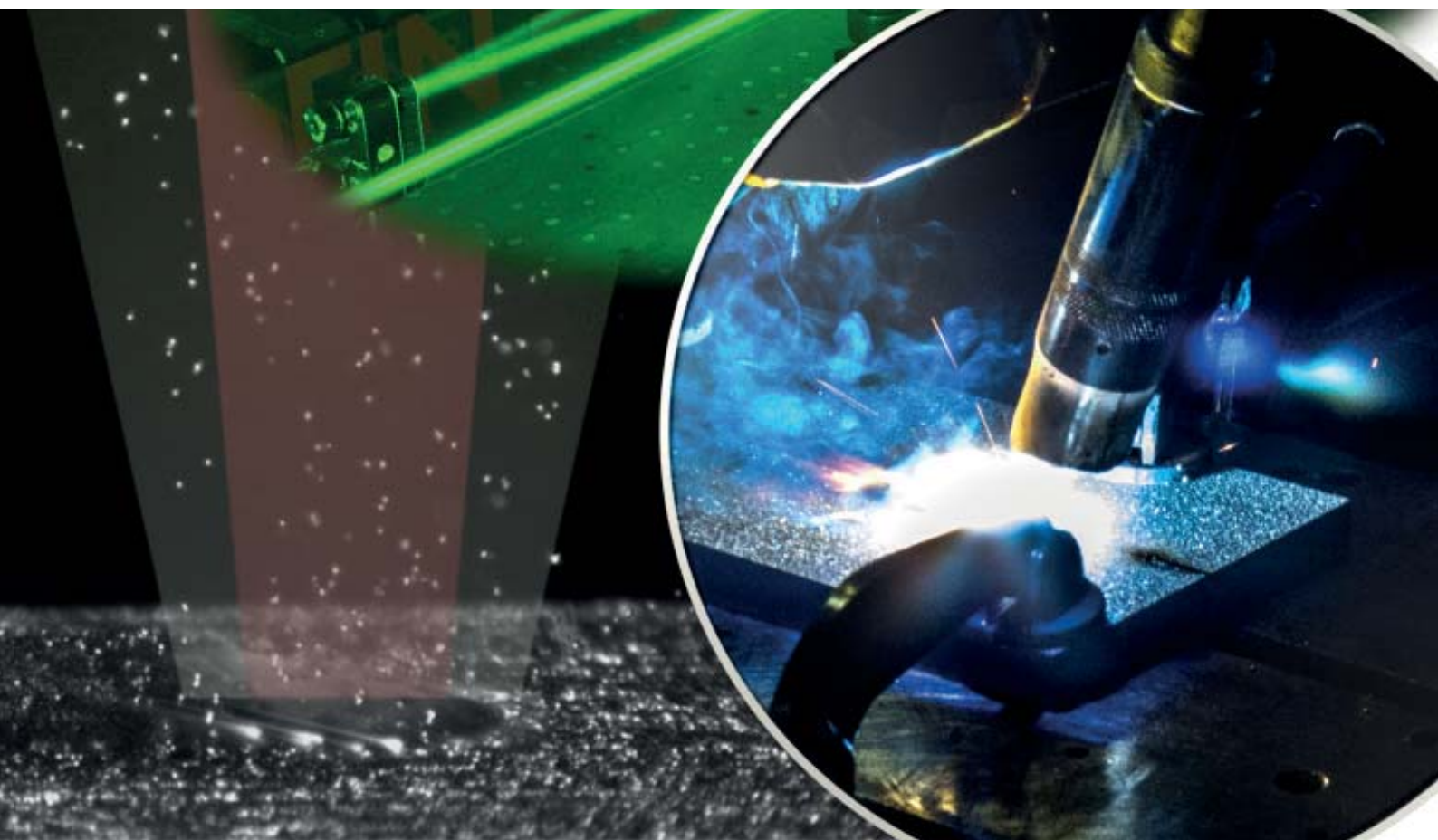


Lasernytt



1-2022



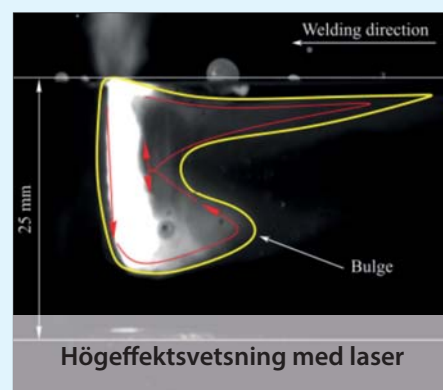
NOLAMP – Den 18:e Nordiska konferensen om laserbearbetning



Additiv tillverkning



Deltagare på NOLAMP 18



Högeffektsvetsning med laser

EWF - SPECIALKURS LASERSKÄRNING

Laserskärning är en högproduktiv kapningsmetod för den moderna tillverkande industrin. Laserskärning förekommer idag på många organisationer och är relativt enkel att använda. För mer avancerade material, felsökning eller svårare applikationer eller utvecklingsarbeten krävs oftast mer ingående processkunskap

European Welding Federation, EWF, har utvecklat ramarna för en fristående specialkurs inom laserskärning som Luleå tekniska universitet nu kan ge på svenska. Ett internationellt diplom, EWF-diplomet, garanterar utbildning av hög kvalitet

Kursen, nivå B eller C, omfattar totalt 40-48 timmar och ger Dig goda teoretiska och praktiska kunskaper om laserskärning, men även en överblick över andra laserbearbetningsmetoder

Kursen vänder sig till

Ingenjörer, tekniker, konstruktörer, produktionstekniker, utvecklingsingenjörer och utbildare m.fl. som vill skaffa sig kunskap om metodens möjligheter för rationell och effektiv skärning

För mer kursinformation:
<https://www.ltu.se/EWF>

*Vi erbjuder även anpassade kortare kurser
(utan diplom), intresseanmäl för mer info*

**Datum: Kurs planeras för
2023, anmäl intresse för
uppdatering av kursdatum**

**För intresseanmälan, kontakta:
Jan Frostevarg, Luleå tekniska universitet
jan.frostevarg@ltu.se, 0920 - 49 1675**

L
LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

Lasernytt utkommer med 3 nummer/år och ges ut av

Lasergruppen c/o Svetskommissionen
Box 5073, 102 42 Stockholm
Telefon: 08-120 304 03

Redaktör

Lars Hamrebjörk

Redaktionellt arbete

Lars Hamrebjörk
Telefon: 070-630 22 17
E-post: lars.hamrebjork@construedo.se

Ansvarig utgivare

Peter Norman

Lasernytt på Internet

www.lasergruppen.nu

Omslagsbild

Nolamp 2022

Layout: Marcus Dahlin, Dahlin grafisk design.

Tryck: Haninge Tryckeri



INNEHÅLL

Tankar från styrelsen	1
<i>Författare Bo Williamsson</i>	
Den 18:e nordiska konferensen om laserbearbetning	2
<i>Rapport från årets konferens som hölls 18-20 januari i Luleå</i>	
Minne om Hans Gedda, doktor inom laserpåsvetsning	7
Utbuktningseffekten och dess betydelse för högeffektsvetsning med laser	8
Nolamp 3 – Lappeeranta	14
Nolamp 2 – Nordisk laserkonferens med mersmak	19
Nolamp 4 – den bästa hittills	20
Utmaningar och möjligheter vid lasersvetsning i höghållfasta aluminiumprofiler i 6xxx legering för tillverkning av batterilådor till bilindustrin	26
Laser- och batteriteknologi i samverkan	32
<i>Nostalgiartikel från tidningen svetsen</i>	
Välkommen till Laserdagen	35

Tankar från styrelsen

Mörka tider och förhoppningar om en ljusnande framtid

Efter en lång period med pandemin och dess effekter ställdes stora förhoppningar till vad som komma skulle, men allt ställdes på sin spets i och med kriget i Ukraina. Med den rådande situationen i Europa känns det därför lite motsägelserfullt att skriva om den positiva utvecklingen på lasersidan. Förutom det uppenbara, med mänskligt lidande och ett överhängande hot om eskalering, så påverkas vi i vardagen. Jag slår förmodligen in öppna dörrar nu, men med ett ökat kostnadsläge i form av höjda energipriser, ökade drivmedelskostnader och en allmän påverkan på ekonomin så påverkas svensk verkstadsindustri negativt. Ur konkurrenssynpunkt mildras möjligen effekten av att andra länder står inför liknande utmaningar. I skrivande stund känns situationen väldigt osäker, förhoppningsvis kan vi en mer positiv utveckling framöver.

För att återknyta till lasertemat så finns det ändå positiva saker att berätta om. Maskinförsäljningen 2021 utvecklades i positiv riktning. Utskiftning av äldre CO₂-lasrar i kombination med investeringar i helt nya maskiner har helt klart påverkat utvecklingen. Vi ser också ett ökat intresse för lasersvetsapplikationer, mycket beroende på nya behov inom fordonsindustrin. Lasersvetsning är högintressant för exempelvis svetsning av komponenter till batterier. Den positiva utvecklingen ser ut att fortsätta även detta år.

När det gäller additiv tillverkning så kan jag bara konstatera att utvecklingen gick i stå under pandemin. Antalet företag som har investerat i tekniken är betydligt mindre än

förväntat. Orsakerna till detta kan man bara spekulera om, men givetvis har pandemin spelat in. Lite motsägelserfullt kan tyckas eftersom lasersidan har gått mycket bra. En förklaring kan vara att applikationerna befinner sig i helt olika faser. En laser för skärning är i dag att betrakta som en standardmaskin ("plug-and-play") medan en 3D-printer kräver en hel del utvecklingsarbete innan den kan användas i produktion. Resurserna för detta har varit begränsade hos många företag under pandemin.

Den tillväxt vi sett under 2021 har till största delen skett hos institut och högskolor. Som det ser ut nu lovar dock 2022 en betydligt mer positiv utveckling. Ett ökat intresse även från verkstadsindustrin lovar gott inför framtiden.

Lasergruppen fortsätter sitt arbete med att sprida information och kunskap om laserbearbetning, missa inte våra årligen återkommande laserdagar! Ett evenemang att se fram emot är Elmia-mässan 10-13 maj där laserteknik är en viktig del. Additiv tillverkning är också ett tema på mässan med en separat hall. I tillägg planerar Lasergruppen för ett laserseminarium på plats.



Författare
Bo Williamsson

Den 18:e Nordiska konferensen om laserbearbetning



Årets NOLAMPkonferens som hölls 18-20 Januari i Luleå var egentligen för 2021, men på grund av rådande läge med restriktioner pga covid försköts den ett halvår för att den skulle kunna hållas fysiskt. Konferensen hade nära 50 presentationer och 60 deltagare och denna gång en större mängd deltagare från centraleuropa än vanligtvis. Presentationerna höll en hög nivå, stämningen var god och alla kände sig välkomna.

På grund av snabbt utbrott av omikron-varianten fick konferensen ändå ställas om till en hybridvariant. Tack vare assistans av kollegor kunde denna omställning utföras närmast helt felfritt. Efter konferensen organiserades även sociala aktiviteter, vid en av kvällarna var det utomhusaktiviteter med tävlingar i vintermiljö som följdes av en promenad ut på isen eller inomhus framför brasa. Den andra kvällen var det en middag på Kulturens hus med levande pianomusik och treättersmiddag. Den första dagen började med keynote-tal av numera pensionerade Johnny K Larsson om *"From the Early Days of Auto-*

motive Laser Processing to Recent Innovations and beyond.....". Detta följdes sen av Andreas Graichen (Siemens) med "A journey of implementing additive manufacturing in large scale production, challenges and mitigation strategies", varefter konferensens presentationer hölls. Dag två var det parallella sessioner och keynote-tal av Rickard Bränemark (Integrum, Göteborgs universitet) "Does laser processing of titanium implant surfaces improve clinical results?" som handlade om strukturering av ytor för titanimplantat och hur utvecklingen på implantat har utvecklats. Den tredje och sista konferensdagen var det Frank

Brückner (Fraunhofer IWS) som höll keynote-tal med "Trends in AM by Laser Direct Energy Deposition". Sammantaget många intressanta presentationer och diskussioner.

För er som är intresserade finns konferensproceedings (bidrag som är peer-reviewed) att läsa fritt (open access) här:

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1135, 2021 - IOPscience
<https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1135/1>

Ett urval av vad som presenterades under konferensen följer här, indelat i sina olika teman för konferensen:



Jan Frostevarg



Alexander Kaplan



Tatiana Fedina



Sandra Handika
Dewi



Jörg Volpp



Adrien Da Silva

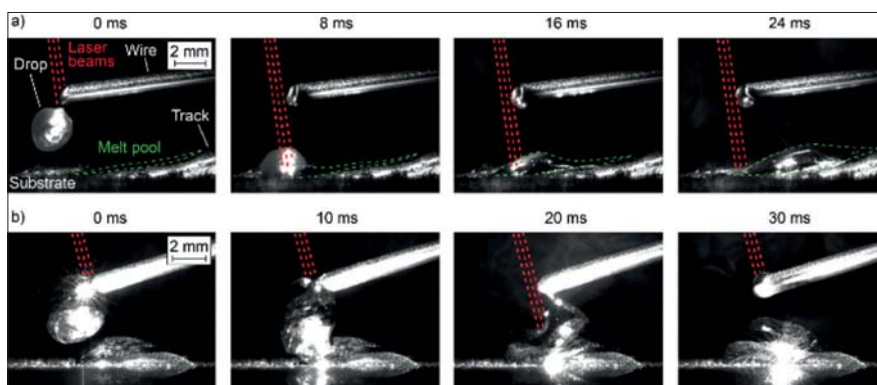


Figur 1: Axplock av bilder från 18:e NOLAMP i Luleå.

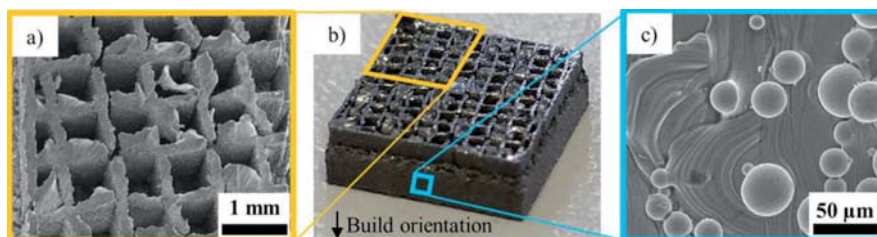
Additiv tillverkning

Den första presentationen efter introduktionstalen var av doktorand **Adrien Da Silva** (Luleå tekniska universitet) och handlade om en ny metod för att deponera material från metalltråd för additiv tillverkning. Detta genom att kontaktlöst generera droppar som därefter riktas mot substratet av den laserstråle som genererade droppen. I detta fall var det för från tråd av 316L och NW6625-legeringar som laser genererade droppar av som sedan accelererades av förångningstryck som bildas där laserstrålen träffar dess yta. Olika metaller fungerar annorlunda jämfört med stål, exempelvis aluminium. Därför undersöktes även en kontakt-baserad metod för en AlSi10MG legering, där droppar skapas och vid substratet med hjälp av ytspänning dra av dessa från trådänden där de ska placeras. Dessa överföringsmetoder kan möjliggöra mer flexibel och energieffektiv variant av additiv tillverkning.

En alternativ metod för efterbearbetning för detaljer tillverkade via metall 3d-printing (laser powder fusion, PBF-L) som visades av **Daniel Holder**, går ut på att genom ultrakorta laserpulser skapa ablation av ytan. Med denna metod är det möjligt att bearbeta bort stödstrukturer på ett sätt som lämnar väldigt lite spår och litet termisk påver-



Figur 2: Bilder från höghastighetsfilmer som visar laserbaserad sekventiell droppöverföring från metalltråd som är a) kontaktlös med 316L och b) kontaktbaserad med AlSi5.



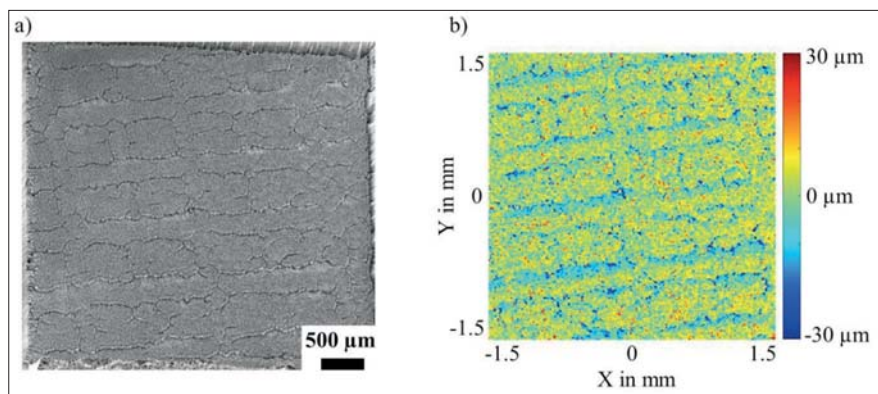
Figur 3: Ett genererat prov tillverkat genom PBF-L i pulver av Ti6Al4V, där a) är en SEM-bild av blockets stödstrukturer på dess undersida och b) visar genererade provets yta efter tillverkning.

kan. Detta fungerar också för att minska ytans jämnhet (roughness) med 81 %, kan ses i *Figur 3*.

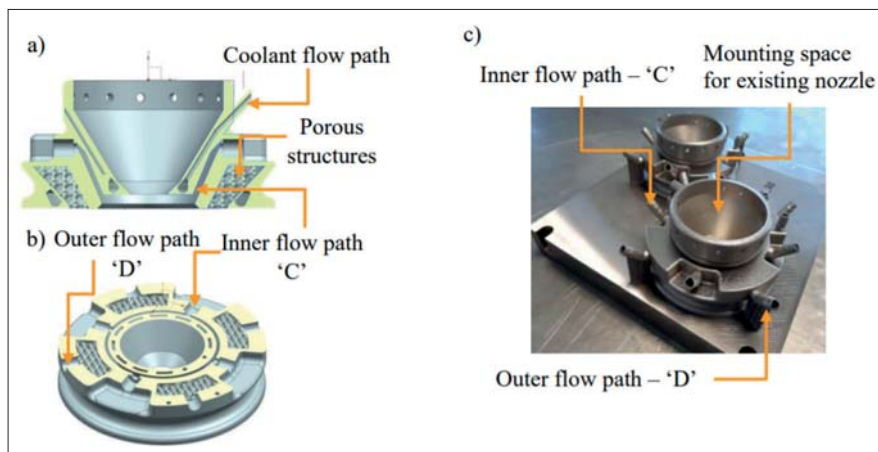
Denna teknik visades vara väldigt effektiv och relativt enkel att implementera för avlägsning av stödstrukturerna

och ytbearbetning för att minska ytans egenskaper, här demonstrerat skapande av vattenavstötande ytor, *Figur 4*.

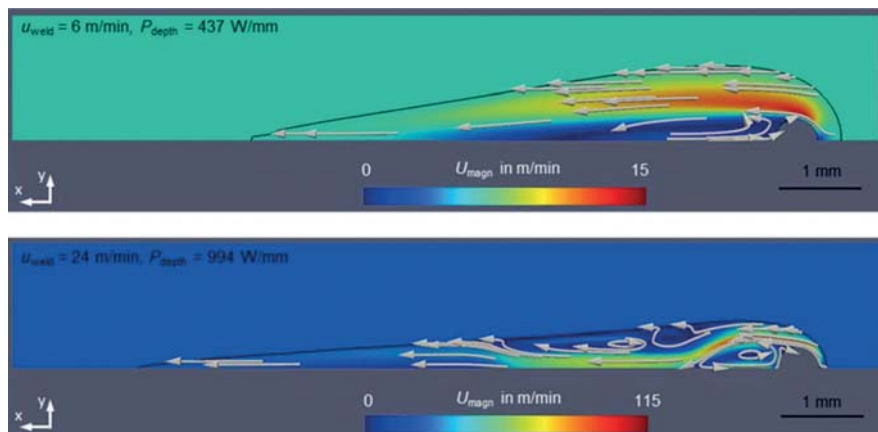
Lukas Langer från Fraunhofer IGCV presenterade en intressant studie om hybrid additiv tillverkning. I det presente-



Figur 4: a) SEM bild av ytans topografi bearbetning (ablation) med ultrakorta laserpulser och b) uppmätta avvikelser från platt holografisk bild (via OCT mätningar). Bearbetningen utfördes med $\phi_0 = 1.9 \text{ J/cm}^2$ och 2400 iterationer



Figur 5: Den nya munstyckesdesignen som kan metal 3d-printas, där tvärsnitt av 3d-modellen visas a) vertikalt och b) horisontellt. c) Det tillverkade munstycket som tillverkats med PBF-L och Inconel 625.



Figur 6: a) CFD-bärkning beräkning (Computational Fluid Dynamics) av det horisontella smältflödet kring nyckelhålet i lasersvetsning.

för reaktioner med omgivande atmosfär (framförallt luftens syre och kväve) under uppvärmning och inblandning i processområdet vid Directed Energy Deposition (DED). Därför har en funktionell prototyp tillverkats för att ge multipelt flöde i ringformatsmunstycke, utvecklat med hjälp av strömningsberäkningar (computational fluid dynamics simulation, CFD) och tillverkades med PBF-L och visas i Figur 5. Den nya munstyckesdesignen möjliggör förbättrat gasflöde för att täcka substratet vid tillverkning. En Mo-Si-B-legering demonstrerades deponeras på en förvärmad $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ förvärmad substrat utan någon märkbar oxidering eller sprickbildning.

Svetsning

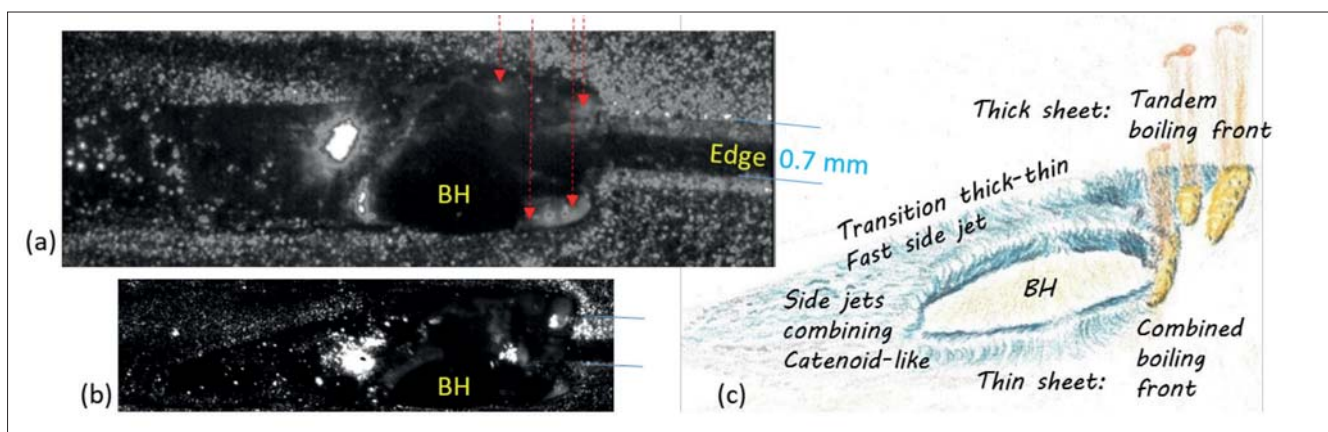
Området svetsning var det område som hade flest presentationer, bland annat flera intressanta från Högskolan Väst och vår tidigare kollega **Ivan Bunaziv** vid SINTEF i Norge. Här följer en beskrivning av några få utvalda presentationer från deltagare och egna.

