiumlegeringen själv såsom:

- den höga värmeutvidgningskoefficient, som leder till höga påkänningar vid stelning
- den kemiska sammansättningen, som leder till olika stelningsintervall
- olika processförhållanden, som leder till olika kylningshastigheter
- nyckelhålsinstabilitet på grund av olika absorption av laserljus - och temperaturberoende absorption av laserljus
- adderande av tillsatsmaterial som leder till olika sammansättningar i smältan
- ytförhållanden (såsom oxider) orsakade av gasatmosfären som främjar väteupptagning och porositet

Typiska åtgärder (state-of-the-art) som finns i litteraturen för att minimera dessa problem kan sammanfattas:

- Adderande av lämpligt tillsatsmaterial, såsom Al-Si för aluminium 6xxx.
- Användning av laserhybridprocesser och tillsatsmaterial
- Användande av s.k. ”fusion”-material (sandwich) som är speciellt designat för svetsning utan tillsatsmaterial, dock kostsamt.
- Minska risken för stelningsprickbildning i delvis smälta zonen genom användandet av ”grain refiners” så som Ti.

- Avancerad förbehandling (oxidborttagning, rengöring och skyddsgas).
- ”Dual beam”-tekniker.

Lasersvetsning är en avancerad termomekanisk process med snabba termiska cykler (uppvärmnings- och kylhastigheter) som ger upphov till fasomvandlingar/utskiljningar av spröda faser i materialet och lokala spänningar. Sprickor kan som nämnts uppstå, och mekanismerna är ännu inte helt klarlagda. För att öka förståelsen för orsaken till denna sprickbildning är det nödvändigt att identifiera ett lämpligt sprickkriterium. För att göra det krävs modellering, och genom att använda information från FE-simuleringar kan spänningar och töjningar analyseras beroende på val av material och processparametrar (såsom legeringselement, laserljusintensitet, punktstorlek, laservinklar, svets hastighet och fixturering). Tillsammans med sprick-/brottkriterium kan effekten av olika svetsparametrar bedömmas kvalitativt. T.ex. finns koppling mellan porbildning och tid för avgasning där svetsparametrar påverkar smältbadet. Utskiljning av spröda faser har också koppling till den termiska cykeln. Distorsion är en annan viktig parameter att kontrollera för ytterligare användning av aluminium i lätta karosskonstruktioner. Distorsion har studerats i tidigare projekt med föreslagna lösningar med fixtureringskontroll, avancerad foggeometri samt kontroll av värmeförseln. Många av studierna har dock gjorts på kupongstorlek och därmed inte under realistiska förhållanden. Vad som behöver göras är studier på mer produktlika komponenter för att få förståelse för hur de deformeras och åtgärder för att undvika deformationer.

Volvo Personvagnar har uppskattat att varje ny materialkombination kräver normalt cirka 200 mantimmar i förtester för att uppfylla specifika krav. Simuleringar spelar en viktig roll i möjligheten att förkorta tiden av detta förarbete för att säkra rätt svetskvalitet.

Flera projekt som rör aluminiumsvetsning har tidigare utförts. Många projekt har finansierats av rymdindustrin, till exempel i Storbritannien. Även TWI (The Welding Institute) har varit engagerad i flera projekt och i Tyskland har projekt utförts av BIAS ”Centre of Competence for Welding” samt Helmholtz Institute Geesthacht. Dessutom finns internationell forskning inom EU-projekten LAWENDEL (Clean Sky) samt ALLIANCE (H2020), samt specifikt hos biltillverkarna Audi, BMW, GM, etc. Alla resultat från dessa studier har dock inte publicerats. De senaste åren har avancerade och innovativa optiklösningar för lasersvetsverktyg presenterats. Tidigare har lasersvetsning i princip inneburit icke-flexibla ”single spot”-lösningar där krav har funnits på tillsatsmaterial för att uppnå fullgod kvalitet. I dagsläget finns många olika varianter på optik som drastiskt öppnar möjligheterna att påverka den termiska cykeln och genom detta uppnå kvalitetskraven utan tillsatsmaterial, t.ex. via optik som Trifocal från Scansonic samt WeldMaster från Precitec. Trifocal delar laserstrålen i tre delar, där två av delarna fungerar som en förvärmning av det området som ska svetsas. WeldMaster är en oscillationsoptik som pendlar strålen i 2D och dessutom varierar effekten på strålen beroende på position i pendelrörelsen. Summerad bedömning är att det finns en uppsjö av olika optiklösningar, som är möjliga att anpassa för att kunna lasersvetsa aluminium med hög kvalitet. En målsättning är att studera dessa på komponentnivå för att i möjligaste mån efterlikna produktionsliknande förhållanden.

I Sverige har de flesta projekt om lasersvetsning varit inriktad på studier av låglegerade kolstål och rostfria stål beroende på den stora efterfrågan från industrin, medan utmaningarna i samband med aluminiumlegeringar inte tidigare har studerats.