Jonas Wagner från IFSW Stuttgart, Tyskland, genomförde en förenklad beräkning av det horisontella smältflödet kring nyckelhålet i lasersvetsning, med CFD-metodik (Computational Fluid Dynamics), Figur 6. För ett cirkulärt nyckelhål är det känt sedan tidigare att smältan behöver accelereras kraftfullt (genom metallångstrycket) för att kunna passera nyckelhålet och lugnar ner sig igen i den stora smältpölen, med hänsyn till förenklad geometri. Herr Wagner kunde nu visa för tillräcklig hög svets hastighet att flödet bakom nyckelhålet separerar sig, i två olika regioner, som en jet som bibehåller sin impuls längre bakåt. Det visades även beräkningar för olika utformade nyckelhål, t ex flera lateralt arrangerade nyckelhål (genom svetsning med flera laserstrålar) där en del av smältan strömmar mellan dem och därigenom möjliggör att manipulera smältflödet på annat sätt. En bättre förståelse av smältflödet och påverkan av strålförformning ger möjligheter att optimera smältflödet och i sin tur hela processen, ex svetskvalitet att undvika fenomen som humping, sprut, underfill eller svetsdiken. Kunskap genom beräkning var bra och kompletterade presentationen av **Alexander Kaplan**, Luleå tekniska universitet, om upp till fyra multiplar laserstrålar för Tailored Blank lasersvetsning (stumfog med oli-

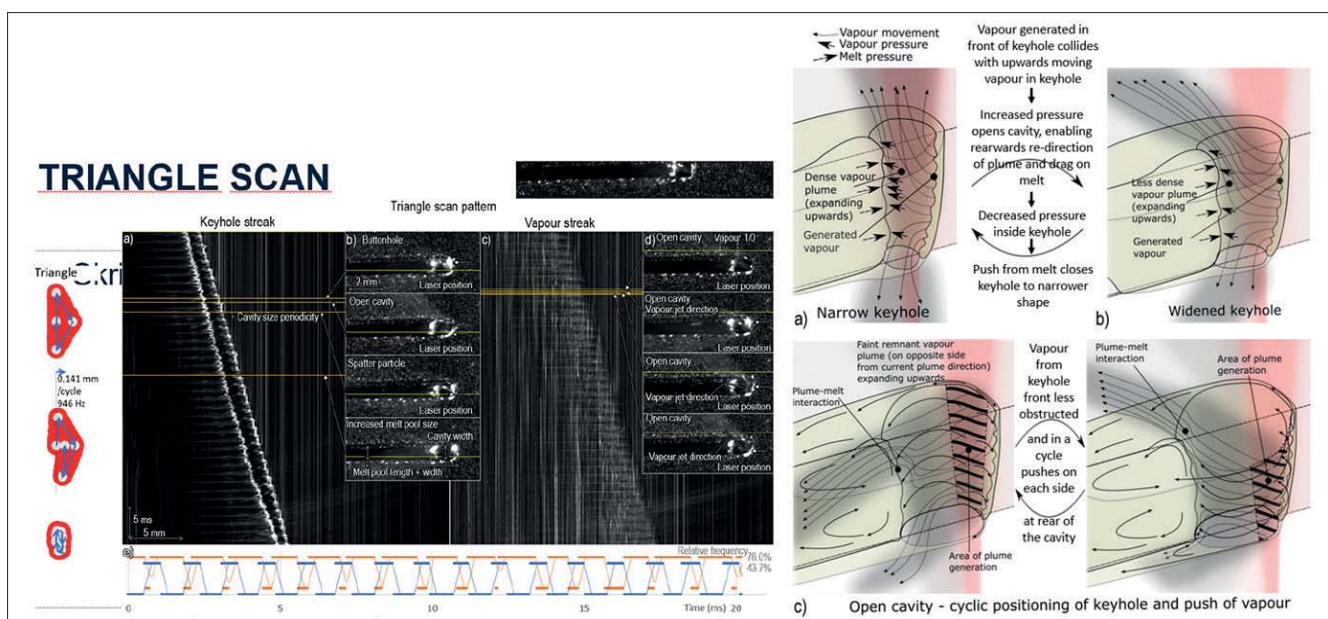
rade arbetet var det varmbearbetningsverktyg stål H13 med olika baskroppar tillverkade genom PBF-L. Här byggdes strukturen på konventionellt tillverkade grunddetaljer och det var gränsområdet däremellan som i detalj studerades. Lukas demonstrerade att sprickfri bindning var möjlig att åstadkomma. Storleken på bindingsområdena varierade

och beror på grunddetaljernas utformning och de efterbearbetningsmetoder som använts. Densiteten i dessa områden visades också vara över 99,5 %.

Tobias Hauser (Siemens, Germany) visade hur additiv tillverkning (AM) kan användas för att hjälpa förbättra AM. Skyddsgastillförsel är viktigt eftersom pulvermaterial kan vara känsligt



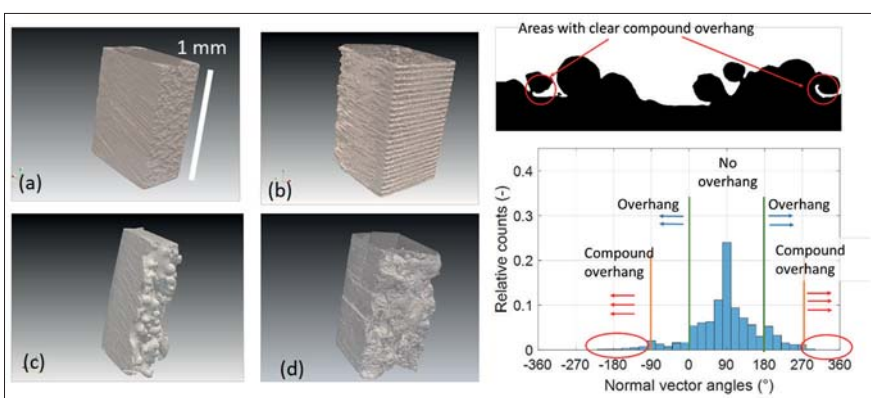
Figur 7: Beräknad smältflöde, homogent för lägre svets hastighet medan separerande jet för högre svets hastighet; höghastighetsfilmning av Tailored Blank lasersvetsning, och teoretisk visualisering, om ett stort hål (BH – Button Hole) som skapades när man använder fyra laserstrålar.



Figur 8: (vänster) triangelformad skanning vilket öppnar kavitet, här visat med "streak" bild från höghastighetsfilmning och (höger) illustration över nyckelhålsfluktuationer i storlek och plymens riktning samt för med hjälp av skanningsoptik producera sekventiellt tryck med plymen för att öppna upp kaviteten.

ka materialtjocklekar). Med höghastighetsfilmning visades att smältflödet kan vara antingen omkring och mellan fyra separata nyckelhål eller runt en större gemensam kavitet som bildas av de gemensamma laserstrålarna, beroende på orientering och processparametrar, Figur 7. Detta möjliggör en ny metod att styra smältflödet för att skapa stabilare smältflöde och jämnare svetsrår, genom multipla förångningsfronter. Höskolan Väst presenterade även om ytterligare applikationer med multipla laserstrålar, för värmeledningssvetsning.

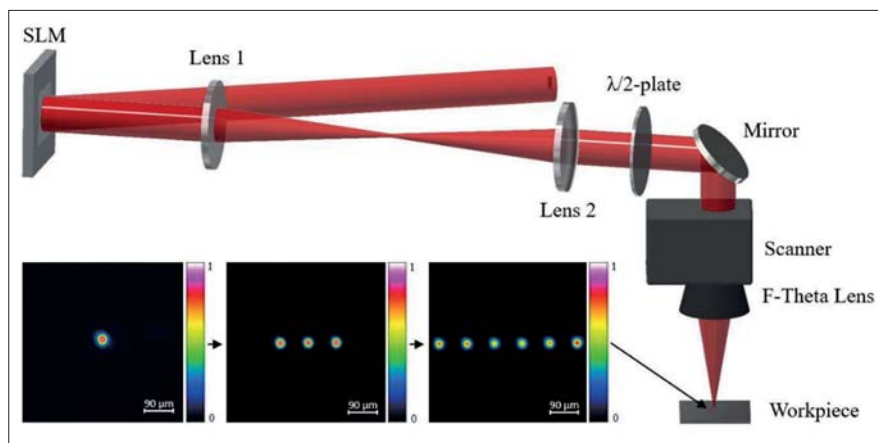
Relaterat arbete presenterades av **Jan Frostevarg** (också Luleå tekniska universitet), som visade på ny kännedom kring mekanismer som verkar i nyckelhålet vid lasersvetsning. Detta arbete finns publicerat som *Elongated cavities during keyhole laser welding* i *Materials*



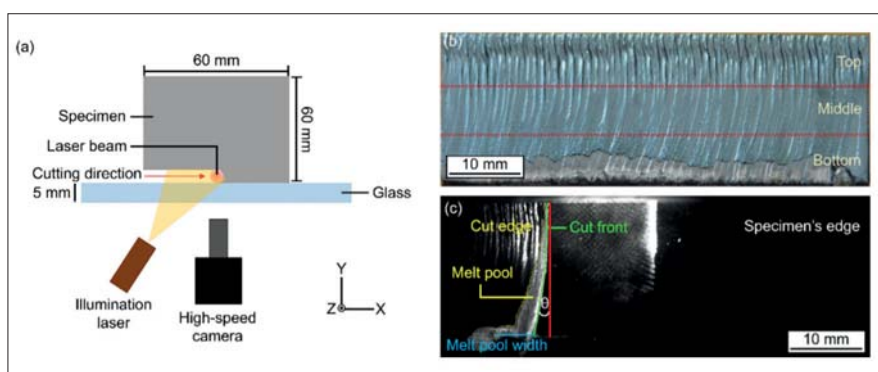
Figur 9: (vänster) Uppmätta ytor (Titan, med Röntgen CT; a) sandblästrad, b) laser BioHelix, c) AM, d) AM, sedan etsad; (höger) uppmätt profil med överhäng och kombinerad överhäng, och beräknad statistisk fördelning av normalvinklar på ytan, som identifierar överhångs-strukturer.

& Design (Volume 206, 2021, 109835, ISSN 0264-1275) och kom från ett samarbete med Permanova AB (Sverige) och

Jörg Volpp. Här visades att plymen som bildas fluktuerar på ett sätt som korrelerar med nyckelhålets storlek. Genom



Figur 10: Skematisk illustration för uppställningen för femtosekunds laserablation med en spatiell modulator (spatial light modulator, SLM) och ett 4f-teleskóp med en galvoskanter med en F-Theta lens. Dessutom visas intensitetsprofiler för en, tre och sex punkter med ett avstånd på 90 μm .



Figur 11: a) Illustration av den experimentella uppställningen och b) resulterande skärkant och c) observation av laserskärprocessen

att använda skanningsoptik visades att det går att både bredda och stabilisera en större kavitet med hjälp av smältans strömning och sekventiellt ångtryck för att förhindra kollaps, *Figur 8*. Detta

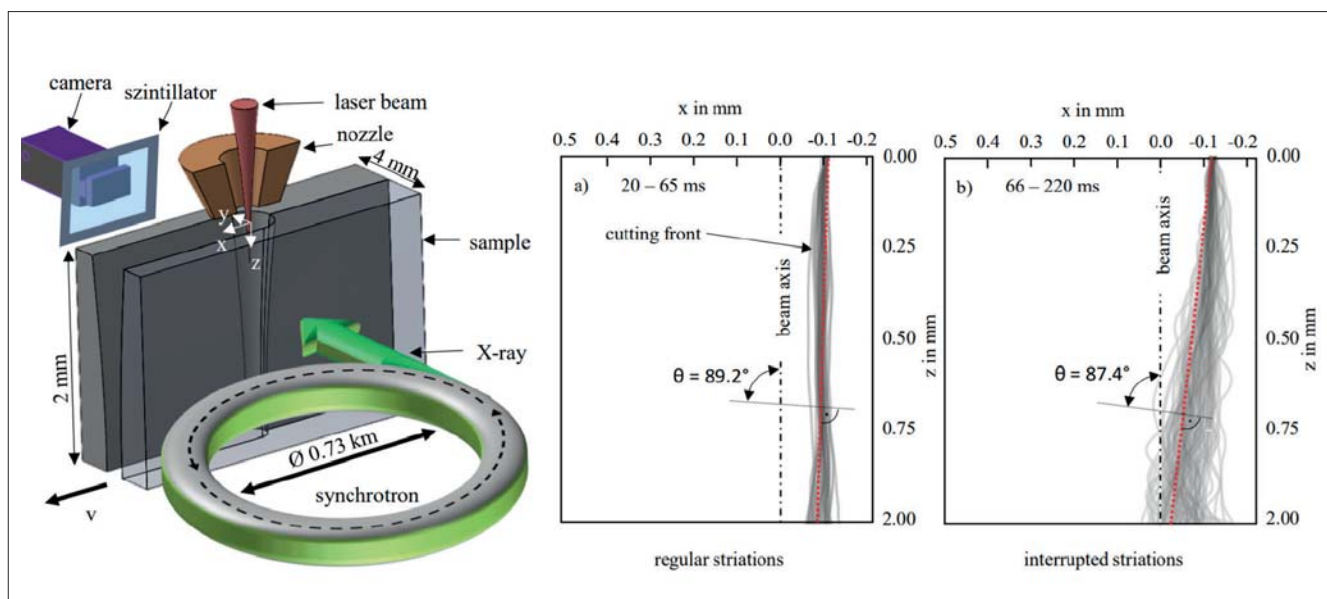
möjliggör något som är något mellan ett nyckelhål och ett knapphål under svetsningen och ger stabilare svetsning för att producera jämnare svetsrår med högre toleranser. Dock kan skanningsparame-

trar behöva tas fram för gällande svets-hastighet och material.

Ytbearbetning

Rickard Olsson, Laser Nova AB, karakteriserade olika ytor som skapats genom lasertexturering av ytor för medicinska titanimplantat. Av särskilt intresse fast svårt att detektera är överhäng strukturer (overhangs), som möjliggör bättre förbindelse mellan metallen och tillväxt av kroppsvävnad (bentillväxt, osteointegration). När man använder Röntgendatortomografi (X-ray CT) så möjliggör den inte bara att undersöka variationer mitt i volymen men även en väldigt noggrann ytmätning. I sin forskning skapade Rickard en lämplig algoritm för att identifiera dessa överhäng. Beräkningen med den algoritm möjliggjorde baserad på Röntgen CT-mätningen en bra statistisk jämförelse mellan ytor som skapades med fyra olika tekniker, bl a med laser (BioHelix, varumärke), för att kunna identifiera trender när och i vilken omfattning överhäng och andra även mer komplexa strukturer skapas, särskilt kombinerade överhäng (compound overhangs), *Figur 9*. Denna nya metod kan fungera som ett komplement till övrig ytkarakterisering, då den kan användas som ett dimensionslöst mått för en ytas komplexitet.

Christian Lutz studerade spatial och temporal strålförformning för ultrakorta pulser för ablationsprocess, *Figur 10*. I denna studie visades att inverkan av



Figur 12: (vänster) uppställning av observationsmetoden och (höger) konturerna längs centerlinjen vid skärfronten för vanlig respektive avbrutet beteende.

pulsläge och antalet laserpunkter inver- kade på ablationshastighet, ablationsef- fektivitet och grovhetsegenskaper. Han fann att antalet laserpunkter inte påver- kar negativt ablationstakten och effek- tiviteten, medans ett högre antal pulser däremot kan öka ablationstakten och ef- fektiviteten. Dessutom om bearbetning- en pågår längre tid så kan antalet pulser och antalet punkter förbättra ytfinheten.

Stefan Rung rapporterade möjlighet för mikrobearbetning av Al₂O₃ genom att använda ultrakorta laserpulser. Han fann att värmen ökar med kortare pul- ser och där en pulslängd på 900 fs leder till högre temperaturer än applikatio- nen för 5 ps och 10 ps. Den maximala temperaturen i den värmepåverkade zonen i direkt anslutning till ablations- området var 220 °C. Dessutom ger höga ablationstakter upp till 45 mm³/ min inte till kritiska temperaturer och därför genererar dessa inte strukturella defekter eller mikrosprickor.

He found that there is an increase heating with smaller pulse duration where a pulse duration of 900 fs leads

to higher temperatures than the appli- cation of 5 ps and 10 ps. The maximum temperature at the heat affected zone in the direct vicinity of the ablation area was 220 °C. Moreover, high ablation ra- tes of up to 45 mm³/min does not lead to critical temperatures and therefore does not generate structural defects or micro cracks.

Laserskärning

Laserskärning undersöktes av flera presentatörer. **Handika Sandra Dewi** visade en observationsteknik för att se smältbeteendet vid skärning genom glas och med höghastighetsfilmning, *Figur 11*. Här studerades påverkan av valshud vid skärningsprocessen.

Utöver detta visade Jannik Lind att ge- nererad ytfinhet för skärresultatet från laserskärning kan delas in i vanligt och i avbrutet beteende, varav det sistnämnda påverkar ytfinheten negativt. För att analysera uppkomsten av formeringen av dessa påverkade beteenden, fånga- des skärfronten för fusionsskärning av aluminium både rums- och tidsmässigt

vid 1000 Hz med en synkrotronröntgen, *Figur 12*.

Jämförelse av konturerna för skär- fronterna för skärresultat som ger van- ligt respektive avbrutet, visade att kon- turerna fluktuerade väsentligt mycket mer i fallet för avbrutet beteende. Den genomsnittliga infallvinkeln minskar vilket resulterar i en ökning av den genomsnittliga absorberade strålning- en. Detta leder till en lokal ökning av absorberad strålning och den dyna- miska fluktuationen resulterar i lokal ökning av smältfilmens tjocklek vid skärfronten, vilket är ansvarigt för bil- dandet av de avbrutna ränderna (gröv- re ytfinhet).

Summering

Avslutningsvis tackar vi för aktivt del- tagande och för mycket bra bidrag till konferensen. Nästkommande NO- LAMP (19:e i ordningen) kommer att hållas i *Turku, Finland 22-24 Augusti 2023*. Håll ögonen öppna för inbjud- ningar till detta säkerligen minnesvär- da event. ■

Minne om Hans Gedda, doktor inom laserpåsvetsning

Det svenska lasersamhället beklagar att Hans Gedda, född 1959, gick bort efter en allvarlig sjukdom. År 2004 disputerade Hans Gedda på Luleå tekniska universitet om experimentella och teoretiska studier vid laserpåsvetsning och lasergjutning med CO₂-laser och Nd:YAG-laser. Exempelvis blev hans publikation om absorption i laserpåsvetsning över 70 gånger citerat hittills. Under sin karriär jobbade Hans för olika industriföretag, bland annat Duroc, och sista åren på Gestamp Hard- tech. Med Hans Gedda förlorar vi utöver en expert i laserpåsvetsning även en ytterst angenäm, trevlig människa med många intressen och idéer. Det finns många fina minnen från Hans, några få av många är exempelvis genom en självbyggd 60tals retro-husvagn och en väldig livlig disputationsfest.

(PhD: "Laser cladding : an experimental and theoretical investigation")



Utbuktningseffekten och dess betydelse för högeffektsvetsning med laser

Numera är svetstekniken med högeffektlaser ett etablerat verktyg med ökande förmåga att sammanfoga tjocka plåtar. Med tillgängliga lasereffekter på upp till 100 kW för solid-state lasrar är det möjligt att sammanfoga arbetsstycken upp till 50 mm tjocklek med en enda svetssträng.

Jämförelse av laserssvetsprocessen med traditionella svetsprocesser som till exempel MIG/MAG (GMAW) och svetsning med pulverbåge (SAW) visar på den stora potential som denna svetsmetod erbjuder. De konventionella processerna kräver vanligtvis flera svetssträngar för att uppnå önskat svetsdjup, till exempel vid tillverkning av tjockväggiga rörledningar för olje- och gasindustrin.

Lasersvetsning kan ofta ersätta dessa processer med en enda svetssträng och erbjuder fördelar som hög effektivitet, hög svetshastighet, högt djup/bredd-förhållande och en smal värmepåverkad zon.

Svensk översättning: Mikael Juntti.

Trots alla fördelar med lasersvetsningsprocessen uppträder nya fenomen med ökande svetshastighet och plåttjocklek som är ovanliga under konventionella svetsförhållanden.

Nyligen har en sådan företeelse, nämligen breddningen av smältbadet vid gränssytan mellan fast och flytande material, upptäckts. Den är känd som en utbuktningseffekt och har bekräftats experimentellt [3, 4]. Denna effekt i form av en geometrisk egenskap hos smältans form visade sig spela en avgörande roll för bildandet av defekter, t.ex. sprickbildning vid stelning och poro-

siteter. Utbuktningen resulterar också i en begränsad transport av legeringsämnen till exempel vid användning av tillsatstråd vid lasersvetsning, till exempel hybridlasersvetsning eller lasersvetsning med kall trådtillsats. Men, processens optiska otillgänglighet och de komplicerade samspelet mellan de inblandade fysiska effekterna gör att såväl den experimentella som den numeriska undersökningen av de relevanta processvariablerna, som leder till utvecklingen av utbuktningseffekten, mycket utmanande. Detta gäller även valet av lämpliga processparametrar, t.ex. svets-



Antoni Artinov 1)



Xiangmeng Meng 1)



Nasim Bakir 1)



Ömer Üstündağ 1)



Marcel Bachmann 1)

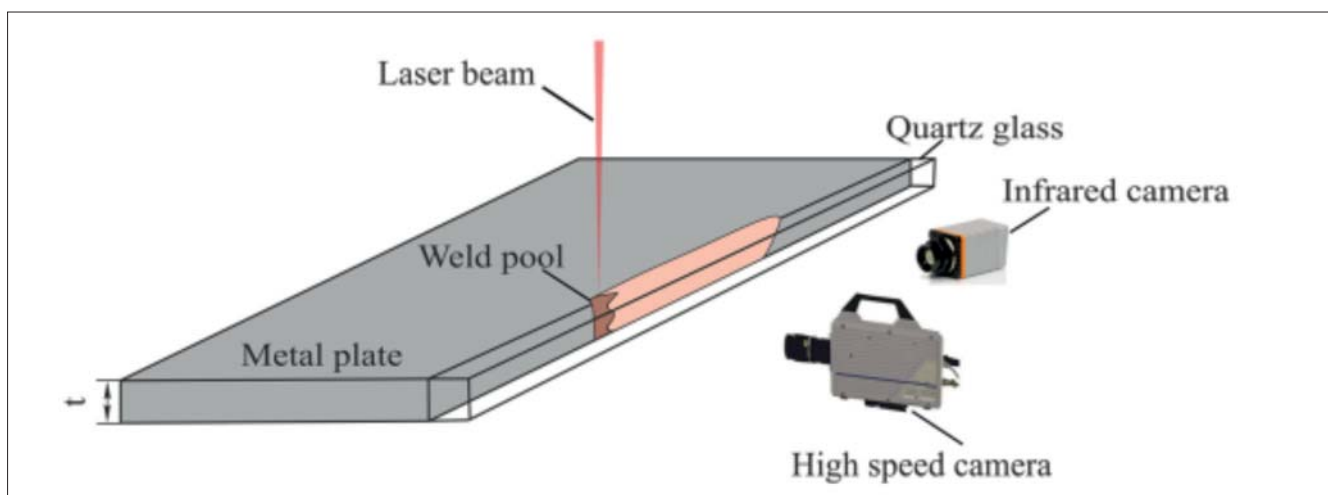


Andrey Gumenyuk 1), 2)



Michael Rethmeier 1), 2), 3)

1) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Germany 2) Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology, Germany 3) Institute for Machine Tools and Factory Management, Technische Universität Berlin, Germany



Figur 1: Experimentell uppställning som användes för visualisering av gränssnittet i svetsmältan i det längsgående avsnittet (t var 15 mm i fallet med fullständig penetration och 25 mm i fallet med partiell penetrering) enligt [4].

hastighet, lasereffekt och laserstrålens fokalposition.

De första studierna om utbuktningseffekten och dess inverkan på sprickbildning vid stelning har gjorts för elektronstrålesvetsning. Det påvisades att det breddade smältbadet ledde till en lokal fördröjning av stelningbeteendet, vilket ökade sprickkänsligheten i detta område [5, 6].

Det starka samspelet mellan ett breddat smältbad och sprickbildning har experimentellt bekräftats även vid hybrid laser/GMA-svetsning av tjocka stålplåtar [7].

Bidraget från utbuktningseffekten till sprickbildningen vid lasersvetsning har beräknats på olika sätt, t.ex. genom spänningsfördelningar [8] eller dynamik i smältbadet. I en detaljerad studie har det visats att utbuktningseffekten förstärker de tre mest dominerande faktorerna som bestämmer risken för sprickbildning, nämligen den termiska cykeln, inspänningsgraden och den lokala mikrostrukturen. Slutsatsen är således att utbuktningseffekten leder till en direkt ökning av sprickkänslighet vid lasersvetsning med djupgående laserstråle [9].

Vidare har det antytts att utbuktningseffekten kan vara avgörande för smältbadets dynamik, närmare bestämt transporten av tillförda legeringsämnen från toppen till botten av smältbadet när tillsatsmaterial används. Som en följd av detta har det hävdats att blandningen av legeringsämnen har varit begränsad, vilket har lett till en inhomogen kemisk

sammansättning av smältan och därmed icke-optimala svetsegenskaper. Flera forskningsarbeten har visat att breddningen av smältbadets form förhindrar att tillförda legeringsämnen överförs nedåt till svetsroten och därmed starkt påverkar svetsfogarnas kvalitet, till exempel Charpy-slaghållfastheten. Det har konstaterats att utbuktningseffekten minskar metallöverföringen mellan den övre och nedre delen av svetsen, vilket följaktligen bidrar till en högre koncentration av tillsatsmetall i den övre delen av smältbadet.

Såvitt författaren vet finns det få studier om förekomsten och relevansen av utbuktningseffekten vid svetsning av tjocka plåtar med högeffektlasrar, e.g. [1,2], även om liknande fenomen har observerats i flera numeriska och experimentella arbeten. På grundval av litteraturgenomgången har konsekvenserna av utbuktningseffekten vid svetsning av tjocka plåtar med lasrar med hög effekt antagits vara följande: Å ena sidan har utvidgningen av smältbadets bredd lett till ökad risk för sprickbildning å andra sidan har den begränsade transporten av legeringsämnen i smältbadet resulterat i en inhomogen kemisk sammansättning av svetsfogen.

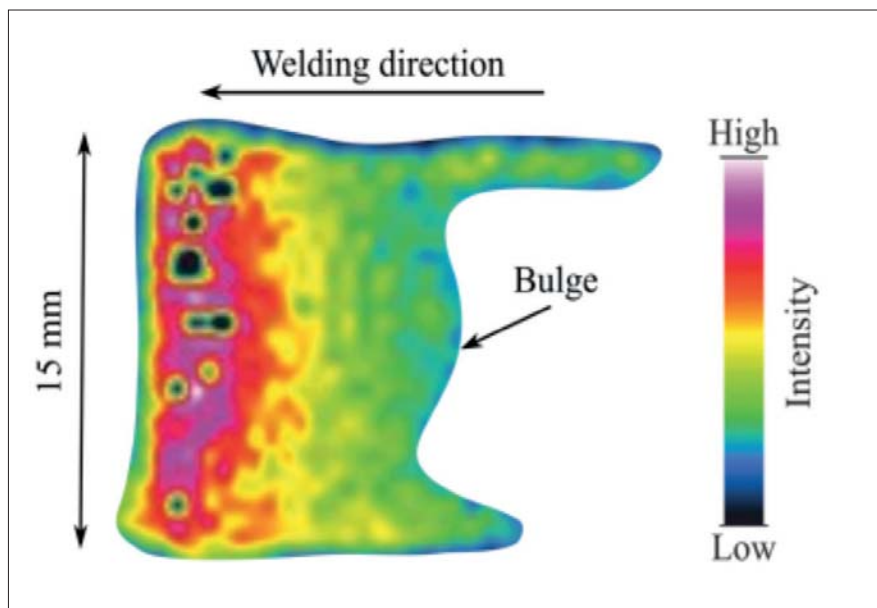
Huvudsyftet med detta arbete är att undersöka de två konsekvenserna av utbuktningen av svetsfogen vid djupgående svetsning med högeffektlasrar. En kombinerad experimentell och numerisk angreppsvinkel användes för att studera utbuktningens inverkan på både varmsprickbildning och den kemiska struk-

turen i svetsgodset. I analysen varierades plåttjockleken från 8 mm till 25 mm med hänsyn till partiell och fullständig penetration. Dessutom har man försökt att få fram ett kritiskt penetrationsdjup över vilket utbuktningseffekten blir betydande för svetsfogens kvalitet.

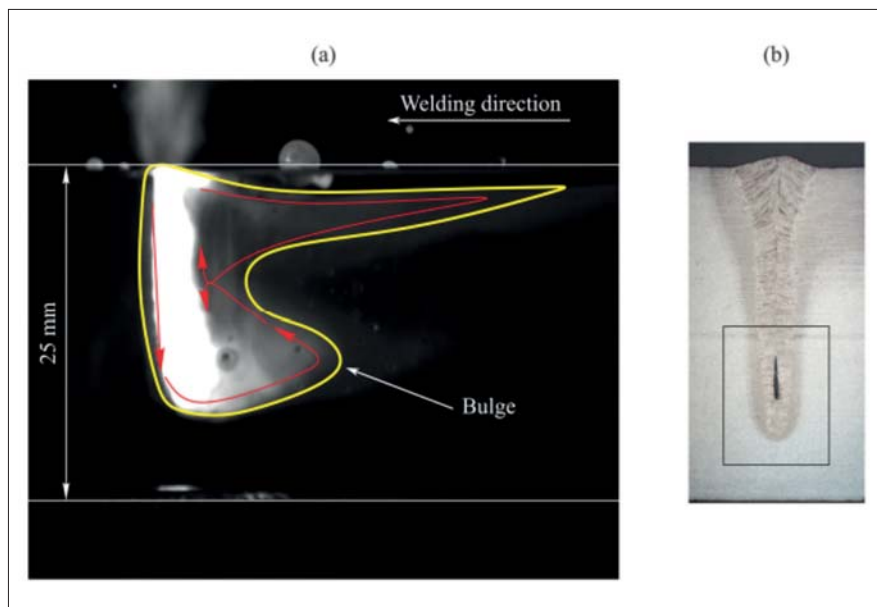
Experimentell studie

De experimentella undersökningar som presenteras i detta kapitel syftar till att bevisa att det finns en utbuktningseffekt i svetsens längsgående sektion. Experimenten utfördes för två olika fall, ett fall med fullständig penetration av 15 mm tjock S355-stålplåt och ett fall med partiell penetration av 25 mm tjock S355-stålplåt.

För den partiella penetreringen användes en Yb:YAG-disklaser, TruDisk 16002 från Trumpf har använts med en maximal utgångseffekt på 16 kW vid en våglängd på 1030 nm och en strålparameterprodukt på 8 mm x mrad. I fallet med fullständig penetration användes en 20 kW fiberlaser IPG YLR-20000 med en emissionsvåglängd på 1070 nm och en strålparameterprodukt på 11 mm x mrad. Båda laserstrålarna överfördes genom en optisk fiber med en kärndiameter på 200 µm. För experimenten användes en särskilt utformad uppställning, som var nödvändig på grund av processens optiska otillgänglighet. För att möjliggöra observation av gränssnittet mellan svetsbadet, användes en stumfogskonfiguration med ett genomskinligt kvartsglas. Det kvartsglas som användes i studien valdes ut i enlighet



Figur 2: Längsgående vy genom kvartsglasat med hjälp av en infraröd kamera enligt [4].



Figur 3: a) observerat smältområde och flödesmönster i den längsgående sektionen genom kvartsglasat med hjälp av en höghastighetskamera. b) Tvärsnitt med stelningssprickor i svetsroten.

med de särskilda kraven på materialegenskaperna. Det måste ge en lämplig genomskinlighet för laservåglängden 1070 nm, samtidigt som det ger tillräckliga termisk-fysikaliska egenskaper, till exempel låg värmeledningsförmåga och värmeutvidgningskoefficient, utmärkt motståndskraft mot termiska stötar och hög smälttemperatur. Gränssnittet mellan glas och stål betraktades som den längsgående delen av svetsen. Följaktligen justerades laserstrålen så att den låg på längsgående plan, så att hälften av laserstrålningen fördelades på stålplattan och den andra hälften på kvartsglasat.

Smältbadets form visualiserades med hjälp av en höghastighetskamera och en infraröd kamera. Sensorn i den infraröda kameran gjorde det möjligt att detektera en infraröd strålning med medelhög våglängd (MWIR) på ljuset, t.ex. från 1000 nm upp till 5000 nm. Höghastighetskameran var försedd med ett filter med en bandbredd på 808 ± 10 nm för att minska processemissionerna och därmed göra det möjligt att känna igen den smälta metallen. Kvartsglasat var helt genomskinligt för hela det infraröda våglängdsområdet för den infraröda kameran och störde därmed

inte laserstrålningen och reflektionerna. Schema över försökssupställningen kan ses i figur 1.

Försökssupställningen är baserad på flera tidigare arbeten med vissa ytterligare förbättringar och ändringar, för mer information se [4, 5]. Motsvarande processparametrar och observationer beskrivs i detalj i följande avsnitt.

Fullständig penetration vid 15 mm tjock S355-stålplåt

Försöket med lasersvetsning med fullständig penetration utfördes på 15 mm tjockt S355-stålplåt med en svets hastighet på 2 m/min, lasereffekt på 18 kW, fokalposition på -5 mm och fokal diameter på 0,56 mm. Realtidsobservationerna av den längsgående sektionen visade att dimensionerna av gränssnittet för svets smältan varierade med tiden längs mitten av penetrationsdjupet.

Mätning med MWIR-kameran bekräftade utbuktningens läge och tidsvariation, vilket visas i figur 2 och diskuteras mer ingående i [5]. Den observerade breddningen förväntades resultera i en fördröjning av stelningen, vilket senare skulle kunna leda till sprickor i detta område. Denna slutsats stämde väl överens med svetsresultaten, t.ex. röntgenfilmer och metallografiska tvärsnitt, eftersom i dessa var platsen för utbuktningen och sprickan nästan densamma, se avsnitt 2.2.

Partiell penetration på 25 mm tjock S355-stålplåt

Försöket med partiell penetrering vid svetsning av 25 mm tjock plåt utfördes med 10 kW lasereffekt vid en svets hastighet på 1 m/min. Observationerna visar att dimensionerna på smältbadet är beroende av penetrationsdjupet. De områden som ligger nära smältbadets yta har en droppform. En utbuktning och dess tidsmässiga utveckling observerades ungefär i svetsroten.

Figur 3a visar ett exempel på en sekvens av smältbadets längsgående profil. De observerade flödesriktningarna är markerade med röda pilar. Två huvudsakliga flödescirkulationer flyttade smältan från framsidan till baksidan av nyckelhålet, vilket säkerställer att massan bevaras. Den första cirkulationen sker i den övre halvan av svets smältan, som huvudsakligen drivs av rekytrycket och Marangoni-spänningen på smältans yta.

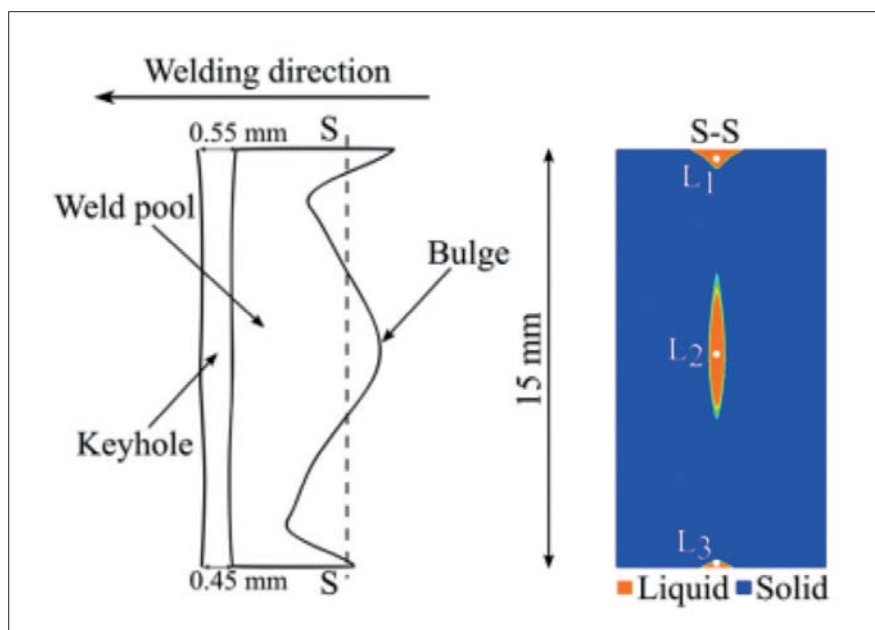
Den andra cirkulationen sker i den nedre halvan av svetssmältan. Den flytande metallen flödar ner från nyckelhålets främre vägg och sedan bakåt och uppåt längs gränssnittet mellan flytande och fast substans, vilket skapar ett cirkulärt flöde i botten av svetssmältan. De två cirkulationerna förenas sedan i mitten av smältan och bildar ett smalt område som skiljer dem åt. Vätskan i det smala området, som kommer från den övre och nedre halvan av svetssmältan, drivs tillbaka till området vid nyckelhålet av de två nämnda virvlarna. Dessutom transporterar smältans återflöden det kylda materialet in i smältans mellersta område, vilket ytterligare sänker temperaturen i detta område och bildar en midja. Den starka smältcirkulationen i nyckelhålsroten leder till att smältan förlängs i längsgående riktning och därmed bildar ett utbuktningssområde. Denna utbuktning främjar sprickbildning genom att bilda en sluten region fylld med smälta som står under dragspänning i slutet av stelningsfasen [10]. Detta leder också till att föroreningar ackumuleras i den slutliga stelningen och bildar lågsmältande faser som (Fe-S), vilket ytterligare bidrar till sprickbildning. Dragspänningarna i utbuktningssområdet kan vara ett resultat av det svetsade materialets inspanningstillstånd eller av krympningsbegränsningen av det relativt kalla materialet runt svetsroten. *Figur 3b* visar ett exempel på en stelningsspricka i svetsroten i utbuktningssområdet.

Numerisk modellering

I detta kapitel behandlas den matematiska beskrivningen av gränssnittet för svetssmältan. Tre numeriska modeller som gör det möjligt att observera utbuktningseffekten, närmare bestämt dess bildning, och dess påverkan på varmsprickbildning och elementtransport i smältbadet. Den första modellen förenklades genom att man använde sig av en fast nyckelhålsgeometri. Detta gjorde det möjligt att återge utbuktningen och undersöka dess effekter på stelningssprickor.

Fördelen med denna modell är en relativt snabb numerisk inställning och korta beräkningstider. Men, den är begränsad till fallet med fullständig penetrering och gör det inte möjligt att undersöka bildningen av utbuktningen.

Därför valdes en andra, mer sofistike-



Figur 4: Resultat från beräkningen av svetssmältan: (till vänster) tredimensionellt längdsnitt av svetssmältan i symmetriplanet; (till höger) flytande metall i tvärsnittet S-S.

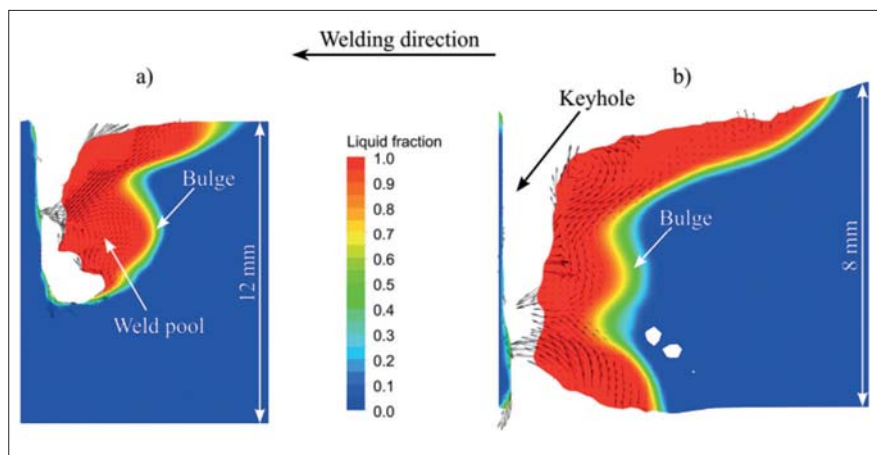
rad metod med ett dynamiskt nyckelhål för att undersöka utbuktningssbildningen, särskilt vid partiell penetrering. Med en sådan modellering kunde man inte bara studera utbuktningssbildningen utan även uppskatta ett kritiskt inträngningsdjup över vilket utbuktningseffekten blir betydande för svetsfogarnas kvalitet. Den tredje modellen var en utvidgning av den dynamiska nyckelhålsmodellen för att simulera svetsprocessen med laser och tillsatsmaterial. Den har tillämpats för att studera utbuktningseffektens inverkan på transporten av legeringsämnen. Det är värt att nämna att beräkningsintensiteten för den andra och tredje modellen överstiger den första förenklade modellen med fast nyckelhålsmetod, vilket innebär att beräkningstiden ökar från timmar till dagar.

Modellering av utbuktningseffekten med en fast nyckelhålsgeometri

Den simulering av smältbad som föreslås här syftar till att få fram en stationär lösning för ett smältbad som innehåller utbuktningssområdet, vilket observerades experimentellt i kapitel 2. Det bör betonas att här att modellen syftar till att studera utbuktningens påverkan på sprickbildningen och inte på bildandet av själva utbuktningen. Modellen är således utformad för att reproducera utbuktningssområdet, inte kvantitativt utan snarare kvalitativt. Gränssnittet

för smältan erhöles som en lösning av det kopplade problemet, som består av ekvationer för bevarande av massa och energi, Navier-Stokes-ekvationer och transportekvationer för den turbulenta kinetiska energin och den turbulenta spridningshastigheten. Modellen byggde på tidigare forskning, varvid ytterligare förbättringar och modifieringar som gör det möjligt att återge den utbuktande effekten, har gjorts.

De viktigaste antagandena sammanfattas här. I den numeriska modellen rör sig arbetsstycket relativt till ursprunget av det Cartesiska koordinatsystemet, som sammanfaller med laserkällans ursprung. En fast nyckelhålsgeometri som delvis härrör från de experimentella resultaten användes som värmekälla i modellen. Detta tillvägagångssätt baserades på tekniken med ekvivalent värmekälla. Antagandet är att rekyltrycket i nyckelhålet balanseras perfekt av ytspänningen. Yttemperaturen i nyckelhålet sattes till förångningstemperaturen för materialet. Enligt resultat som erhållits med en nästan självkonsistent modell för svetsning med laserstråle, kan denna förenkling betraktas som ett giltigt antagande. Modellen tar hänsyn till de viktigaste fysikaliska effekterna, t.ex. Marangoni- och naturlig konvektion, latent smältvärme och temperaturberoende materialegenskaper upp till förångningstemperaturen. En detaljerad analys av den flytande zonen visade hur



Figur 5: Exempel på resultat från beräkningen av svetsmältan: smältans form med en utbuktning under a). partiell penetrering vid 12 mm tjock plåt (7,5 kW, 2 m/min, 0 mm fokusposition), b) fullständig penetrering vid 8 mm tjock plåt (8 kW, 2 m/min, 0 mm fokusposition).

avgörande utbuktningens inflytande på den stationära stelningen kan vara, och ännu viktigare, hur kritiskt det kan vara för bildandet av sprickor. I *figur 4* visas det beräknade longitudinella tvärsnittet av smältans geometri. Gränssnittet för svetsbassängen definierades av liquidus-isotermen, som markeras av den svarta kurvan. För analysen av stelningens beteende i utbuktningens område definierades ett tvärsnitt S-S, se vänster sida i *figur 4*.

Enligt litteraturgenomgången är en av de viktigaste faktorerna för sprickbildning fenomenet fördröjd stelning. Detta fenomen har dock visat sig vara starkt beroende av smältbadets gränssnitt och därmed av utbuktningseffekten. När smältbadet rör sig längs svetsriktningen genom tvärsnittet S-S, erhålls områden

med flytande och fast metall från deras motsvarande överlappning. Som det kan ses på höger sida i *figur 4* finns det tre platser, markerade av punkterna L1, L2 och L3, som innehåller flytande metall överst, i mitten, och vid tvärsnittets botten. Alla tre ställen stelnar i slutskedet, varvid fördröjningen på de övre och nedre områdena beror på det termo-kapillärdrivna flödet. Fördröjningen av stelningen i mitten orsakas av utbuktningseffekten och stelnar sist, vilket gör det till den mest kritiska platsen.

Närvaron av flytande material mellan korngränserna i utbuktningens område i slutskedet av stelningen har en direkt inverkan på sprickbeteendet, eftersom utvecklingen av stelningssprickor under stelningen kräver att det finns en flytande film mellan korngränserna. Därför

kan det uteslutas att utbuktningseffekten leder till lägre sprickbeständighet i detta särskilda område.

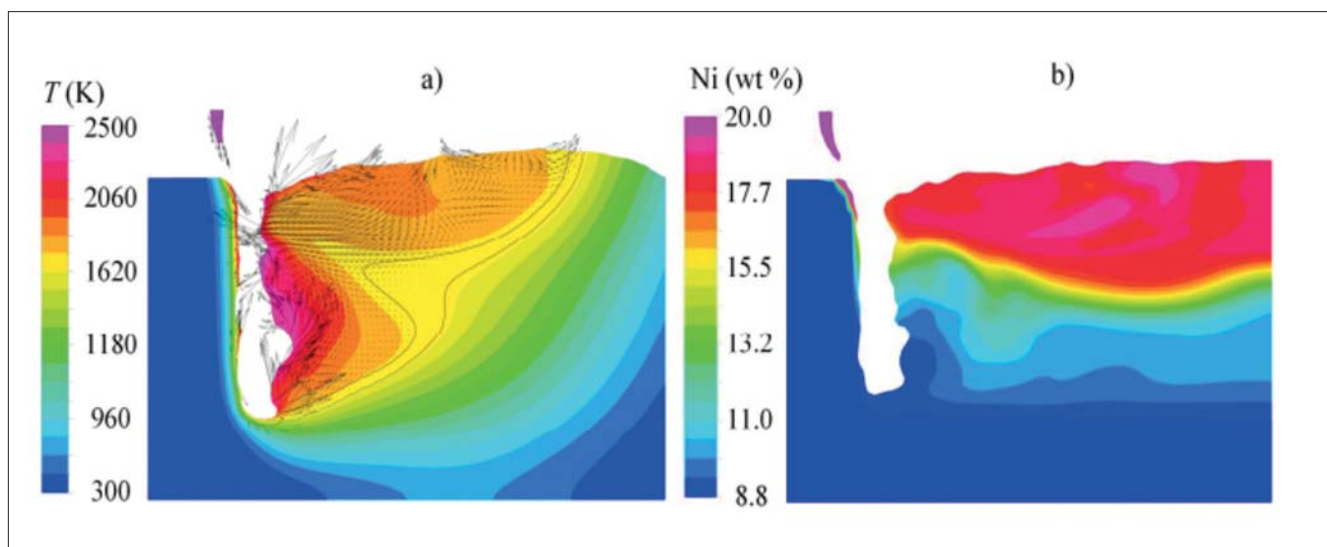
3.2 Modellering av utbuktningseffekten med hänsyn till ett dynamiskt nyckelhål

För att simulera ett dynamiskt nyckelhålsbeteende har flera fysikaliska effekter beaktats i den andra modellen. De viktigaste av dessa sammanfattas nedan. För att möjliggöra en själv-konsistent energi-inmatning implementerades en strålspårningsalgoritm.

Den användes för att beräkna den multipla reflektionen och Fresnel-absorptionen på nyckelhålets yta, och på så sätt direkt bidra till energibalansen på den. Det avdunstningsinducerade rekystrycket, som är en dominerande drivkraft för bildandet av nyckelhålet beräknades. Dessutom har hänsyn tagits till ångans inducerade stagnationstryck och skjuvspänningarna på nyckelhålsväggen.

Den dynamiska nyckelhålsmodelleringen gjorde det möjligt att studera vätskeflödet och därmed bildandet av utbuktningen.