De tekniska huvudfrågorna i detta projekt är därför: Hur kan lasersvetsningsrelaterade problem såsom varmsprickor undvikas? Hur kan distorsioner på komponentnivå minimeras? Vilka produktionsvänliga lösningar finns när det gäller lasersvetsoptik? Projektet kommer att fokusera på produktionsvänliga (lätt implementerbara, kostnadseffektiva) lasersvetslösningar för att möjliggöra ökad användning av aluminiumlegeringar inom fordonsindustrin.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet för projektet har varit att visa huruvida olika inställningar av svetsparametrar (som lasereffekt, svets hastighet, mm.) och möjligheter med nya avancerade optiker för lasersvetsning kan minska risken för varmsprickor vid lasersvetsning av aluminium (6xxx-legeringar).

Metoder har varit

- Utveckla en simuleringsmodell för sprickbildning
- Provocerande spricktest vid lasersvetsning (Varestraint och modifierad SEP 1220-3 test)
- Tester med avancerad laseroptik (oscillerande laserstråle)
- Använda utvecklad deformations test och simulering för stål med hatt-profil (anpassad till aluminium)

Forskningsarbetet har delats mellan deltagande företag. Swerim och HV har varit forskningsutförare.

## 5 Mål

Projektet har haft flera delmål:

- Hur svetsparametrar inverkar på risken för varmsprickor vid lasersvetsning av aluminium? Både med standardoptik och med nya avancerade optiker som Permanaova's scanneroptik (oscillerande laserstråle med många inställningsmöjligheter).
- Framtagande av beräkningsunderlag och en simuleringsmodell för att förutsäga risken för varmsprickor kopplat till val av svetsparametrar.
- Riktlinjer för konstruktörer
- Spridning av resultat

## 6 Resultat och måluppfyllelse

Projektet har visat möjligheter att med optimerad inställning av svetsparametrar minska risken för varmsprickor. Detta gäller speciellt om avancerad svetsoptik med t. ex. oscillerande laserstråle kan användas. Dessa resultat kommer att spridas via artiklar, möten med svetsande industri, mm.

Ett av projektets mål har varit att utveckla en simuleringsmodell som kopplar svetsparameterinställningar till risken för varmsprickor. Detta mål har inte nåtts. Den modell som behövs är komplex och framtagen modell har krävt alltför omfattande datorkraft. Det gör det svårt att förutsäga hur inställda svetsparametrar lokala förhållanden just innan sista smältan stelnar. Resultat som tagits fram vid direkta svetestester blir applikationsspecifika och svåra att generalisera. För att ta fram bättre riktlinjer skulle mer arbete med förbättring av simuleringsmodellen behövas.

På programnivå betyder detta att förbättrad kvalitet och reducerad vikt kan nås men verktyget för att öka processtyrning, reducera ledtider och därmed få kostnadsbesparingar kräver mer utvecklingsarbete.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Ökad förståelse kommer att användas i framtida projekt, både inom simulering och utvecklande av simuleringsmodeller och vid praktisk provning
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	En del används redan i ett examensarbete rörande simuleringsmodellen i samarbete KTH/Swerim
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Vissa resultat kan användas men framförallt efter en vidareutveckling av simuleringsmodellen
Introduceras på marknaden	X	Permanova har ett scanner vertyg som ger oscillerande laser stråle
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

### 7.2 Publikationer

Hittills har en artikel publicerats i tidningen Svetsen (Nr4/2019). Resultat från projektet planeras att spridas ytterligare i samband med olika träffar med svetsande industri.

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

I projektet har vi sett att inställningar av svetsparametrar, speciellt med oscillerande laserstråle, påverkar möjligheten att minska risken för varmsprickor vid lasersvetsning av aluminium (6xxx-legeringar). Det är dock svårt att generalisera resultaten, de är ofta applikationsspecifika. Den simuleringsmodell som var tänkt att utvecklas krävde för mycket datorkapacitet och testade förenklingar ledde till brister i noggrannhet. Att kunna förutsäga villkor (som spännings-, töjnings- och töjningshastighet) i området vid sist stelnde smälta tillsammans med smältans möjlighet att penetrera nätverket med nästan full stelnde dendriter och koppla det till svetsparametrar som påverkar värmekällan (oscillerande keyhole) är komplext. Nyligen publicerade forskningsresultat (2019) visar dock på intressanta modelleringsmetodiker. Delvis genom att anta att vissa metallurgiska förhållande leder till mindre sprickbenägenhet. Design of Experiment är en annan intressant teknik för att optimera parametrar och hitta robusta inställningar. Svårigheter att lägga upp en bra försöksmatris ska dock inte underskattas. Optik för lasersvetsning som ger möjlighet till multispot, spot i spot eller oscillerande laserstråle verkar kunna ge stora fördelar både i form av mindre svetsdefekter men även bättre svetsutseende. Optimering med hjälp av numerisk simulering eller Design of Experiment kan dock behöva mer utvecklingsarbete.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

GKN Aerospace (Jimmy Johansson, Oscar Linde, Robert Leo)  
Gestamp HardTech (Hans Gedda, WeiJie Zhang)  
Permanova (Arash Moini)

Volvo Cars (Jerker Bengtsson, Per Lindahl, Oscar Andersson)

Hydro Extruded Solutions (Lina Nyblom, Henrik Hindsefelt, Edward Cole)

AGA Gas (Bo Williamsson)

Högskolan Väst (Fredrik Sikström, Isabelle Choquet, Asun Valiente, Joel Andersson, Kjell Hurtig, Johnny K Larsson)

Swerim (Kjell-Arne Persson, Alexander Lundstjälk, David Löveborn, Etienne Bonnaud)