För uppskattning av det kritiska penetrationsdjupet, över vilket utbuktningseffekten blir betydande, har beräkningar med olika plåttjocklekar för både partiell och fullständig penetrering utförts. Det visade sig att utbuktningens område bildas oftare vid partiell penetrering över 6 mm penetrationsdjup, se *bild 5a*. I fallet med fullständig penetrering, bildas utbuktningen redan



Figur 6: Simuleringsresultat av lasersvetsning med tillsatsmaterial med utbuktning i svetsning med partiell penetrering: a) temperaturfördelning och hastighetsfält, b) Ni-fördelning

vid en plåttjocklek på 8 mm, se bild 5b. Placeringen av utbuktningen var, i likhet med de experimentella observationerna, något varierande runt mitten av plåttjockleken.

På grundval av de numeriska resultaten kan man anta att utbuktningseffekten inte är stadigvarande och bildas slumpmässigt längs svetsfogen. Tidsvariationen i utbuktningens dimensionerna orsakas av följande komplexa samverkan mellan de viktigaste krafterna, nämligen de dynamiska fluktuationerna i nyckelhålet på grund av rekyltrycket och ytspänningskrafterna. Den numeriska undersökningen har visat att utbuktningseffekten blir mer avgörande vid lasersvetsning med fullständig penetrering av plåt med en tjocklek som är större än 8 mm.

Modellering av utbuktningseffekten med hänsyn till ett dynamiskt nyckelhål och en fyllnadstråd.

Vanligtvis kommer svetsmältan, tillsammans med utbuktningseffekten, att bli betydligt smalare vid i mittenområdet, vilket kan vara skadligt för metallblandningen. På grundval av modellen i avsnitt 3.2 lades en modell för tillsatstråd till, och transportekvationer för element kopplades ihop, med målet att undersöka hur utbuktningseffekten påverkar elementtransporten vid lasersvetsning med tillsatsmaterial. Den basmetall som användes var rostfritt stål AISI 304 med 8,7 % Ni-innehåll. Den nickelbaserade legeringen Inconel 625 med 58 % Ni-innehåll valdes som tillsatsmaterial i den aktuella studien.

En tillräcklig massöverföring i vertikal riktning krävs för att tillsatsmaterialet ska kunna nå botten av svetsmältan. Figur 6a visar flödet av flytande metall i den långsgående sektionen under svetsning med partiell penetration. Det finns en stark cirkulation i den övre svetsmältan. Den flytande metallen drivs av rekyltrycket och Marangoni-spänningen att strömma bakåt längs den fria ytan, vilket bidrar till smältans långsträckta profil och den tillräckliga metallblandningen i det övre området.

Det bör noteras att en annan dominerande cirkulation förekommer i den nedre svetsmältan. Den flytande metallen nära botten av nyckelhålet strömmar bakåt och uppåt längs gränssnittet mellan fast och flytande material i svetsbadet, och sedan mot nyckelhålets

bakre vägg. Det anses att denna nedre cirkulation kan leda direkt till att uppkomsten av utbuktningseffekten. När utbuktningen är fullt utvecklad, är svetsbassängens mellersta område betydligt smalare. Svetsmältan är nästan separerad av det smalare området, så att ingen nedåtgående flödeskomponent kan observeras. Följaktligen koncentreras det extra Ni från tillsatsmaterialet på den övre delen av svetsen, vilket resulterar i en inhomogen kemisk sammansättning längs tjockleken av svetsfogen, se figur 6b.

Slutsatser

Detta arbete ägnades åt att studera den nyligen bekräftade utvidgningen av svetsmältan, känd som en utbuktningseffekt, och dess relevans vid svetsning med högeffektlaser. En kombinerad experimentell och numerisk metod användes för att undersöka hur utbuktningen påverkar svetsningen, bildning av stelningssprickor och transporten av legeringsämnen i smältbadet.

Följande slutsatser har dragits på grundval av de erhållna resultaten:

- 1) En utbuktning bildades både vid lasersvetsning med partiell och fullständig penetrering av stålplåt.
- 2) Utbuktningseffekten tenderar att uppstå vid djupgående svetsning och spelar därmed en viktigare roll vid svetsning av arbetsstycken med högre plåttjocklek. I den aktuella studien har det numeriskt beräknats att utbuktningen kommer att bildas oftare vid partiell penetrering över 6 mm och fullständig penetrering över 8 mm penetrationsdjup.
- 3) Utbuktningseffekten leder till en ökning av sprickkänsligheten på grund av stelningsfördröjning i sprickområdet.
- 4) Utbuktningseffekten leder till en avsmalning av gränssnittet för smältbadet i den mellersta regionen, vilket kan försämra homogeniteten hos den kemiska sammansättningen i svetsfogen, vilket leder till icke optimala svetsfogsegenskaper. ■

Tack till

Detta arbete finansierades av Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, tyska forskningsstiftelsen). med projekt-nummer 411393804 (BA 5555/5-1) och 416014189 (BA 5555/6-1) och forskningsprojektet IFG 19582N/P1241 "Un-

dersökning av hur begränsningsförhållandena påverkar varmsprickbildning i laser- och laser-hybridsvetsning av stål med tjock struktur" från forskningsföreningen för ståltillämpning (FOSTA), Düsseldorf. Detta projekt har fått stöd från det federala ministeriet för ekonomi och energi genom den tyska federationen för industriella forskningsföreningar (AiF) som en del av programmet för främjande av industriell samarbetsforskning (IGF) på grundval av ett beslut av den tyska förbundsdagen.

Projektet genomfördes vid Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Referenser

- [1] Numerical Analysis of the Partial Penetration High Power Laser Beam Welding of Thick Sheets at High Process Speeds – <https://doi.org/10.3390/met11081319>
- [2] Study on the transition behavior of the bulging effect during deep penetration laser beam welding – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021012709?via%3Dihub>
- [3] Artinov, A., Bakir, N., Bachmann, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2018). Weld pool shape observation in high power laser beam welding. *Procedia CIRP*, 74, 683-686.
- [4] Artinov, A., Bakir, N., Bachmann, M., Gumenyuk, A., Na, S.J., & Rethmeier, M. (2019). On the search for the origin of the bulge effect in high power laser beam welding. *Journal of Laser Applications*, 31(2), 022413.
- [5] Shida, T., Okumura, H., & Kawada, Y. (1979). Effects of welding parameters and prevention of defects in deep penetration electron beam welding of heavy section steel plates, *Welding in the world*, 17(7/8).
- [6] Tsukamoto, S., & Irie, H. (1991). Mechanism of locally delayed solidification in electron beam welding, *Welding international*, 5(3), 177-183.
- [7] Barbetta, L. D., Weingaertner, W. L., Seffer, O., Lahdo, R., & Kaierle, S. (2015). Influence of molten pool geometry and process parameters on solidification cracks formation in hybrid laserGMA welding of thick 5L X70 steel plates.
- [8] Gebhardt, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2013). Numerical Analysis of Hot Cracking in Laser-Hybrid Welded Tubes, *Advances in Material Science and Engineering*.
- [9] Artinov, A., Bachmann, M., Meng, X., Karkhin, V., & Rethmeier, M. (2020). On the relationship between the bulge effect and the hot cracking formation during deep penetration laser beam welding. *Procedia CIRP*, 94, 5-10.
- [10] Bakir, N., Artinov, A., Gumenyuk, A., Bachmann, & Rethmeier, M. (2018). Numerical simulation on the origin of solidification cracking in laser welded thick-walled structures. *Metals*. 8(6): 406.

NOLAMP Conference

Tidigare 17 konferenser av NOLAMP har genomförts innan LTU arrangerade den 18:e i Luleå i januari med Jan Frostevarg, Lasergruppens Ordförande, som huvudansvarig.

Den allra första konferensen anordnades i Oslo 1987 för 35 år sedan, målet från starten har varit att skapa en möjlighet för utbyte av kunskap mellan nordiska forskare och en möjlighet för unga forskare att utveckla ett större kontaktnät inom industri och akademi. När första konferensen hölls var lasertekniken i en expansiv tid vilket den faktiskt har fortsatt vara och därför är denna konferens fortfarande välbesökt och uppskattad.

Konferensen som anordnas vartannat år roterar mellan Sverige, Norge, Danmark och Finland och växlar i storlek men ligger på mellan 50-100 deltagare. Keynote speakers bjuds in från hela Europa men även som presentatörer av sin forskning, även om konferensen framför allt samlar nordiska deltagare.

Jan Frostevarg och hans medarbetare från LTU har tagit fram en sammanfattande artikel från konferensen (sid 2). Mikael Juntti har översatt en intressant presentation från Antoni Artinov m fl. om Utbuktningseffekten och dess betydelse för högeffektsvetsning med laser. (sid 8)

Här kommer tre ompublicerade artiklar från tidigare konferenser, Nolamp 2 (Sverige), Nolamp 3 (Finland) och Nolamp 4 (Danmark) för att visa på den utveckling som konferensen genomgått.



NOSTALGIARTIKEL NR 3 1991

Nolamp3, Lappeenranta

I förra numret av LaserNytt gav vi en kort presentation av den tredje nordiska konferensen om laserteknik för materialbearbetning, NOLAMP 3, som hölls vid Tekniska Högskolan i Lappeenranta (Willmanstrand).

Vi var ca 90 deltagare som fick intressant information om vad som händer inom våra nordiska forskningslaboratorier.

Teknologiska aspekter på laserbearbetning

Det stora föredraget under denna rubrik hölls av Johnny K. Larsson, Volvo Personvagnar AB, som berättade om hur laserteknologin ger bilindustrin nya möjligheter inom konstruktion och produktion (se LaserNytt 2/'91).

Test av laserskärmaskiner

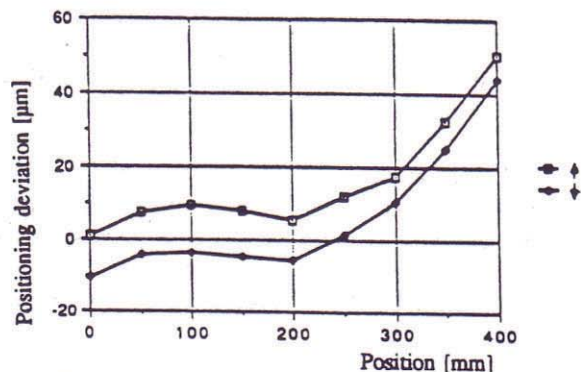
Bård M Brønstad, SINTEF berättade om hur man kan testa noggrannheten hos laserskärmaskiner genom att mäta upp

skurna detaljer. Mätningen kan göras

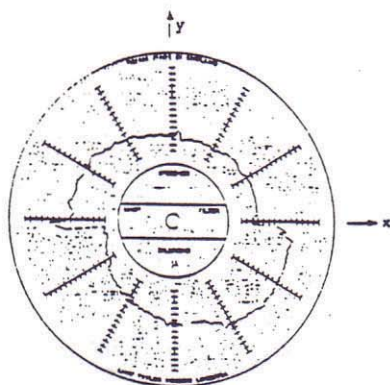
- för att utvärdera utrustning innan inköp
- efter installation för att verifiera prestanda
- efter reparationer
- som rutinkontroll

Resultaten är uppnådda med standardnitrogen med renhet 99,95%. Högre renhet, 99,998% ger inte högre skärhastighet. Inte heller gas med lägre renhet, 99,5% påverkar den maximala skärhastigheten. Här blir dock snittytorna lätt blåfärgade vilket

Vanligast är att testa maskiner statistiskt, figur 1, dvs att kontrollera avvikelser i position axel för axel. Den "dynamiska" provningen, figur 2, där den utskurna detaljen mäts upp, visar produktens slutliga form. Från dessa resultat kan sedan felaktigheter i systemet härledas.



Figur 1 Test av positioneringsnoggrannhet



Figur 2. Rundhetsdiagram för hål (20µm/skalstreck)

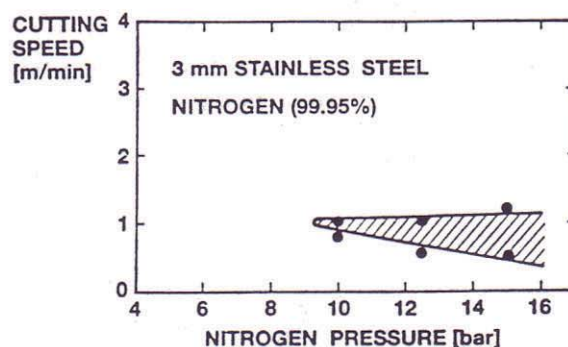
Skärgasen har effekt

Anders Ivarson, Tekniska Högskolan i Luleå, berättade om hur skärgasen inverkar på skärförloppet. Han har genom kalorimetriska mätningar och studier av slaggpartiklar som bildas vid skärningen kunnat beräkna att oxidationen av järn till järnoxid bidrar med ca 40% av energin som tillförs skärfronten vid skärning av kolstål med syrgas. Laser strålen bidrar alltså bara med 60%.

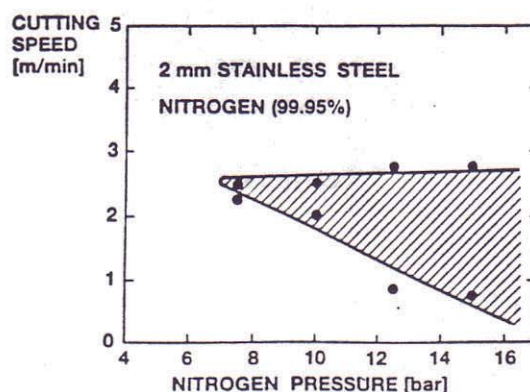
För rostfritt stål bidrar laserstrålen bara med ca 40 % av energitillförsel, medan resterande energi kommer från oxidationsprocesser av järn och krom.

Högtrycksskärning med nitrogen

Hans-Ole Ketting, IPU, Danmarks Tekniske Højskole, har arbetat med högtrycksskärning av rostfritt stål och aluminium. Hans-Ole visade att minimitrycket för att få gradfria snitt ökar med materialtjockleken, figur 3 och 4. Ett något överraskande resultat är att skärhastigheten inte kan ökas nämnvärt om gastrycket ökas över minimitrycket. Men arbetsområdet för slaggfri skärning ökar kraftigt med ökande skärgastryck, vilket naturligtvis är betydelsefullt vid industriell skärning.



Figur 3. Skärområde för 3mm rostfritt stål. 1500 nitrogen.



Figur 4. Skärområde för 2mm rostfritt stål. 1500W/ nitrogen.

antyder att en viss oxidation har skett. Hans-Ole rekommenderar därför att högtrycksskärning bör ske med standardnitrogen (99,95%).

För skärning av aluminium (AlMg2.5) visas att nitrogen är den enda gasen som kan ge acceptabla, slaggfria snitt.

Abrasiv vattenstråleskärning kompletterar laserskärning

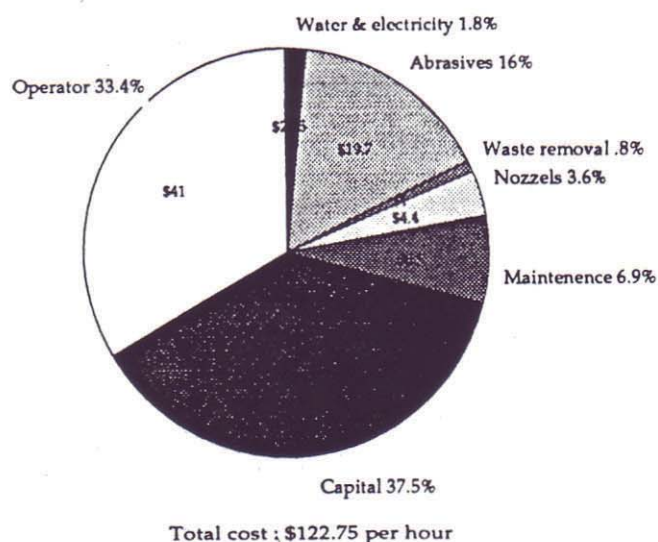
Lars Ohlsson, Tekniska Högskolan i Luleå, presenterade en jämförelse mellan skärning med laser och abrasiv vattenstråleskärning (AWJ).

Han konstaterar att de främsta fördelarna med AWJ är:

- Antalet material som kan skäras är nästan obegränsat. Det är också möjligt att skära i mycket tjockt material.
- Materialet påverkas inte av någon värme under skärprocessen.

Kostnaden för skärning med AWJ är beroende på materialet och vilken snittkvalitet som eftersträvas. Hårda material kräver användning av dyrare

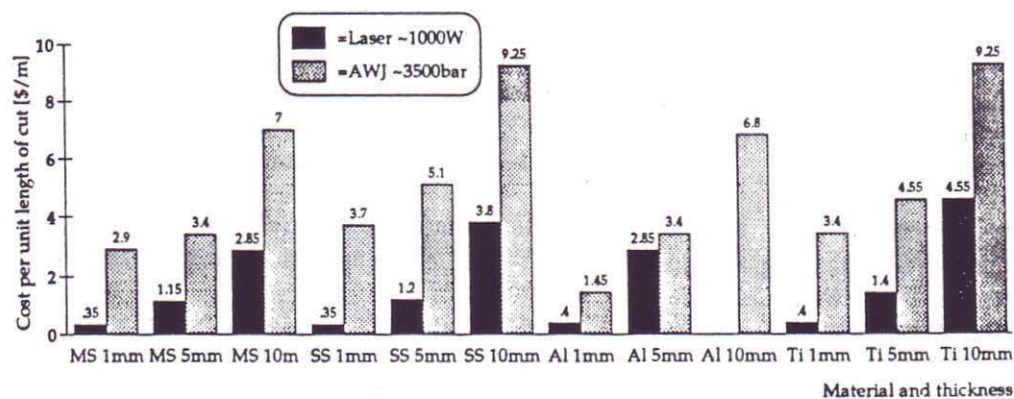
abrasiver, samtidigt som vattentrycket måste ökas, vilket leder till ökade kostnader. Figur 5 visar kostnadsfördelningen för ett normalt AWJ-skärsystem med ett skärhuvud och en pump som ger ett flöde av 3,1 l/min vid 3800 bar.



Figur 5. Kapital och driftkostnader för ett AWJ-skärsystem.

AWJ är inte främst en skärmetod för att skära tunna konventionella material på grund av den låga skärhastigheten. Produktiviteten kan dock ökas markant genom att använda flera skärhuvuden om pumpkapaciteten räcker till. Figur 6 visar en kostnadsjämförelse mellan skärning med AWJ med ett skärhuvud och CO₂-laser.

AWJ är en huvudsakligen en skärmetod för tjocka material och för material som är termiskt känsliga. Därmed är metoden mera kompletterande än konkurrerande med laserskärning.



Figur 6. Skärkostnad per meter för AWJ och CO₂-laser

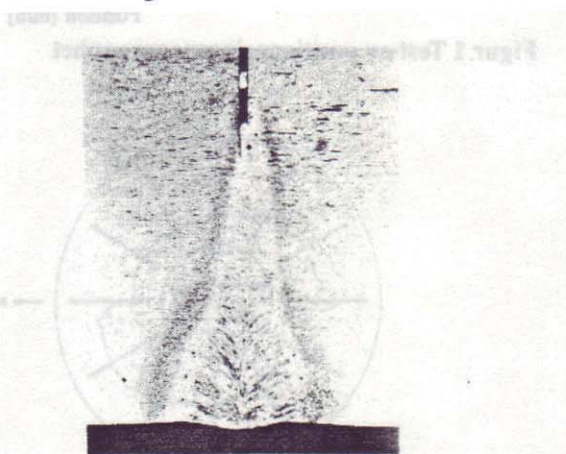
MS= kolstål
SS= rostfrittstål

Lasersvetsning med höga effekter

Svetsning i tunnt gods är en realitet inom industrin sedan många år. Nu undersöks möjligheterna att svetsa tjockt material med lasereffekter på 10 kW och däröver. Vid FORCE Institutet i Köpenhamn pågår projekt inom detta område, där man också använder tillsatsmaterial i form av tråd.

Figur 7 visar en svets utförd med tillsatsmaterial där spaltbredden var 0,5 mm. Tillsatsmaterialet gör att bl.a svetsdiken kan undvikas för detaljer där fogberedning eller andra förhållanden gör att det finns en spalt. Användningen av tillsatsmaterial inverkar dock negativt på lasersvetsningens huvudfördelar; hög svetshastighet och stort djup till bredd förhållande.

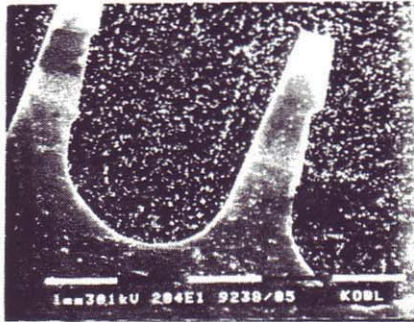
Steen Erik Nielsen konstaterar att det är möjligt att förändra egenskaper och form hos en lasersvets genom att använda tillsatsmaterial och variera svets- och trådparametrar, som t.ex matningsriktning. Det blir därför mekaniska och geometriska krav som bestämmer hur svetsförhållandena skall utformas för varje enskild svetsfog.



Figur 7. Lasersvets i kolstål med tillsatsmaterial. Effekt 10kW, svetshastighet 500 mm/min, spalt 0,5 mm, penetration 13,3 mm, tråddiameter 1mm, trådhastighet 2500mm/min.

Nd:YAG-laser ger nya möjligheter vid påsvetsning

Den pulssade YAG-lasern har en stor potential för påsvetsning av mindre ytor anser **Thomas A. Jensen** vid FORCE Institutterne i Köpenhamn. Det är möjligt att påsvetsa skikt med tjocklekar i området 0,3-0,4 mm med liten uppblandning utan sprickbildning. Speciellt vid påsvetsning av små komponenter ger YAG-lasern fördelar. Figur 8 visar ett exempel på hur en sliten detalj kan reparationssvetsas med YAG-laser, genom att svetsa flera lager på varandra. Efter påsvetsning slipades ytorna till färdigt mått. Detaljen är en koppling mellan kompressor- och turbindelen i en turbo-prop motor.

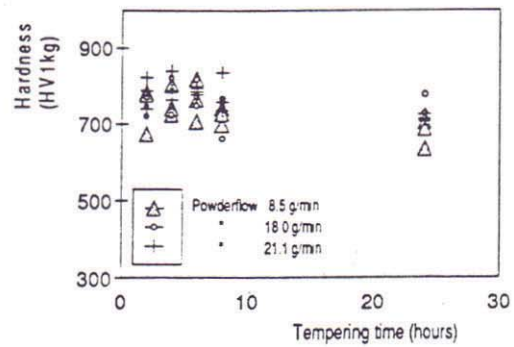


Figur 8. Reparationspåsvetsad motordetalj i Inconel 718. Påsvets-material Hasteloy C.

Upplagering med krom ger hårda, värmeståliga ytor på gjutjärn

Gjutjärn är en materialgrupp som generellt uppvisar goda glidegenskaper i många olika applikationer. Vid Tekniska Högskolan i Luleå arbetar **Greger Wiklund** m.fl med att försöka förbättra glidegenskaperna mellan kolvringar och cylinderfoder.

Laserupplagering med krom är en möjlighet att minska slitaget hos dessa komponenter, som arbetar vid förhöjda temperaturer. Generellt sjunker hårdheten från HV750 till HV710 hos upplegerade ytor efter värmebehandling vid 520 °C i 24 tim, medan ytomsmält material av samma kvalitet minskar i hårdhet från HV756 till HV657 efter 8 timmar vid 550 °C.



Figur 9. Hårdhet hos kromlegerat perlitiskt segjärn efter värmning vid 520 °C

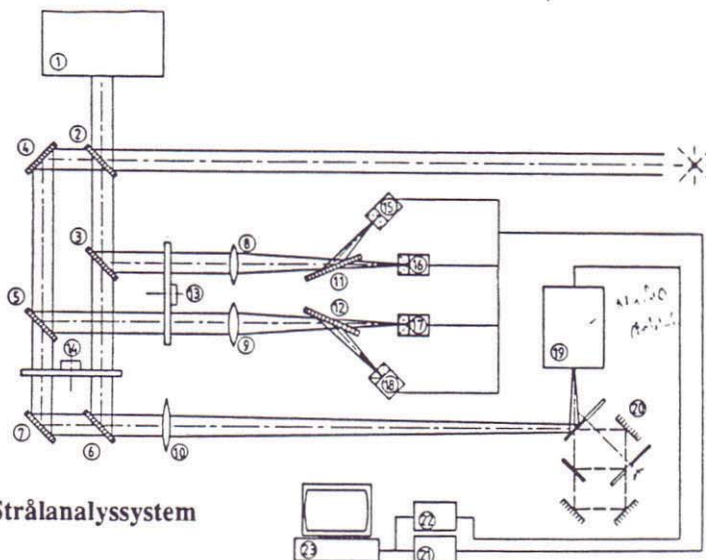
I de upplegerade zonerna har legeringshalter på 24,5 % krom uppmätts. Kromhalten kan varieras genom att ändra t.ex pulvermatningen.

Adhesiva slitageförsök mot perlitiskt gråjärn uppvisar acceptabla resultat för små belastningar, medan högre belastningar ger scuffing på de upplegerade ytorna eller alltför stort slitage på fodermaterialet.

Nytt mätförfarande visar CO₂-laserstrålens kvalitet under drift

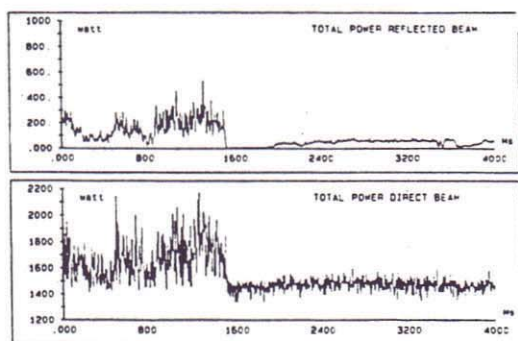
Ole Gregersen vid Danmarks Tekniske Højskole, Köpenhamn, har utvecklat ett nytt mätsystem för att karakterisera laserstrålen både under stationära förhållanden och under bearbetning, figur 10.

Systemet är uppbyggt på pyroelektriska givare. Förutom att man samtidigt kan registrera effektvariationer, polariseringsgrad och intensitetsfördelning, kan systemet också detektera stålens geometriska utbredning och därmed beräkna K-värdet hos laserstrålen. (K-värdet är ett mått på hur mycket strålens intensitetsfördelning avviker från den Gaussiska.). Figur 11 visar exempel på mätningar under högtrycksskärning av aluminium, både när strålen inte penetrerar materialet och när skärkvaliteten är optimal.



- Pos.1: Laser
- Pos.2-6: Beam splitters
- Pos.7: Mirror
- Pos.8-9: Focus. lens 5"
- Pos.10: Focus. lens 20"
- Pos.11-12: Polarization filter
- Pos.13-14: Choppers
- Pos.15-18: Power detectors
- Pos.19: Mode camera
- Pos.20: Mirror chopper
- Pos.21: A/D-converter
- Pos.22: Frame grabber
- Pos.23: Computer

Figur 10. Strålanalysystem



Total power levels (Pp+Ps) in reflected and direct beam.

Figur 11. Strålkarakterisering under högtrycksskärning av aluminium. Effekt=1500W(injusterad), skärhastighet 1200mm/min.

Den totala effekten i strålen har under reflektionsfasen (tiden då strålen inte skär igenom materialet) ökat till ca 1800W. Detta är den aktuella effekten på arbetsstycket och representerar summan av effekten från själva laserresonatoren och "resonatoren" som uppstår mellan laserns utgångspegel och arbetsstycket. K-värdet tycks minska när reflektion uppträder och denna förändring förorsakas av en minskning av stråldiametern och positionen hos strålens midja. På DTH pågår nu en utveckling och utprovning av ett portabelt strålanalysystem uppbyggt enligt samma principer.

Lasersäkerheten får inte negligeras

I en undersökning från USA, publicerad 1989, har orskerna till 25 stycken rapporterade olyckor (skador) undersökts, berättar Jan Flinkfeldt, Tekniska Högskolan i Luleå. Det visas sig att de flesta olyckorna gav ögonskador, tabell 1.

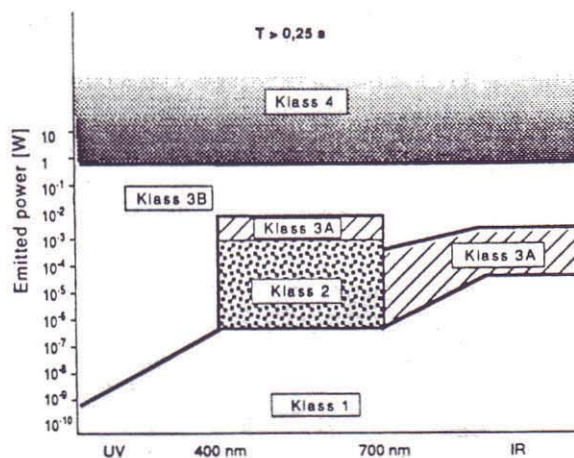
Tabell 1 Orsaker till olyckor under laseranvändning

Grupp	Orsak till olycka	Procent
1	Oförutsedd ögonexponering under upplinjer	28
2	Felaktigt handhavande av högspänning	16
3	Val av fel ögonskydd /fel på ögonskydd	16
4	Bristande skydd för underordnade risker	12
5	Tillgängliga ögonskydd ej använda	8
6	Exponering av ögon/hud under användning	8
7	Ej fungerande utrustning	8
8	Felaktigt återställande av utrustning efter service	4

Högspänningsolyckorna hade dödlig utgång i två fall. Skadade personer var operatörer, ingenjörer, servicetekniker, studenter och forskare. Resultaten från undersökningen understryker nödvändigheten av adekvat utbildning i lasersäkerhet för alla personalkategorier som arbetar med laser.

Klassning av lasrar bygger på internationell eller amerikansk standard, IEC 825 respektive ANSI Z136.1 och utgår från

maximalt tillåtna exponeringar för strålningen. Klassningen kan sammanfattas i figur 12, där det kan vara värt att poängtera att bearbetningslasrar alltid klassas som Klass1 eller Klass4-lasrar.



Figur 12 Laserklasser

- Klass 1: Kan inte ge skadliga emissionsnivåer
 Klass 2: Synlig emission vid låg effekt. Tillåter direkt exponering i ögat för kortare tider än 0,25 s.
 Klass 3A: Farlig strålning vid beraktande geom fokuserande optik
 Klass 4: Skadlig strålning. Direkt eller reflekterad strålning kan förorsaka ögon och hudskador. Brandrisk.

För att försäkra sig om en fullständig lasersäkerhet krävs ett långsiktigt, målmedvetet arbete. Ett led i denna strävan är att utse en lasersäkerhetsofficer, LSO, (IEC 825 resp. ANSI Z136.5), som skall ges komplett utbildning samt ansvar och befogenheter att kontrollera och förstärka lasersäkerheten.

Ett komplett säkerhets- och miljöarbete kräver också att andra risker som t.ex skadliga emissioner från bearbetningsprocessen minimeras eller allra helst elimineras.

Det nyligen påbörjade stora Eurekaprojektet EU 643, "Eurolaser- Safety in Industrial Laser Application" kommer att innehålla arbete för att kartlägga och begränsa flertalet av de risker som finns inom området. Information om projektet kan lämnas av Jan Flinkfeldt eller Claes Magnusson vid Tekniska Högskolan i Luleå.

Hans Engström

NOLAMP 2 - Nordisk Laserkonferens med mersmak

Den 30-31 augusti hölls för andra gången den nordiska laserkonferensen, NOLAMP. Denna gång var Tekniska Högskolan i Luleå arrangör och vi hade förlagt den till ett nygammalt konferenscenter i Piteå, som är grannstad till Luleå och som är vida berömt för sina fina havsbad och sköna somrar. Snart finns man också med på konferenskartan, då lokaler och arrangemang var förstklassiga.

Inledningsvis summerades utvecklingen inom laserområdet av prominenta företrädare för det nordiska forsknings-etablissemangen. Slutsats: marknaden i Sverige har verkligen lyft - ca hälften av alla CO₂-lasrar i industriell tillverkning är installerade under de senaste tre åren. Utvecklingen i de andra nordiska länderna går betydligt långsammare.

Slitstarka aluminiumytor

Konferensprogrammet var mycket tätt och innehållsrikt. Inom området ytmodifiering vill jag speciellt nämna ett föredrag presenterat av Katarina Löwenberg (SI) med rubrik "Surface Modification of Aluminium". Genom att upplegga aluminiumytor med nickelpulver som plasma-sprutats till 0.1 mm tjocklek har hårdheter i ytskiktet på ca 600 HV0.25 uppnåtts. Nötningsmotståndet vid abrasivt slitage har som bäst ökat ca 4 gånger jämfört med obehandlad aluminium.

Svetsning av zinkbelagd plåt - lösning på väg

Problemet att svetsa zinkbelagd plåt kan vara på väg att lösas genom att använda pulsad CO₂-laser. Klas Nilsson (LuH) presenterade de senaste rönen inom sin forskning.

Nytt kvalitetsmått för laserskurna ytor

Ett nytt sätt att se på kvaliteten hos laserskurna ytor och på prestanda hos olika skärlasrar presenterades av J.T. Gabzdyl (SI). Intressant, men kanske en aning för tidskrävande för industrin att göra de mätningar som krävs. Idéer om att förenkla kvalitetsmättet diskuterades också under konferensen, (se separat notis).

Skärning med högren oxygen - en kostnadsfråga?!

Skärning med högren oxygen kan motiveras ekonomiskt enligt Hans-Ole Ketting (DTH), som i denna fråga refererade till en tysk undersökning. Värde av den ökade gaskostnaden är alltså mindre än värdet av den ökade produktiviteten som man kan uppnå, (se separat notis).

Flexibiliteten ökar - rörskränning i standardmaskiner

Nu finns också möjligheten att kombinera håltagning och profilskärning av rör med vanlig traditionell 2-D skärning, enligt P. Schwartzenbach, Bystronic Laser AG, som presenterade en relativt ny maskin, BYFLEX. Runda rör med upp till 300 mm diameter kan skäras. Programmeringen är förenklad genom "interna rutiner" i CNC-systemet.

Nd:YAG med fiber och robot ger nya möjligheter för Volvo

Dag Wallander, Volvo Personvagnar, Göteborg, berättade om Volvos utvecklingsprogram för att använda Nd:YAG-laser, fiber och industrirobot för skärning och svetsning av karosser och karosseridetaljer. Man är nu inne i tredje steget som innebär att systemet YAG-laser/fiber/6-axlig robot testas på 3D-detaljer. Dag visade en kortare video där systemet kunde ses i arbete. Volvo testar också speciell utrustning för att öka precisionen och snabbheten för skärning och svetsning av mindre runda geometrier. Lumonics och KUKA deltar, av vad jag kunde förstå, ganska aktivt i utvecklingsprogrammet vars slutmål bland annat är att göra produktionstester på karosser.

Min slutsats från konferensen är att det nordiska utvecklingsarbetet inom området håller god standard. Forskningsorganisationerna verkar dessutom väl medvetna om industrins intressen och agerar därefter. Att sen vissa projekt inte har nått den mognad som gör dem direkt tillämpbara industriellt idag tycker jag inte är någon belastning - de hör definitivt framtiden till

Hans Engström, Tekniska Högskolan i Luleå.

LaserNytt ges ut av Lasergruppen
inom Sveriges Verkstadsindustrier
Box 5506, 114 85 Stockholm
Ansvarig utgivare Claes-Göran Dahl
Telefon 08-783 82 02
Telefax 08-660 33 78
Redaktör Hans Engström
Telefon 0920-91269, vx 0920-91000
Telefax 0920-99309, 97288

4:e NOLAMP konferensen – den bästa hittills

Den fjärde NOLAMP-konferensen, som är den enda Nordiska laser-konferensen, hölls denna gång i södra Danmark, i den idylliska staden Sønderborg.

Konferensen blev den bästa hittills både vad gäller kvalitet och omfattning. Totalt presenterades 35 föredrag varav de allra flesta kom från Danmark och Sverige.

Tanken med NOLAMP-konferensen är att vartannat år samla den nordiska laserforskningsfamiljen och den nordiska industrin till en avspänd och gemytlig sammankomst med laserbearbetning som tema. I år kom 75 deltagare, vilket är mycket med tanke på de bistra tiderna.

Dansk industri på plats

Den danska industrin var förhållandevis väl representerad med deltagande i fem föredrag, medan det endast var AGA AB och i viss mån ETP Transmission AB som försvarade de svenska färgerna. Även denna gång fanns Pieter



Här i den idylliska staden Sønderborg på Jyllands sydspets hölls den mycket uppskattade NOLAMP-konferensen.

Schwarzenbach från Bystronic Ltd, Schweiz på plats; denna sympatiska gentleman höll två föredrag om svetsning och skärning.

Öka intäkterna-svetsa med Din skärlaser

Det krävs inte stora förändringar för att

kunna utnyttja ett skärsystem för lasersvetsning hävdar Pieter Schwarzenbach, Bystronic Laser Ltd. För att skapa ett s.k. key-hole, som är nödvändigt för att få djupa, smala svetsar krävs tillräcklig energitäthet och här är en bra strålkvalitet viktig.

forts. →

Ur innehållet	sid		sid
4:e NOLAMP konferensen	1 - 6	Amada skär två plåtar	13
Münchenmässan Laser '93	7 - 9	Nya medlemsföretag	13
Plåtspecialisten i Örebro	10	Laser- och gasskärning skär tjockare plåt	14
Alfa-Laval Thermal AB	11	Ny doktor i laserbearbetning	15-16
Volvos Tekniska stipendium	12	Laserdagen hos Volvo Flygmotor	16

Vid svetsning startar normalt rörelsen innan strålen släpps på. Vid slutet av svetsen minskas effekten innan rörelsen stoppas för att undvika att det uppstår ett stort hål i svetsen från "nyckelhålet".



Pieter Schwarzenbach, Bystronic Laser Ltd berättar om lasersvetsning i skärmaskiner.

Fixturering viktig

Eftersom en lasersvets är mycket smal krävs att stålen eller arbetsstycket flyttas mycket exakt (oftast inom 0.1 mm eller bättre), vilket kräver en exakt maskin. Därför är noggrann fixturering ett måste för att uppnå bra svetsresultat. Fixturen måste dessutom vara tillräckligt stark för att klara de mekaniska krafter som uppstår genom den termiska utvidgningen, trots att denna är liten.

Den noggranna fixtureringen kräver exakta detaljer vid svetsningen; tänk på att en spalt på 0,2 mm är tillräcklig för att Du inte skall få någon svets alls.

Tre viktiga krav

För fokusering av laserstrålar upp till ca 3 kW används ofta linser med fokallängd 100 till 150 mm. Kväve är ofta acceptabel som skyddsgas (se dock upp med porer i vissa material). Om det krävs en ädelgas kan argon användas upp till ca 2kW; däröver är helium att föredra för att minska mängden plasma.

Ofta kan ett acceptabelt svetsresultat erhållas om tre krav är uppfyllda:

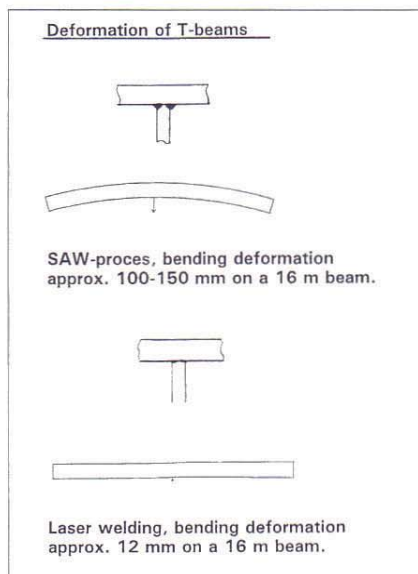
- arbetsstycket är exakt positionerat
- arbetsstycket är rent
- ett bra lasersystem finns tillgängligt

Kvalitetskontroll kan i enkla fall ske genom visuell inspektion medan mera krävande svetsning kan kräva olika typer av förstörande provning.

Pieter Schwarzenbach föreslår att man skall använda en absorbatör för reflexer som går tillbaka i resonatorn. Då kan man undvika att ståls kvaliteten förändras till det sämre och att optiker i lasern tar skada. För svetsning av aluminium och koppar är en absorbatör helt nödvändig. Ett skärsystem kan alltså användas för svetsning efter mindre modifikationer och kan ge värdefull erfarenhet för framtida satsningar. Svetsjobb är ofta också mycket lönsamma.

Lasersvetsning inom varvsindustrin

Hittills har lasersvetsning inte haft någon större framgång för svetsning inom den tunga industrin. Men nu pågår ett mycket omfattande program för att införa lasersvetsning i varvsindustrin berättar Michael Sellerup, Odense Steel Shipyard Ltd. Det har länge funnits ett behov att hitta en ny svetsmetod för att överbrygga svagheter i de traditionella svetsmetoderna som kvalitet, effektivitet, hälsa och säkerhet och kanske det viktigaste - möjligheten att automatisera. Lasern ger viktiga fördelar vid svetsning av tunga komponenter; hög hastighet, små deformationer, stor penetration och enkel automatisering.



Deformationer vid pulverbågsvetsning jämfört med lasersvetsning.

Stor potential för lasersvetsning

Internationellt lägger man ner mycket arbete på att utveckla lasrar och distributionssystem för stålen, berättar Michael, men det är också av fundamental betydelse att man ägnar stor omsorg åt materialegenskaper hos lasersvetsat gods. Potentialen för lasersvetsning inom varvsindustrin är stor.

En tankar på 300 000 dödviktston kan

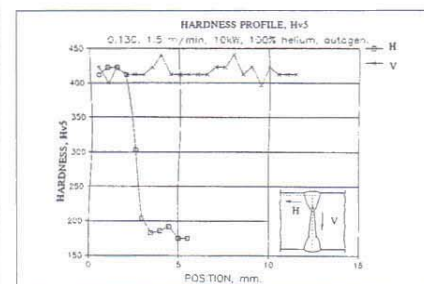
innehålla upp till 300 000 meter svets. Men innan lasersvetsning kan accepteras måste naturligtvis flera frågor besvaras:

- Är lasersvetsat material dugligt uppgiften?
- Kan lasersvetsning godkännas av de internationella klassningssällskapen?
- Kan lasersvetsning motiveras ekonomiskt - en investering i lasersvetsning är mer än tre gånger så dyr som en investering i traditionella svetsmetoder.

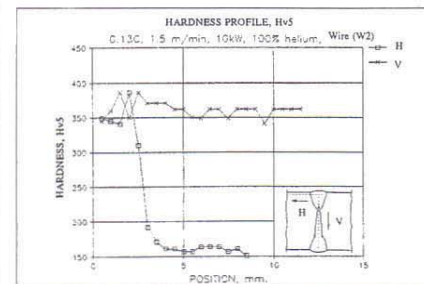
Lasersvetsning av kol/mangan-stål

Lasersvetsning av traditionella material som kol/mangan-stål, vilket är en vanligt använd materialtyp inom varvsindustrin, ger på grund av den snabba termiska cykeln upphov till martensit i svetszonen. Martensit är en hård och spröd fas med låg duktilitet. Men genom att använda speciella tillsatsmaterial och/eller speciell skyddsgas kan martensitbildningen undertryckas och de mekaniska egenskaperna förbättras, berättar Jens K. Kristensen, Force Institutet.

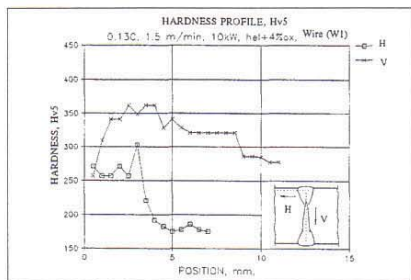
Normal lasersvetsning utan speciella procedurer ger hårdheter i svetszonen som visas i figur 1, medan användning av en lågkolhaltig (0,003 C) tillsatsstråd sänker hårdheten radikalt, figur 2. Bästa resultat, HV5 320, har erhållits för svetsning med en tillsatsstråd som innehåller 0,08 ppm syre kombinerat med en speciell skyddsgas som bestod av He + 4% syre.



Figur 1. Hårdhetsprofil i kol/mangan stål längs svetsens centrallinje samt 1 mm under ytan.



Figur 2. Hårdhetsprofil i kol/mangan stål längs svetsens centrallinje samt 1 mm under ytan. Tillsatsmaterial: lågkolhaltig tråd.



Figur 3. Hårdhetsprofil i kol/mangan stål längs svetsens centrumlinje samt 1 mm under ytan. Tillägsmaterial: Tråd innehållande 0,08 ppm syre; Skyddsgas: 4% oxygen, 96% helium.

Utvärdering av mikrostrukturen och dragprover visar att strukturen har blivit mera duktil.

Laserskurna stansverktyg

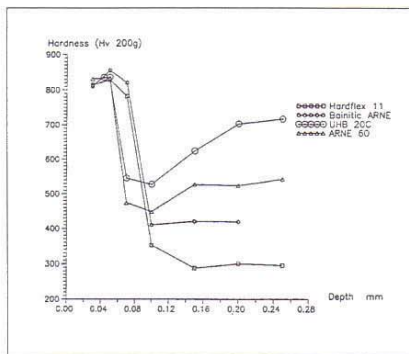
Utvecklingsarbetet med att göra tillverkningen av stansverktyg snabbare och billigare genom laserskärning har pågått under ca 10 år. Idag finns ett flertal företag i Japan som tillverkar prototyp- och kortserieverktyg med laser. Vid Danska Teknologiska Institutet har man också studerat ämnet, berättar Karin Götzsche-Larsen, eftersom det är svårt att direkt översätta de japanska forskningsresultaten till europeiska förhållanden, främst genom att det är mycket svårt att få tag på samma materialkvaliteter som japanerna använder.

I denna undersökning har man testat tre stål, UHB Arne, UHB 20C, och Hardflex 11, tabell 1. Eftersom japanerna starkt har rekommenderat användningen av bainithärdade stål, har UHB Arne testats både i konventionellt härdat tillstånd (60 HRC) och bainithärdat och anlöpt tillstånd (45 HRC). UHB 20C är ett vanligt klippstål. Hardflex 11 tillverkas av Sandvik och levereras i bainithärdat tillstånd.

Härdad skärkant

Laserskärning ger som väntat en mycket hård skärkant, figur 4, och de härdade stålen uppvisar också en anlöpt zon med mjuknat material ca 0,1 mm från snittytan.

Klippkanten hos ett klippverktyg behöver både vara hård och seg. Just segheten och det faktum att materialet



Figur 4. Hårdhet i snittytan hos laserskuret material.

inte behöver hårdas gjorde att Hardflex 11 valdes för tillverkning av två testverktyg.

Minska spelet

I ena verktyget värmebehandlades dynplåten i 250 °C i 30 minuter efter laserskärningen. Efter 1000 stansade rondeller visar den värmebehandlade dynan en något mindre avrundning än den obehandlade. Dock var graderna hos rondellerna större än normalt. Man kunde visa att detta berodde på att spelet, som var satt till 0,1 mm, ökade under klippet till ca 0,15 mm. Även test med

Rekommendationen blir sålunda att spelet mellan stämpel och dyna bör minskas 10-20%.

Teorier för laserskärning

Två föredrag handlade om teorier för laserskärning. Flemming Olsen, Danmarks Tekniske Højskole, presenterade sina under rubriken "Laser Cutting Theory". John Powell, Tekniska Högskolan i Luleå och Laser Expertise Ltd, visade med en förhållandevis enkel modell hur energin används vid laserskärning med inert gas.

Det leder lite väl långt för oss lekmän att tränga djupt in i dessa teorier. Den intresserade läsaren må gärna själv kontakta de lärde inom området för ingående beskrivningar av teorierna. *LaserNytt* gör därför en mycket kort, och därmed kanske en inte fullt rättvisande sammanfattning av föredragen.

50% förluster

John Powell visar i sin modell att bara ca 50 % av den tillförda lasereffekten används för att generera snittet. Resten är förluster. 10% är primära förluster, dvs



Flemming O. Olsen emottager högtidligen belöningen, 50 cm dansk pölse, för sina insatser som chairman för en av sessionerna vid NOLAMP 4.

ett verktyg med mera komplicerad form visade att graderna blev större än för konventionella verktyg. Det anser man beror på att deformationerna hos ett laserskuret, laminerat verktyg är större än hos ett konventionellt verktyg.

förloras ur skärzonen som 10,6 µm laserstrålning, 50 % är konduktiva förluster (värme som leds bort i materialet, 2% är konvektionsförluster (skärgasen värms upp) och ca 1 % är strålningsförluster.

Flemming Olsen konstaterar bl. a att mekanismerna för skärprocessen i princip är oberoende av värmekällan, dvs processen är densamma oavsett om Du laserskar eller t.ex. gasskar. Han konstaterar också att det smälta materialet på skärfrontens sidor är så tunt att uppkomsten av striationerna (räfflingen i skärsnittet) förmodligen förorsakas av

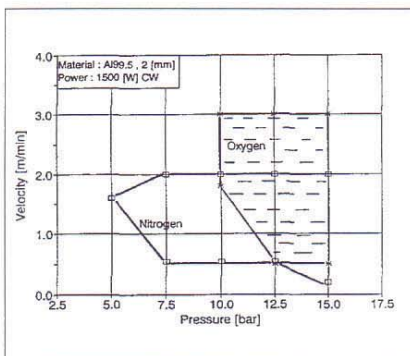
Tabell 1. Mekaniska egenskaper hos de testade stålen

	Hårdhet [HRC]	Sträckgräns [N/mm ²]	Förlängning A10 [%]
UHB Arne	62	2260	—
	45	1280	—
UHB 20C	51	1650	7-10
Hardflex11	36	950	14

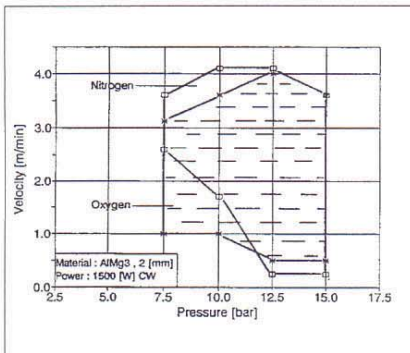
fundamentala instabiliteter i kombinationen av konduktiv och konvektiv värmeledning i skärriktningen. Teoretiska och experimentella studier indikerar att vid höga skärhastigheter så blir flödet av smält metall påverkat av förångning, vilket ger sämre snittkvalitet.

Skärning av aluminium

Skärning av aluminium är ett aktuellt ämne eftersom detta blir mer och mer utnyttjat som konstruktionsmaterial. Torben Kristensen, Danmarks Tekniska Högskola, presenterade flera intressanta resultat som visar att skärresultatet beror på materialets sammansättning, ytbeläggning och om strålen pulsas eller ej. Figur 5 och 6 visar området för slaggfria snitt vid skärning av Al99,5 respektive AlMg3 med oxygen och nitrogen som skärgas.



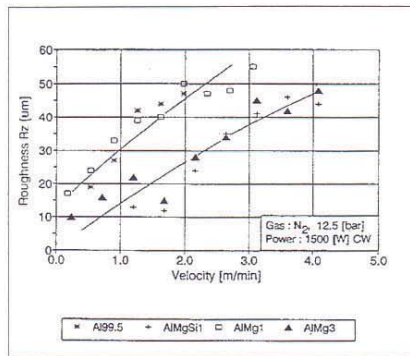
Figur 5. Slaggfritt område för Al99,5



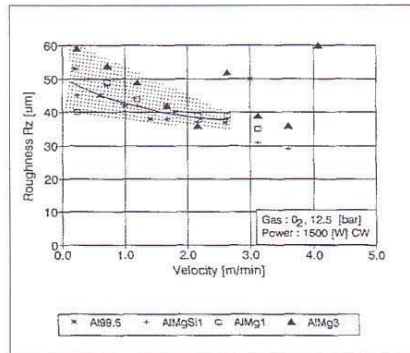
Figur 6. Slaggfritt område för AlMg3.

Ytjämnheten varierar med skärhastighet och skärgas, figur 7 och 8. När nitrogen används som skärgas syns ett tydligt linjärt samband mellan ytfinhet och skärhastighet. I "höglegerade" material blir ytfinheten bättre. För oxygen är tendensen att bästa ytfinhet uppnås vid högsta skärhastighet.

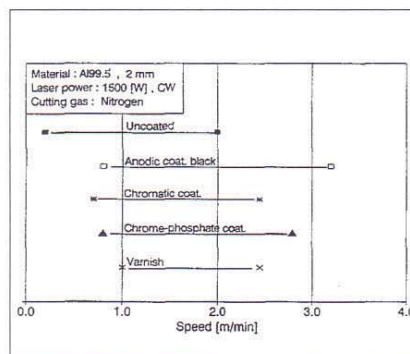
Skärhastigheten beror också på ytans sammansättning, figur 9 och 10. För skärning med pulsad stråle kan man uppnå samma skärhastighet med 635 W medeleffekt som vid kontinuerlig skärning med 1500 W, figur 11.



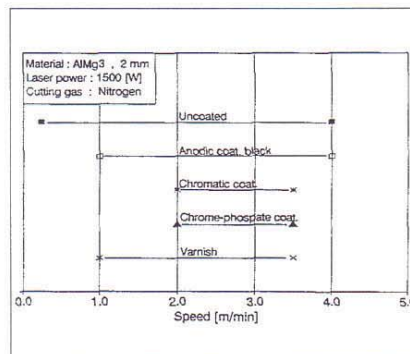
Figur 7. Ytfinhet som funktion av skärhastighet, nitrogen 12,5 bar.



Figur 8. Ytfinhet som funktion av skärhastighet, oxygen 12,5 bar.

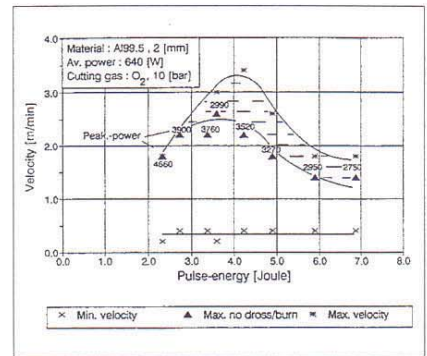


Figur 9. Skärområde för slaggfria snitt i Al99,5.



Figur 10. Skärområde för slaggfria snitt i AlMg3.

En förklaring är att den högre effekttätheten i den pulshade strålen kan resultera i förångning och jonisering av den smälta metallen, vilket ökar absorptionen.



Figur 11. Skärhastighet som funktion av pulsenergi för 2mm Al99,5, oxygen.

Laserytbehandling ger högre friktion

När man diskuterar laserytbehandlingens möjligheter tänker man ju främst på att kunna minska slitaget, dvs att minska friktionen mellan två ytor. Men det finns tillfällen när man vill åstadkomma hög friktion mellan två ytor, som t.ex. i friktionsförband. Greger Wiklund, Tekniska Högskolan i Luleå arbetar tillsammans med ETP Transmission AB i ett projekt som just syftar till att uppnå hög friktion mellan ståltytor.

Det visar sig att laserytomsmälta spår placerade vinkelrät mot glidriktningen ökar friktionen med 40% jämfört med obehandlade ståltytor.

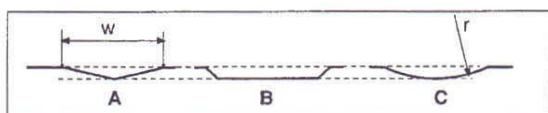
Tunt karbidskikt

En annan teknik är att smälta fast karbider i ett tunt skikt, $\approx 40\text{--}50\mu\text{m}$, så att ytan får en struktur liknande sandpapper. Försök utförda på en ETP-bussning visar att det överförbara vridmomentet ökar ca 50%. Dock tenderar också passningsrosten att öka. Därför måste alternativa placeringar av den ytbehandlade zonen i bussningen undersökas.

Påsvetsning i spår

Någon form av efterbearbetning är i de allra flesta fall nödvändig efter laserpåsvetsning. De flesta använda påsvetsmaterial är hårda och nötningsbeständiga så slipningen kan bli både dyr och tidsödande. Genom att utföra beläggningen i spår kan man minimera efterbearbetningen. Jan Flinkfeldt, Tekniska Högskolan i Luleå, berättar att man har undersökt hur olika spårformer i gjutjärn, figur 12, påverkar resultatet vid påsvetsning med Stellite No6.

Det visar sig att det erforderliga slipdjupet blir ca 0,1-0,2 mm för att få en plan yta, figur 12, och att den användbara beläggningstjockleken blir 0,1-0,5 mm beroende på spårform och processparametrar. Hårdheten ligger i intervallet 520-550 HV och uppblandningen på 7-30 %, figur 13.



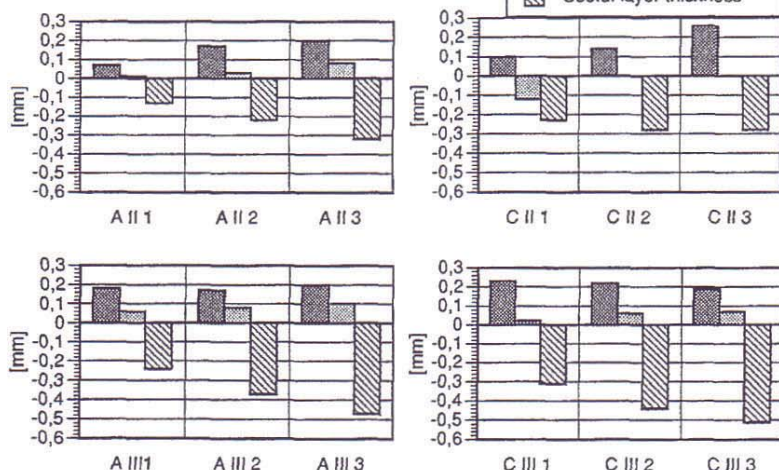
Groove type	Groove width w [mm]	c/c distances between grooves [mm]	Processing speed [m/min]	Beam spot size [mm]	Power on target [W]	Power density on target [W/mm ²]
A I	4	4,0 3,0 2,0	0,5; 0,6; 0,7	4,2	2600	≈200
B I	9,3	—	0,5; 0,6; 0,7	4,2	2600	≈200
C I	4	4,0 3,7 3,2	0,5; 0,6; 0,7	4,2	2600	≈200
A II, C II	5	5,0 4,5 4,0	0,5; 0,6; 0,7	5,2	2900	≈140
A III, C III	6	6,0 5,5 5,0	0,5; 0,6; 0,7	6,2	3900	≈130

Figur 12. Spårformer och processdata. Spår djup 0,5 mm.



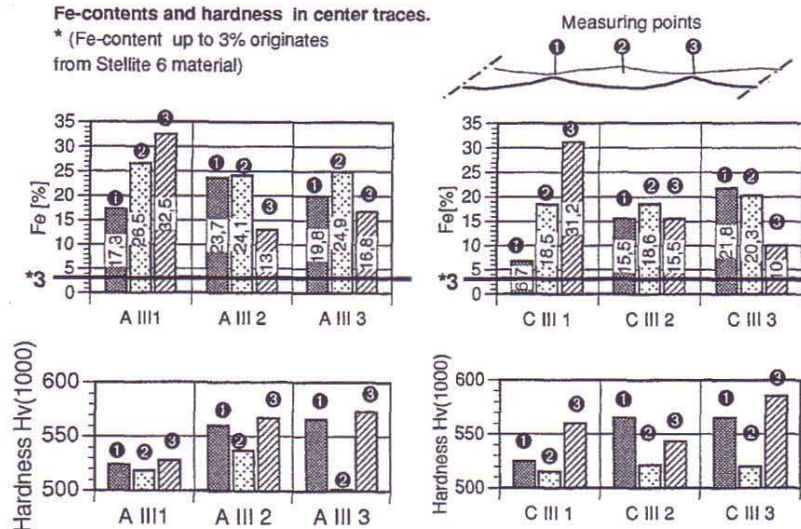
A- and C-TYPE SERIES

Maximum and minimum profile height
Maximum useful layer thickness



Fe-contents and hardness in center traces.

* (Fe-content up to 3% originates from Stellite 6 material)



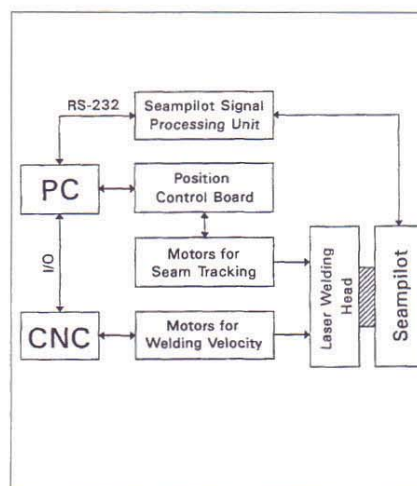
Figur 13. Skiktjocklek, uppblandning och hårdhet för olika spårformer.

För V-formade spår ökar restspänningarna med ökande skiktjocklek medan den runda spårformen ger ett mera komplicerat förhållande. Här är restspänningarna antingen konstanta eller så minskar de med ökande tjocklek.

PC-baserad fogföljning utvecklad

Ett PC-baserat fogföljningssystem har utvecklats av Zhigang Qu vid Lappeenranta Tekniska Högskola. Systemet kan användas vid lasersvetsning och där CNC-enheten inte har adaptiva funktioner. Det ger möjlighet att till en låg kostnad förse en arbetsstation med fogföljning.

Systemet, figur 14, använder en Delft Seampilot som sensor, vilket ger en noggrannhet på ±0,2 mm. Informationen sänds till PC:n via ett RS-232 interface 20 gånger per sekund. PC:n beräknar nödvändiga korrekationer i fokuspunktens position och skickar information via en styrenhet till två motorer som justerar fokuspunktens läge. Svets hastigheten styrs av CNC-systemet oberoende av sensorsystemet. De två systemen kan dock kommunicera med varandra via digitala I/O's.

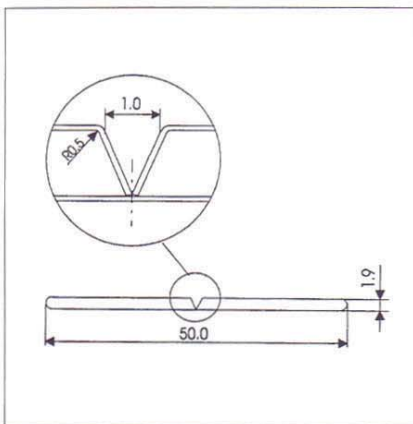


Figur 14. Systemstruktur för PC-baserat fogföljningssystem.

Systemet har testats på olika svetsapplikationer och funnits fungera väl. Genom att definiera ett antal systemparametrar kan sensorsystemets matematiska modell beskriva förändringar i svets hastighet och det geometriska förhållandet mellan sensorn och svets huvudet. Därför kan systemet användas för olika fogar utan att styrprogrammet behöver ändras.

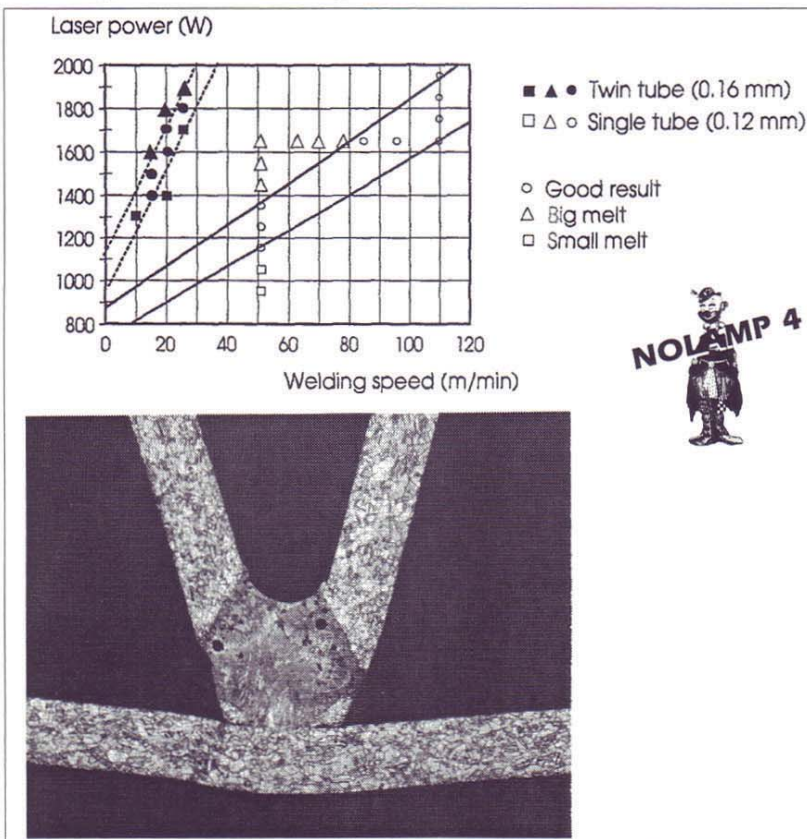
Nytt kylarrör lasersvetsas

Arbetet med att utveckla ny tillverkningsteknik och nya typer av kylarrör till fordonskylare fortsätter vid Tekniska Högskolan i Luleå. Klas Nilsson berättar att nu finns ett helt nytt kylarrör framtaget i samarbete med Outokumpu Copper Radiator AB och Valeo Engine Cooling AB, figur 16.

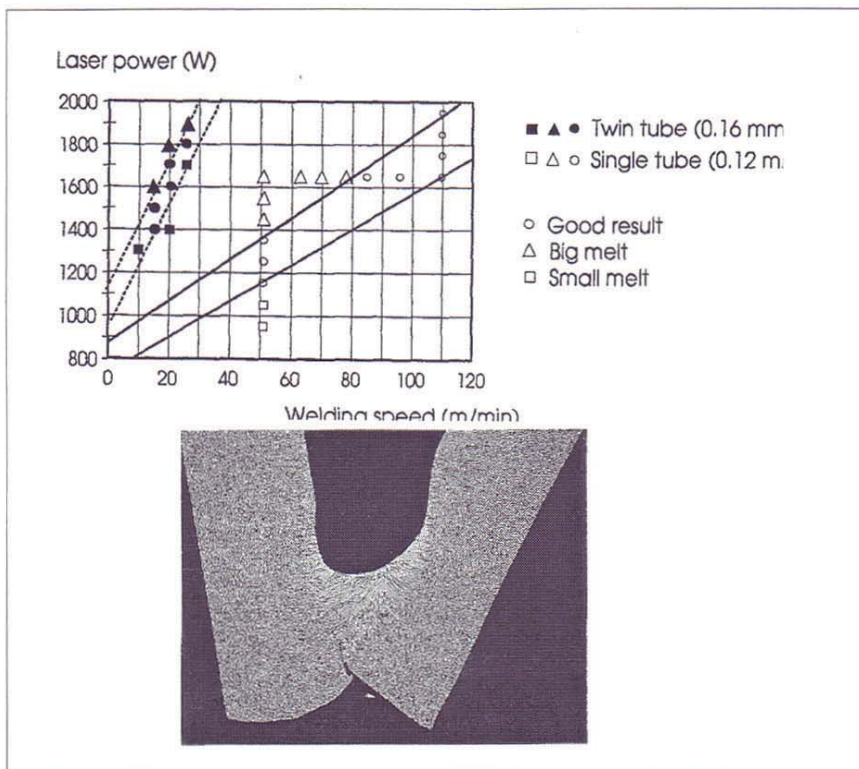


Figur 15. Nytt tvåpipigt kylarrör till fordonskylare.

Det nya kylarröret formas i 16 steg och lasersvetsning sker integrerat i rullformningsverket. Den nya profilen kräver att större materialvolym skall smältas vilket reducerar svets hastigheten, figur 16. Men om man tillåter att endast flänsarna svetsas samman kan svets hastigheten ökas markant, figur 17.



Figur 16. Svets hastighet som funktion av lasereffekt för enkel och dubbelrör.



Figur 17. Svets hastighet för dubbelrör när endast flänsarna svetsas samman.

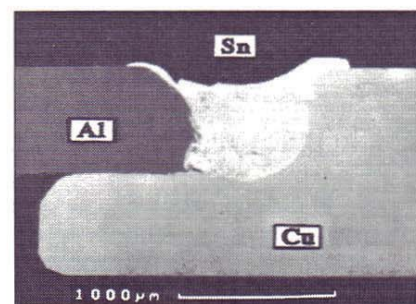
Nd:YAG:en svetsar "allt"

LaserNytt har tidigare presenterat möjligheterna att svetsa samman verktygsstål med hårdmetall (Nr3/92). Under samma tema, sammanfogning av olika material, berättade Conny Lampa, Tekniska Högskolan i Luleå, om andra möjligheter. Aluminium är intressant att

svetsa mot koppar i många applikationer men är ganska svårt på grund av olika smälttemperaturer. Vid stelnandet bildas också spröda intermetalliska faser.

Tenn är ett ofta använt lod när koppar ska sammanfogas och bildar ett eutektiskt system med aluminium. Tyvärr har tenn mycket låg brotthållfasthet, 33 MPa, vilket avsevärt måste förbättras för att duga som svets.

I detta experiment, figur 18 har koppar svetsats mot aluminium med tenn som tillsatsmaterial, se nedanstående figur.



Metallografiska analyser visade att både koppar och aluminium finns närvarande i hela svetsen. Dragprovning visade att svetsen hade en hållfasthet på 150 MPa, vilket är nästan fem gånger högre än för rent tenn. Detta indikerar att någon form av lösningshärdning har inträffat i fogen. Conny Lampa berättade också att man framgångsrikt har svetsat volfram mot en järn-kobolt-nickel-vanadin legering, samt ett gjutet rostfritt stål mot en kobolt legering.

Utmaningar och möjligheter vid lasersvetsning i höghållfasta aluminiumprofiler i 6xxx legering för tillverkning av batterilådor till bilindustrin.

Artikelförfattare: T. Sun*, P. Franciosa, M. Sokolov, D. Ceglarek

Lasersvetsning har blivit alltmer införd i fordonssektorn på grund av dess konkurrenskraftiga bearbetningshastighet, mindre restriktiva krav på enkelsidig åtkomst och förbättrad processflexibilitet. Trots dessa fördelar är lasersvetsning fortfarande i riskzonen för bildandet av svetssprickor, speciellt i 6xxx höghållfasta aluminiumprofiler, som används i stor utsträckning inom bilindustrin för tillverkning av både kaross och batterilådor. Denna artikel går igenom nuvarande utmaningar och möjligheter för konstruktion av batterilådor av aluminiumlegeringar med lasersvetsningsprocess. Den syftar till att ge en bild av valet av svetsutrustning i termer av stråloscillation, effektmodulering, strålformning, tillsatsmaterial och skyddsgas, samt analysera dess inverkan på fogar i aluminiumprofiler i 6xxx-kvalitet.

Grundidéen är att kontrollera den termiska historien i och runt smältpoolen och att modifiera den kemiska sammansättningen i stelningsområdet för att minska risken för stelningssprickor. Resultaten av studien har visat att modifiering av den kemiska sammansättningen, genom användning av tillsatsmaterial för närvarande är den mest effektiva metoden för att förbättra fogens hållfasthet. Ytterligare resultat visade också att strålformning med justerbar ringlaser hjälper till att stabilisera nyckelhålet och uppnå en bredare smälta och fogbredd. Påverkan på produktionen granskas och diskuteras.

Inledning

Nyare regler och policyer som trycker på vikten av att kontrollera och minska koldioxidutsläpp, luft- och bullerföroreningar har påskyndat utvecklingen av e-mobilitetsteknologier på fordonsmarknaden med behovet av lättare, starkare och kostnadseffektiva strukturer [1]. Li-jon-baserade bilbatteripaket är en alternativ energikälla till förbränningsmotorer som i allt högre grad används för att driva laddhybrid eller batteridrivna elfordon (PHEV/BEV). Sammansättningsprocessen för ett typiskt bilbatteripaket beskrivs vanligen genom: (a) celltillverkning (dvs. koppling mellan elektroder och flikar); (b) modulmontering (d.v.s. sammanfogning av flik till samlingsskena); och (c) paketmontering (d.v.s. modul-till-mo-

dul-anslutningar). En förpackning bildas genom att ansluta flera moduler med sensorer och en styrenhet och sedan placera den i en låda, som kallas batterilåda eller box. Även om det redan finns betydande forskning som kartläg-



Svensk översättning
Peter Norman

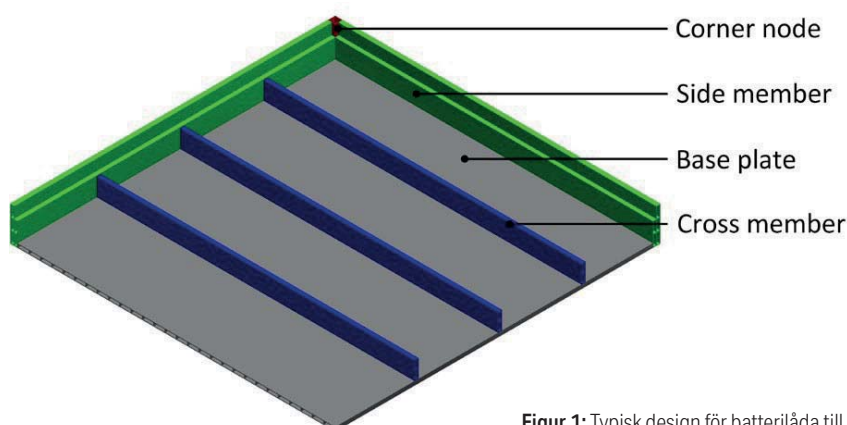
Svetskommissionen/Lasergruppen

Originalrubrik: Challenges and opportunities in laser welding of 6xxx high strength aluminium extrusions in automotive battery tray construction.

Artikeln är tillgänglig digital på
www.sciencedirect.com

ger nuvarande sammanfogningsteknologier mot tillverkningsberedskapsnivåer (TRL) [2], så finns det en betydande lucka i förståelsen av behov och krav för tillverkning av batterilådorna. Lådan är en barriär mellan underredet och vägen. Designen innebär hög teknisk komplexitet med flera krav såsom vatten/gastäthet, styrka, viktfordelning och kylning av högspänningskretsar. *Figur 1* visar den typiska utformningen av en batterilåda, med bottenplatta, tvär- och sidobalkar.

Valet av material och sammanfogningsprocesser för konstruktion av batterilådan är en utmanande uppgift som måste ta hänsyn till både tekniska prestanda (d.v.s. vikt, styrka och täthet) och tillverkningskostnader. Den nuvarande



Figur 1: Typisk design för batterilåda till elbil.

trenden inom högvolymproduktion är att använda aluminium för BEV-bilar med hög räckvidd (mer än 250 km); medan stålkonstruktioner används för fordon med lägre räckvidd. Å andra sidan tenderar lågvolymproduktion att använda komposit- eller multimaterial-strukturer.

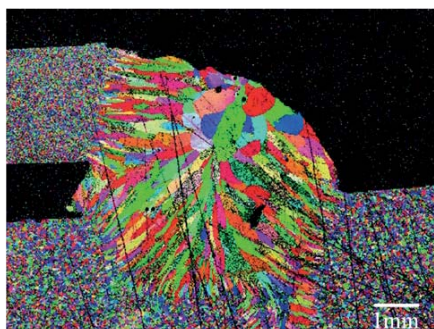
Resultaten av undersökningen som publicerades vid Automotive Circle EALA2020-konferensen [3] visade en preferens på 30 % för införandet av aluminiumlegeringar i nya lösningar för att underlätta tillverkningen av billigare och lättare batterilådor, med lasersvetsning som ett processalternativ, tillsammans med friktionsomrörnings svetsning (FSW). Taktill lasersvetsning (TLW) med användning av tillsatstråd har visat sig vara en lovande sammanfognings-teknik på grund av fördelar som enkel-sidig åtkomst, minskad värmetillförsel och förbättrad bearbetningshastighet. Dessutom ger Remote Laser Welding (RLW) ytterligare fördelar utöver TLW, såsom låga driftskostnader på grund av frånvaron av tillsatstråd och skyddsgas och ökar också bearbetningsflexibiliteten genom den snabba responsen från laserskanneroptiken [4,5].

Denna artikel granskar nuvarande utmaningar och möjligheter för konstruktion av batterilådor i aluminiumlegeringar med både TLW- och RLW-processer. Det syftar till att ge en kritisk översyn på valet av svetsutrustning och processparametrar (d.v.s. stråloscillation, effektmodulering, strålformning, tillsatstråd och skyddsgas) och dess inverkan på optimering av svetsfogar i aluminiumprofiler i några olika 6xxx kvaliteter.

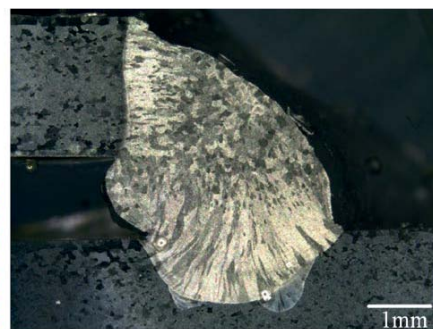
Bakgrund

Det har visats att endast ~20 kg extruderade aluminiumprofiler ingår i fordon med förbränningsmotorer medan BEV innehåller upp till 250 kg [6]. Införandet av extruderade aluminiumprofiler för att minska vikt, öka designflexibilitet och öka modularitet ses som ett fördelaktigt alternativ för tillverkning av batterilådor. Införandet av profiler i 6xxx legeringar har dock följande utmaningar:

- (1) svetsporositet – porer i smältan minskar svets hållfasthet, hållbarhet och vatten-/gastäthet;
- (2) tillverkningstoleranser för extruderade profiler som svetsas kan leda till



Figur 2: Typisk tvärsnitt av svetsfog vid RLW med effektmodulering och strål oscillering vid två olika materialjocklek 1,5mm till vänster och 2,5mm till höger.



oönskade mellanrum mellan profiler. Standardformtolerans för extruderade profiler är

$\pm 0,8$ mm över 1 m längd, vilket om det lämnas okontrollerat kan leda till mellanrum från del till del på upp till 1,6 mm [7]; och,

(3) svetsprickor – dessa är stora svetsdefekter som uppstår på grund av höga termiska spänningar under stelning och försämras av en hög värmeledningsförmåga hos aluminium.

Svetsporositet är associerad med två huvudfenomen: (a) väte eller föroreningar som fångas i smältan och lämnar tomrum i den stelnade svetsen; och, (b) kollaps av nyckelhålet under lasersvetsprocessen.

Jämfört med stål eller järnbaserade legeringar, tenderar smältan uppvisa lägre viskositet som övergår till instabil jämvikt mellan kapillärtrycket inuti nyckelhålet och vikten hos smältan. Som ett resultat tenderar nyckelhålet att kollapsa oftare vilket lämnar tomrum i den stelnade svetsen. Under de senaste åren har den mesta forskningen fokuserat på att utveckla effektiva lösningar för att förbättra nyckelhålsstabiliteten och maximera svetsbarheten hos aluminiumlegeringar. Lösningar på problemen har undersökt genom testning med laserstråloscillation, effektmodulering och strålformningstekniker [8]. Kombinationen av stråloscillation och effektmodulering har också använts för att överbrygga gap mellan detaljer med en RLW-process. Flera artiklar har utvecklat lösningar för plåttillämpningar (typiska tjocklekar är i intervallet 1,5 till 2 mm), speciellt för förslutningar och upphängningsdelar, med kälfgsgeometri [9,10].

Vanligtvis utförs en total svetslängd på ~30 m vid tillverkning av en batterilåda för att foga ihop bottenplattan med sido-/tvärbalkarna och hörn. Detta

tydliggör behovet av en robust spaltöverbryggande process för att undvika diskontinuiteter och möjliggöra en vatten/gastät konstruktion. Tillvägagångssättet för spaltbryggning bygger på observationen att när gapet ökar måste mer material falla/smälta från den övre delen för att fylla ut gapet. Detta erhålls genom adaptiva urval av svetsprocessparametrar, såsom lasereffekt och stråloscillationsamplitud, som underlättar droppbildningen och bindningen med botten delen. *Figur 2* visar typiska svets tvärsnitt erhållna med spaltöverbryggning under en RLW-process [10,11].

Även om det redan undersökts utförligt, så är svetsprickor fortfarande en stor utmaning vid svetsning av 6xxx-legeringar. Modellering och karakterisering av svetsprickor har väckt ett enormt intresse inom lasersvetsvärlden. Flera tillvägagångssätt har föreslagits, både teoretiskt baserade och datadrivna. Den vanliga uppfattningen är att Si-innehållet i Al-Mg-Si-legeringar utökar det kritiska stelningensintervall där termisk påkänning överskrider materialets duktilitet under den snabba avkylningsperioden efter svetsning [12]. Förutom metallurgiska aspekter påverkar den termiska historien, mekaniska begränsningar och dynamik i smältan bildandet och spridningen av svetsprickor. Till exempel induceras Marangoni-effekten ger flöden i smältan som hjälper till att pressa den mellan dendriterna och således minskas risken för sprickbildning [13]. Denna artikel kommer att fokusera på sprickbildningsfenomen vid stelning och diskutera effekterna av både makroprickorna (även kallade centerlinjesprickor) och mikroprickor eftersom likvidationsprickor sällan observerats, främst på grund av den låga värmetillförseln och den smala HAZ för lasersvetsar [14].

Tabell 1: Maximala viktsprocent (wt. %) av legeringselement.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
6008-T7	0.90	0.35	0.30	0.30	0.70	0.20	0.10
6060-T6	0.53	0.30	0.10	0.10	0.60	0.15	0.10
6063-T6	0.60	0.35	0.10	0.10	0.90	0.10	0.10

Experimentell uppställning & svetsinställningar

Tre höghållfasta aluminiumlegeringar, AA6060-T6 (1,5 mm) [15], AA6063-T6 (2,5 mm) och AA6008-T7 (2,5 mm)

[16], studerades. Legeringarnas kemiska sammansättning visas i *Tabell 1*.

Strålosscillationen ges av den motoriserade spegeln och kollimatoren integrerat i WeldMaster Scan&Track fjärr-

svetshuvud (YW52 Precitec GmbH, Tyskland). Stråleffektmodulering görs med det analoga gränssnittet mellan laserkällan och svetshuvudet. Strålformningen utförs genom att använda den inbyggda styrningen i det använda Coherent ARM FL10000 lasersystemet. En laser med justerbar ringform (ARM) är ett nytt koncept just för lasersvetsning på grund av det är möjligt att styra formen oberoende av effekten i lasern. Den centrala delen av laserstrålen genererar ett nyckelhål, medan den ringformade delen säkerställer en bra temperaturfördelning för att kontrollera kylningshastigheten i och runt själva smältan [17]. Viktiga svetsparametrar visas i *Figur 3*. *Tabell 2* och *Tabell 3* ger detaljerade data hos de använda lasersvetssystemen respektive svetskonfigurationerna. AlSi12 tillsatsmaterial och argon som skyddsgas användes.

Svetsfogarna analyserades utifrån fogens geometri och mekaniska egenskaper. För att utvärdera geometrin togs tvärsnitt ut och blev uppmätta med optiskt mikroskop efter mekanisk slipning och polering med 9 µm, 3 µm respektive 1 µm MetaDi supreme-lösning och etsning i natriumhydroxid (NaOH)-lösning i 2 minuter. Dragskjuvningstest utfördes på 20 mm breda prover vid en konstant förlängningshastighet av 1 mm/min; den maximala linjära belastningen (N/mm) extraherades sedan som indikator på fogens hållfasthet. Vickers mikrohårdhetstest utfördes med en belastning på 0,2 kg och uppe-

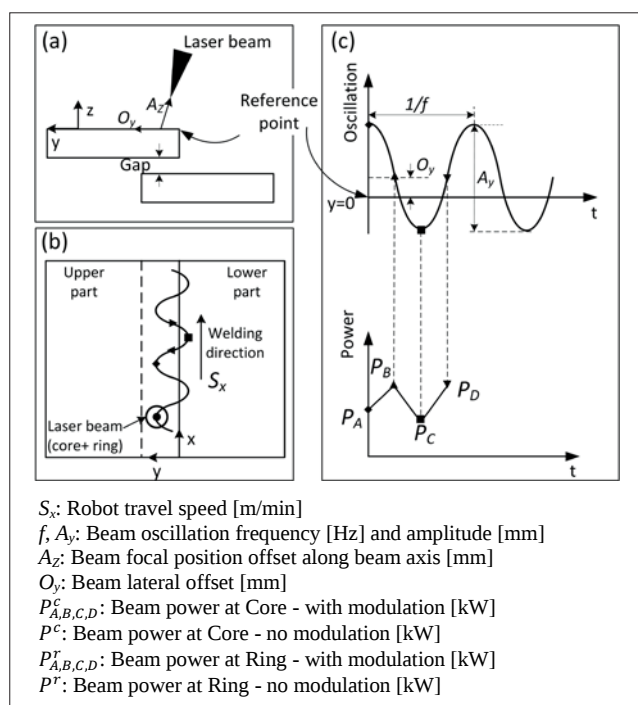


Figure 3: Illustration av viktiga svetsparametrar; (a) sidovy; (b) toppvy; (c) strål oscillation och effektmodulering [9].

Tabell 2: Beskrivning av lasersvetssystemen.

ID	Laser system	Fiber diameter (µm)	Fiber wavelength (nm)	BPP (mm·mrad)	Max power (kW)	Collimating length (mm)	Focusing length (mm)	Beam diameter at focus (mm)
I	Laserline	150 (core)	1080	6	6.0 (core)	150	300	300
II	Coherent ARM	70 (core) 180 (ring)	1080	16	5.0 (core) 5.0 (ring)	150	300	140 (core) 360 (ring)
III	Coherent ARM	70 (core) 180 (ring)	1080	16	4.0 (core) 4.0 (ring)	100	400	280 (core) 720 (ring)
IV	Coherent Ring only	300 (ring)	1080	8	8.0 (ring)	160	400	750 (ring)

Table 3. Matrix of welding configurations studied in this paper. Note: Laser system ID refers to Table 2.

Set-up	Materials	Beam oscillation	Power Modulation	Beam shaping	Filler wire	Shielding gas	Laser system ID	Motion system	Optics setup
#1	6008-T7	✓	✓				I	ABB 6700	Precitec WeldMaster
#2	6008-T7	✓	✓	✓			II	ABB 6700	Precitec WeldMaster
#3	6008-T7			✓	✓	✓	III	Kuka KR60 L45	Coherent-Rofin
#4	6008-T7			✓	✓	✓	IV	Kuka KR60 L45	Coherent-Rofin
#5	6060-T6	✓	✓				I	ABB 6700	Precitec WeldMaster
#6	6060-T6			✓	✓	✓	III	Kuka KR60 L45	Coherent-Rofin
#7	6060-T6			✓	✓		III	Kuka KR60 L45	Coherent-Rofin
#8	6060-T6			✓	✓	✓	IV	Kuka KR60 L45	Coherent-Rofin
#9	6063-T6	✓	✓				I	ABB 6700	Precitec WeldMaster
#10	6063-T6	✓	✓	✓			II	ABB 6700	Precitec WeldMaster

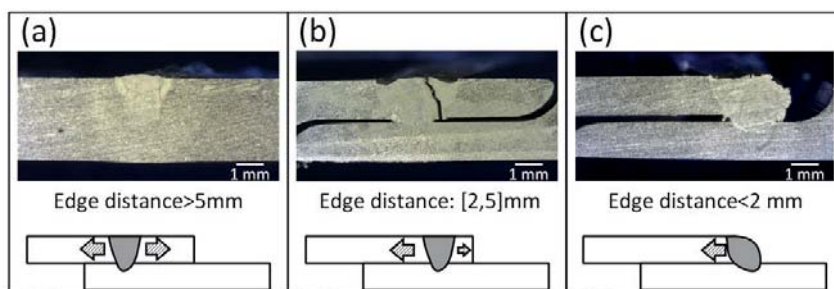
hålltid på 10 s för att avslöja den lokal fördelning av materialets hårdhet. Brottytan på proverna analyserades med en Hitachi TM3000 SEM.

Resultat

Kontroll av centerlinjesprickor

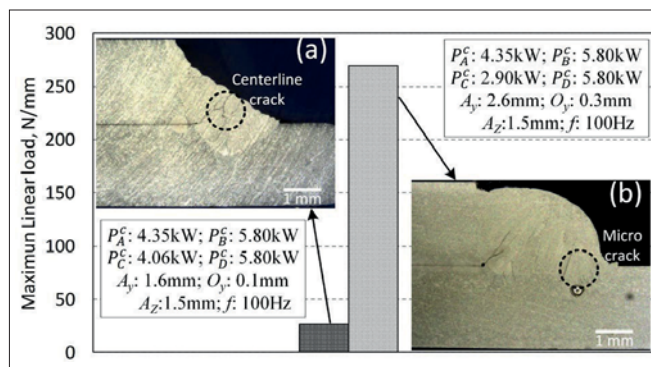
Figur 4 visar representativa svetsvärsnitt med olika kantavstånd som representerar övergången från överlappsfog, (figur 4a) till kant-överlappsfog (figur 4c).

Resultaten visar att sprickor i mittlinjen effektivt kan kontrolleras genom korrekt kantavstånd. Kantavstånd mindre än 2 mm eller mer än 5 mm visade sig vara mindre känsliga för sprickor i mittlinjen. För kantavstånd > 5 mm finns det tillräckligt med material på båda sidor av smältzonen för att ta hand om värmeavledningen. Det leder så småningom till ett symmetriskt termiskt fält och låg nivå av termisk spänning i fusionszonen. När fusionszonen är närmare kanten med kantavstånd inom $[2, 5]$ mm, tenderar det termiska fältet att vara asymmetriskt och snedställt åt vänster och genererar kvarvarande termiska spänningar som kan överskrida den kritiska hållfastheten i det området. För kantavstånd < 2 mm kommer det att ske en övergång från flerriktad stelning till enkelriktad stelning, som är mindre känslig för sprickor i mittlinjen [18]. Ur perspektivet att minska känsligheten för sprickor och även fördelar som fogföljning och övervakning av gap mellan svetsade detaljer för adaptiv kontroll, valdes överlappsfog som föredraget alternativ. Även om kalsvetsfogen hjälper till att minska sprickor i mittlinjen, är optimeringen av svetsparametrar avgörande. Figur 5 visar två AA6060-T6 tvärsnitt med olika svetsparametrar som hänvisar till fallet med ej optimerade (a) och optimerade (b) svetsar. Med $A_y=1,6$ mm och $O_y = -0,1$ mm (laserstrålen förskjuten mot den nedre delen) svetsfogen visar en konkav form med en mittlinjespricka som sträcker sig genom smältzonen. Detta är på grund av den högre termiska töjningen som härör från den smala smältzonen och den resulterande höga kylningshastigheten. Omvänt, med $A_y=2,6$ mm och $O_y = 0,3$ mm (laserstrålen förskjuten mot den övre delen) förbättras svetsfogen avsevärt och verkar bredare och konvex, och inga tecken på sprickor i mittlinjen. Den minskade svetspenetrationen i fig. 5(b) är associerad med minskningen av



Figur 4: Representativa tvärsnitt av 6063-T6 svetsar med olika kantavstånd - (a) mer än 5 mm (överlappsfogkonfiguration); (b) inom intervallet 2-5 mm; och, (c) mindre än 2 mm (kant-överlappsfog). Värmeavledning i varje fall illustreras av pilen och storleken på pilen representerar nivån på värmeavledning.

Figur 5: Förbättring av foghållfasthet och dämpning av sprickor i mittlinjen genom optimering av svetsparametrar med svetsupplägg #5 vid $S_x=4$ m/min.



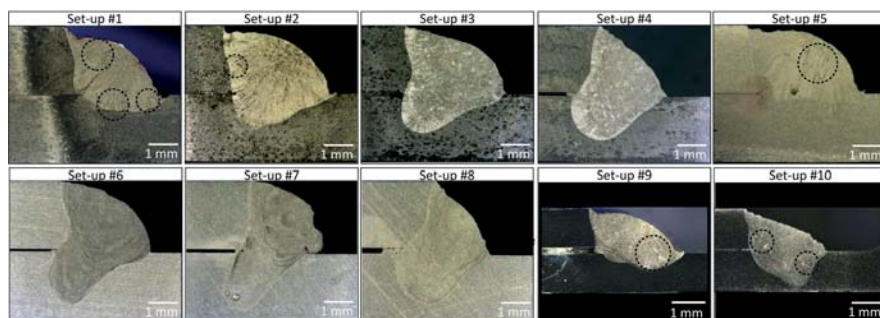
lasereffekt på punkten C ($P_{cc}=2,9$ kW). De interna mikrosprickorna som hittades måste undersökas ytterligare.

Kontroll av mikrosprickor

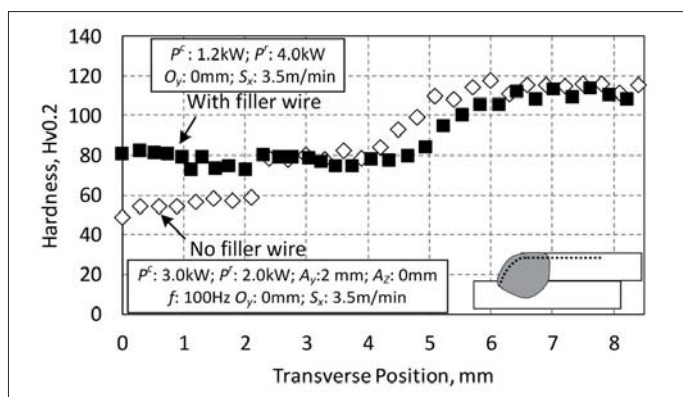
Figur 6 visar tvärsnitt från alla svetskonfigurationer som visas i Tabell 3, med de detaljerade svetsprocessparametrarna i Tabell 4. Efter val av optimerade svetsparametrar visas inga sprickor i mittlinjen. Dock är interna mikrosprickor synliga i uppsättning #1, #5 och #9 (då med användning av strålscillation och effektmulering), och även i uppsättning #2 och #10 (då med användning av strålförformning). De finns belägna i området intill gränsen mellan smältzonen och värmepåverkad zon, och även mot spetsen av smältzonen. Det är därför rimligt att dra slutsatsen att bara förändring av den termiska historien (antingen genom tidsmodulering eller spatial lasereffektfördelning) inte är tillräcklig för att nå sprickfria svetsar. Endast svetsarna i uppsättning #3, #4, #6 till #8 (med användning av AlSi12 tillsatsmaterial) är helt fria från mikrosprickor. Detta stöder det faktum att modifiering av den kemiska sammansättningen i smältzonen genom tillsats av Si förbättrar legeringens svetsbarhet. Det bör också noteras att ingen signifikant skillnad hittades mellan ring-only mode (set-up #4 och

#8) och core & ring mode (set-up #3 och #6) när det gäller bildandet av mikrosprickor när tillsatsmaterial används. Figur 7 jämför hårdhetsfördelningen för de två svetskonfigurationerna erhållna med och utan tillsatsmaterial för AA6008-T7. Resultaten visar en signifikant ökning av hårdheten i smältzonen när tillsatsstråden används. Detta beror främst på förändringen av den kemiska sammansättningen i smältzonen som underlättar bildningen av utfällningar som förstärker.

Figur 8 visar svetsfogens hållfasthet från alla svetskonfigurationer i tabell 3, med detaljerade svetsprocessparametrar presenterade i tabell 4. Om man tar 6008-T7-svetsar som exempel, noteras det att strålscillation + effektmulering (#1) och strålförformning (#2) har begränsad effekt på fogens styrka. I jämförelse är förbättringen mer uttalad genom användning av tillsatsmaterial (#3, #4). Mer överraskande uppnåddes samma nivå av foghållfasthet genom användningen av endast ringläge även vid en högre svets hastighet på 6 och 6,5 m/min, jämfört med resultat vid 4 m/min. För att bättre förstå effekten av tillsatsmaterial på fogens hållfasthet, undersöktes även brottytan efter dragprovet och visas i figur 9. Fördjupningar som visas i varje brottyta indikerar det duk-



Figur 6: Tvärsnitt från alla svetsförsök i tabell 3 där mikrosprickor indikeras med en streckad cirkel.



Figur 7: Tvärgående hårdhetsfördelning i 6008-T7 svetsar efter en veckas åldring. (Observera att mätpunkter har en förskjutning på 0,5 mm från tvärsnittetskonturen).

tila brottet. Kaviteterna i figur 9 (a) och (b) avslöjar dock närvaron av mikrosprickor och porer, vilket kan ge en lokal spänningskoncentration och leda till snabb spridning av diskontinuiteter. När man använder tillsatsmaterial är fördelningen av gropar på brottytan mer enhetlig (figur 9c), vilket är en indikator på en betydande minskning av antalet mikrosprickor. Därför är det rimligt att en ökning av fogens hållfasthet genom användning av tillsatsmaterial tillskrivs två fenomen: ökningen av hårdhet i smältzonen; och minskning av svetsdefekter såsom mikrosprickor och porer. Vidare stödjer experimentella resultat slutsatsen att skyddsgas kan användas för att förbättra fogens hållfasthet genom att förbättra fogytans ytfinish. Mer forskning kommer att utföras i framtiden för att bättre förstå effekten av skyddsgas.

Slutsatser

Artikeln diskuterade utmaningar och tekniska lösningar för lasersvetsning av aluminiumprofiler i 6xxx legeringar. Ett antal svetsutrustningar har testats, med möjlighet för strålscillation, effektmodulering, strålformning, tillsatsmaterial och skyddsgas. De viktigaste resultaten listas nedan:

- Sprickor i mittlinjen kan effektivt undvikas genom att använda konfigurationen för överlappsfog integrerad med strålscillation och effektmodulering;
- Modifiering av termisk historia genom strålscillation, effektmodulering och strålformning tenderar att minska antal och distribution av mikrosprickor; de är dock inte tillräckliga för att nå en sprickfri svets;
- Tillsats av tråd är hittills den mest effektiva lösningen för att kontroll-

era mikrosprickor och förbättra hållfastheten. En förbättring på upp till 40 % hållfasthet har observerats jämfört med fallet utan tillsats med användning av strålscillation och effektmodulering;

- Samma nivå av fogstyrka uppnåddes genom användningen av endast ringläge även vid högre svets hastighet på 6 och 6,5 m/min, jämfört med resultat vid 4 m/min som erhöles med tillsatstråd.

Tabell 5 sammanfattar konkurrensfördelarna med varje teknisk kapacitet.

Framtida arbete kommer att ägnas åt studier av:

- genomförbarheten av svetsning med högre svets hastighet – för närvarande är den maximala testade hastigheten 6,5 m/min – med målet att öka produktionseffektiviteten;
- Inverkan av endast ringläge (med och utan tillsatstråd) på svetskvalitet och kontroll av mikrosprickor; och,
- teknisk genomförbarhet för att integrera övervakningssystem i processen med det slutliga målet att uppnå ett closed-loop kvalitetskontrollsystem i processen.

Acknowledgements

Denna studie stöddes delvis av WMG HVM Catapult, APC UK-projektet: Chamaeleon - New lightweight Materials and Processing Technologies for Common Lightweight Architecture of Electric and Hybrid Powertrain Systems, och Innovate UK IDP15-projektet LIBERATE: Lightweight Innovative Battery Enclosures using Recycled Aluminum Technologies. Vi är mycket tacksamma för den tekniska supporten från Coherent under svetsförsöken.

Referenser

- [1] González Palencia JC, Furubayashi T, Nakata T. Energy use and CO2 emissions reduction potential in passenger car fleet using

Tabell 4: Detailed welding process parameters of the set-ups shown in Table 3.

Set-up	Power at @Core (kW)	Power at @Ring (kW)	Sx (m/min)	Filler wire feed rate (m/min)	Gas feed rate (L/min)	Oy (mm)	Az (mm)	Ay (mm)	f (Hz)
#1	$P_{A,B,C,D}^c$: 4.8, 6.0, 2.7, 6.0	N/A	4.0	N/A	N/A	0.7	2.5	1.7	100
#2	$P_{A,B,C,D}^c$: 1.5, 1.5, 1.5, 1.5	$P_{A,B,C,D}^t$: 5.0, 5.0, 1.5, 5.0	4.0	N/A	N/A	0.6	2.0	1.5	100
#3	P^c : 1.4	P^t : 4.0	4.0	6.0	15	0.0	N/A	N/A	N/A
#4	N/A	P^t : 6.5	6.0	6.5	15	0.0	N/A	N/A	N/A
#5	$P_{A,B,C,D}^c$: 4.9, 5.8, 3.8, 5.8	N/A	4.0	N/A	N/A	0.7	1.5	2.6	100
#6	P^c : 1.2	P^t : 4.0	3.5	6.0	15	0.0	N/A	N/A	N/A
#7	P^c : 1.4	P^t : 4.0	4.0	6.0	N/A	0.0	N/A	N/A	N/A
#8	N/A	P^t : 7.0	6.5	7.0	15	0.0	N/A	N/A	N/A
#9	$P_{A,B,C,D}^c$: 2.6, 5.1, 2.3, 5.1	N/A	4.0	N/A	N/A	0.4	2.0	1.8	100
#10	$P_{A,B,C,D}^c$: 1.4, 3.0, 1.1, 3.0	$P_{A,B,C,D}^t$: 0.3, 0.3, 0.3, 0.3	4.0	N/A	N/A	0.2	2.0	1.8	100

zero emission vehicles and lightweight materials. Energy 2012, 48, 548–565.

[2] Kölmel A, Sauer A, Lanza G. Quality-oriented production planning of battery assembly systems for electric mobility. Procedia CIRP 2014, 23, 149–154.

[3] Lasers go E-mobile – industry survey. In Proceedings of the EALA 2020 - Automotive Circle; Bad Nauheim.

[4] Ceglarek D, Colledani M, Váncza J, Kim DY, Marine C, Kogel- Hollacher M, Mistry A, Bolognese L. Rapid deployment of remote laser welding processes in automotive assembly systems. CIRP Ann. - Manuf. Technol. 2015, 64, 389–394.

[5] Franciosa P, Sun T, Ceglarek D, Gerbino S, Lanzotti A. Multi-wave light technology enabling closed-loop in-process quality control for automotive battery assembly with remote laser welding. In Multimodal Sensing: Technologies and Applications, vol. 11059, p. 110590A. International Society for Optics and Photonics, 2019.

[6] Blendl W, Cuppoletta N. Trend towards e-Mobility accelerates Aluminium Use Available online: <https://www.aluminium-messe.com/en/ALUMINIUM-2020/Trend-towards-e-Mobility-accelerates-Aluminium-Use/879/>.

[7] BS EN 12020-2:2016 Aluminium and aluminium alloys. Extruded precision profiles in alloys EN AW-6060 and EN AW-6063. Tolerances on dimensions and form. Bsi 2016.

[8] Sokolov M, Franciosa P, Botros Al, Ceglarek D, Road GH. Keyhole Mapping to Enable Closed-Loop Weld Penetration Depth Control for Remote Laser Welding of Aluminium Components Using Optical Coherence Tomography. Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics Conf. 2019.

[9] Müller A, Goecke SF, Sievi P, Albert F, Rethmeier M. Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints. Phys. Procedia 2014, 56, 458–466.

[10] Franciosa P, Serino A, BotrosAl, Ceglarek D. Closed-loop gap bridging control for remote laser welding of aluminum components based on first principle energy

Figure 8: Sammanfattning av svetsfogens styrka (överlappsskjuvningsstest) tillverkade i olika svetskonfigurationer efter en veckas naturlig åldring.

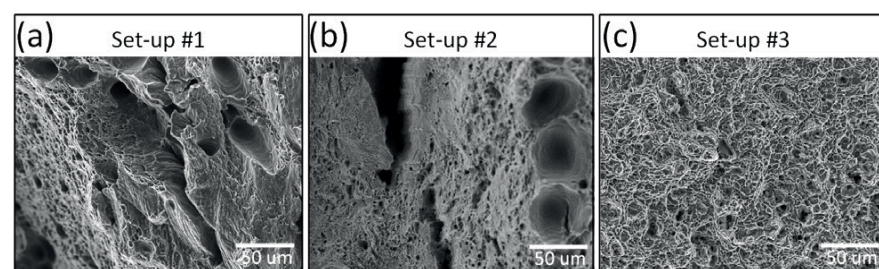
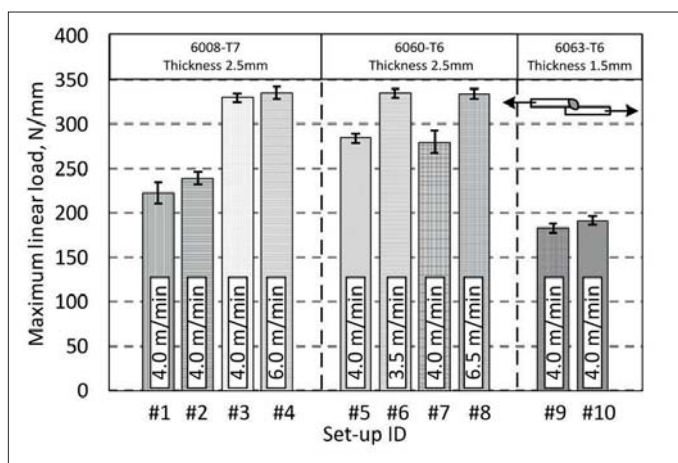


Figure 9: Representativ brottyta efter dragprovning av 6008-T7-svetsar producerade i svetskonfigurationen (a) uppsättning #1, (b) uppsättning #2 och (c) uppsättning #3.

and mass balance. J. Laser Appl. 2019, 31, 022416.

[11] Franciosa P, Sokolov M, Sinha S, Sun T, Ceglarek, D. Deep Learning Enhanced Digital Twin for Remote laser Welding of Aluminium Structures. CIRP Ann. Manuf. Technol. 69/1.

[12] Dudas HJ. Preventing weld cracks in high strength aluminum alloys. Weld. J. 1966, 45, 3.

[13] Langrieger H, Krafft F, Mensinger M, Oefele F. Thermomechanical analysis of the formation of hot cracks in remote laser welded aluminium fillet welds. J. Laser Appl. 2016, 28, 022414.

[14] Zhao H, White DR, DebRoy T. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. Int. Mater. Rev. 2003

[15] Aalco Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6060 - T5 Extrusions Available online: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5-Extrusions_144.ashx.

[16] MakeeltFrom 6008 (AlSiMgV, A96008) Aluminum Available online: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6008-AlSiMgV-A96008-Aluminum>.

[17] Wang L, Mohammadpour M, Yang B, Gao X, Lavoie JP, Kleine K, Kong F, Kovacevic R. Monitoring of keyhole entrance and molten pool with quality analysis during adjustable ring mode laser welding. Appl. Opt. 2020, 59, 1576–1584.

[18] Stritt P, Weber R, Graf T, Mueller S, Weberpals JP. New hot cracking criterion for laser welding in close-edge position. ICA-LEO 2012 - 31st Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics 2012, 357, 357–366.

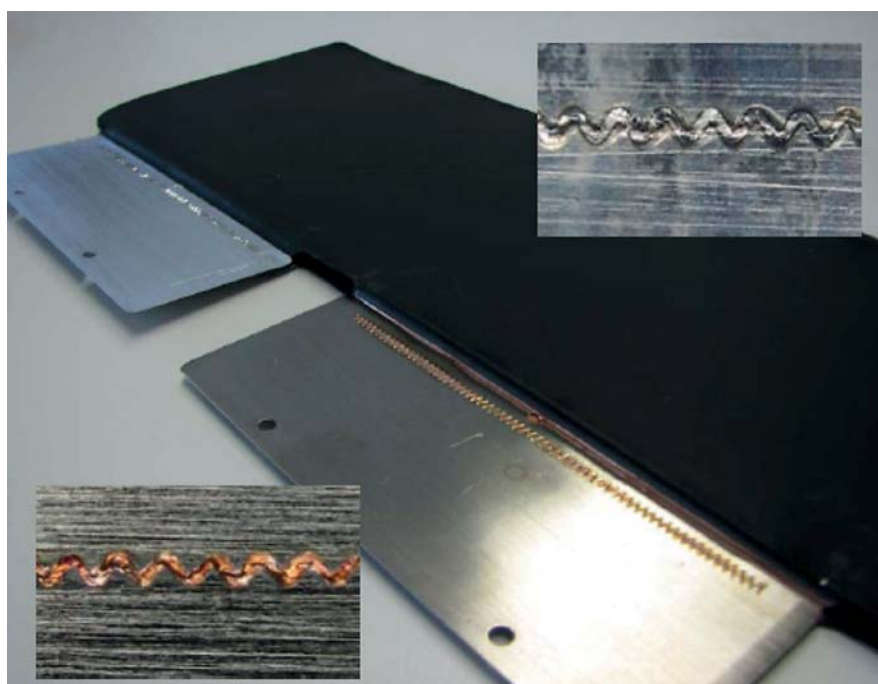
Tabell 5: Manufacturing implications and competitive benefits of welding configurations and technological capabilities (case of fillet lap joint).

Technological capability	Advantages	Disadvantages
Beam Oscillation	- Gap bridging up to 50% of upper material thickness - Avoidance of centerline cracks - Compatible with optical seam tracking	No control of micro-cracking
Power Modulation		
Beam Shaping	- Reduction of weld pores - Localised in-process thermal treatment - Improved weld width and seam smoothness - Improved joint strength by ring-only laser beam	Limited control of micro-cracking (further work required to understand the full capability)
Filler wire	- Able to deliver crack-free weld - Reduction of weld pores - Improved joint strength	- Increased system complexity - Need for consumables - Synchronisation of robot, wire feeder, laser controller and optical setup may be cumbersome - Insufficient control of laser beam alignment - Reduced welding speed
Shielding gas	- Reduction of weld pores - Improved seam smoothness	- Increased system complexity - Need for consumables

Laser- och batteriteknologi i samverkan



Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering



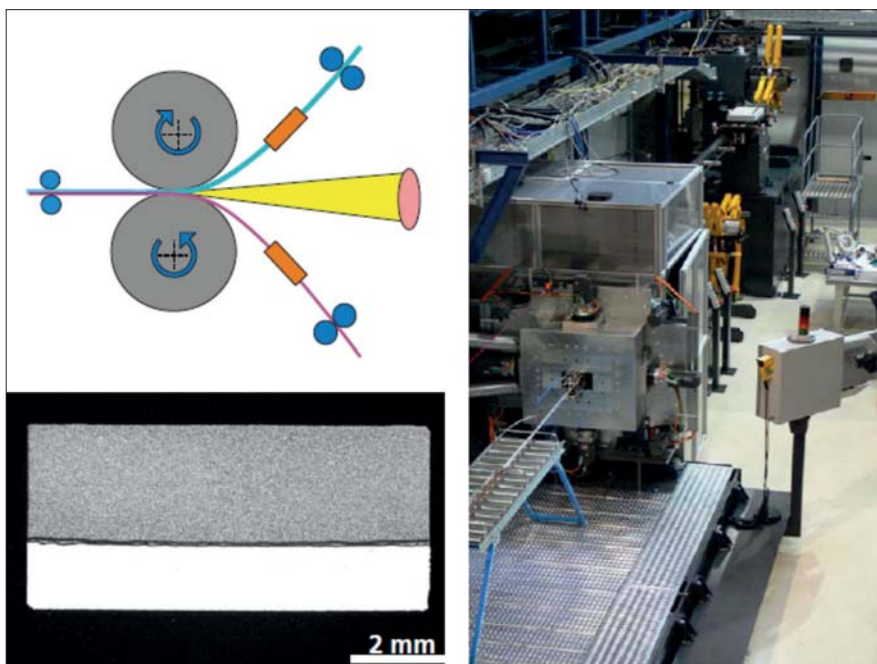
Figur 1: Kontaktdon, där aluminium lasersvetsas till koppar, visar sig ha nästintill dubbelt så hög elektrisk ledningsförmåga jämfört med kontaktdon sammansatta med ultraljudssvetsning. Dessutom är svetstiden med laser för de två kontaktdonen svindlande 2,3 sekunder!

Att olika materialkombinationer kommer att bli alltmera vanliga i framtidens bilar är uppenbart, samtidigt som andelen eldrivna fordon i framtiden kommer att öka på bekostnad av traditionellt bensin- och dieseldrivna. I det senare fallet kan lasertekniken komma att spela en viktig roll vid tillverkningen av nödvändiga batteripaket. Det har redan visats på hur man med RLC [Remote Laser Cutting] –teknik skär tunna membran [150 μm] för Litium-celler med en 1 kW SM [Single Mode] –fiberlaser och 120 m/min i skärhastighet. Men denna ”scanner”-teknik kan även användas vid svetsning av kontaktdon där aluminium skall fogas till koppar. Fogarna är överlappsfogar och med en 5 kW fiberlaser skapas ett 100 mm långt vågformigt svetsmönster med en amplitud på 3 mm och en våglängd på 1 mm. Svetstiden för de två kontaktdon som krävs för varje battericell ligger på 2,3 sekunder. Konduktiviteten i dessa kontaktdon har jämförts med andra, vilka var sammansatta med för detta ändamål mer traditionell ultraljudssvetsning, och där man kunnat konstatera att de lasersvetsade kontaktdonen gav en högre elektrisk ledningsförmåga!

En annan innovation, för att skapa bi-metalliska folier, sker genom s.k. Laser Induction Roll Cladding där två artolika metaller induktionsvärms med hjälp av en laserkälla till en sådan temperatur att materialen under ett kort tidssteg tillåts diffundera in i varandra samtidigt som de sammanvälls under högt tryck mellan två roterande cylindrar. Processhastigheten ligger mellan 5-20 m/min beroende på foliernas bredd, och det förekommer i princip inga intermetalliska faser mellan de två sammanfogade materialen.

Ett annat sätt att undvika intermetalliska faser vid lasersvetsning av aluminium till koppar är att undvika höga temperaturgradienter och på så sätt minimera utspädningen av koppar i svetssmältan. Detta går att åstadkomma genom att oscillera en kraftigt fokuserad laserstråle och att noggrant kontrollera dess positionering. För detta ändamål har Institut für Werkstoff und Strahltechnik [IWS] i Dresden utvecklat ett särskilt svetsverktyg med tvådimensionella oscilleringsmöjligheter över 2 kHz. Fokallängden är 245 mm, kollimeringslinsen har en brännvidd på 140 mm och arbetsfältet är 10×10 mm. Vidare är verktyget konstruerat för att klara våglängder mellan 1030-1090 nm och lasereffekter upp till 4 kW från en SM [Single Mode] -laser.

Idag sker kontaktering av battericeller, d.v.s. sammanfogningen av anod och diodplattor, med hjälp av skruvförband vilka i genomsnitt tar 5 sekunder att applicera. Detta bedöms som en i sammanhanget alltför lång processtid varför man börjat efterlysa alternativa fogningstekniker, och här kan lasersvetsning vara ett alternativ. Därför är ämnesområdet lasersvetsning av



Figur 2: Ö.t.v. principen för "Laser Induction Roll Cladding", en metod som mer eller mindre eliminerar uppkomsten av intermetalliska faser mellan artolika material. T.h. en översiktsskild över försökssupställningen vid IWS [Institut für Werkstoff und Strahltechnik] i Dresden.

aluminium [katod] till koppar [anod] verkligen satt under luppen, och forskning bedrivs på ett otal ställen, så även hos Audi AG. Där har man använt sig av fjärrlasersvetsning [Remote Laser Welding = RLW] vid kontaktering av batteri-"packen" till Audi R8 e-tron, där kravbilden för svetsningen var satt till under 2,5 sekunder per kontaktering, undvikande av elektriska förluster samt att battericellerna inte fick påverkas av svetsprocessen. Med tanke på att kontaktringen idag sker med 1.060(!) skruvförband som tillsammans väger 13,5 kg medför lasersvetsningen också en icke försumbar viktsbesparing. Svetsförsöken hade genomförts med ett RLSK-verktyg från HighYag plus en fiberlaserkälla från IPG och svetsningen hade utförts från kopparsidan. Med denna form av lasersvetsning hade kon-

takteringstiden gått att nedbringa till under 1 sekund, vilket skulle innebära att den totala sammansättningstiden för ett komplett e-tron batteri-"pack" skulle kunna reduceras från 88 till 16 minuter! Med hjälp av ett simuleringsprogram kunde man dessutom optimera svetsmönstret så att värmetillförseln vid svetsningen minimerades och den elektriska ledningsförmågan hos battericellerna därmed ökade med 15 %.

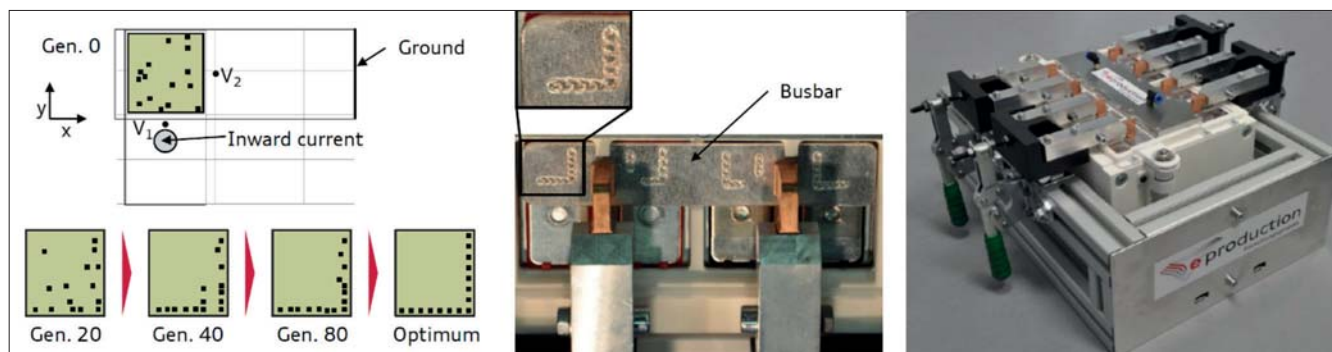
Även BMW har undersökt möjligheterna för lasersvetsning i samband med batteritillverkning, men här handlar det om att svetsa tryckplattor till den aluminiumram som omsluter batteri-"packen" till BMWs nya i8-modell. Aluminiumtorna har plasmabehandlats för att skapa goda förutsättningar för svetsningen då svetsfogen har extremt höga hållfasthetskrav eftersom battericellerna



Figur 3: Ett av IWS speciellt utvecklat verktyg för att undvika höga temperaturgradienter och därmed uppkomsten av intermetalliska faser vid lasersvetsning av aluminium till koppar. Verktöget kan oscillera laserstrålen i x/y-planet med 2 kHz frekvens och arbetar med en fokallängd på 245 mm. Det är dimensionerat för lasereffekter upp till 4 kW och har ett arbetsområde på 10×10 mm.

har en tendens att svälla då de åldras, och då är det viktigt att den bärande ramstrukturen förblir intakt. Med hjälp av en oscillerande laserstråle har dessa hållfasthetskrav kunnat uppfyllas.

För att fastlägga optimala oscilleringsparametrar har man genomfört en DoE [Design of Experiments] där penetrationsdjup, framföringshastighet, fokalpunktsläge och laserstrålens infallsvinkel mot plåtytan hållits konstanta medan variablerna bestod av: oscilleringsform, amplitud och frekvens. Man har undersökt inverkan av oscillering av strålen längs respektive tvärs svetsrikt-



Figur 4: Med avancerad simulerings teknik och "scanner"-svetsning blir det möjligt att optimera svetsmönstret m.a.p. elektrisk ledningsförmåga vid kontaktering av bilbatterier, samtidigt som produktiviteten ökas med en faktor 5!

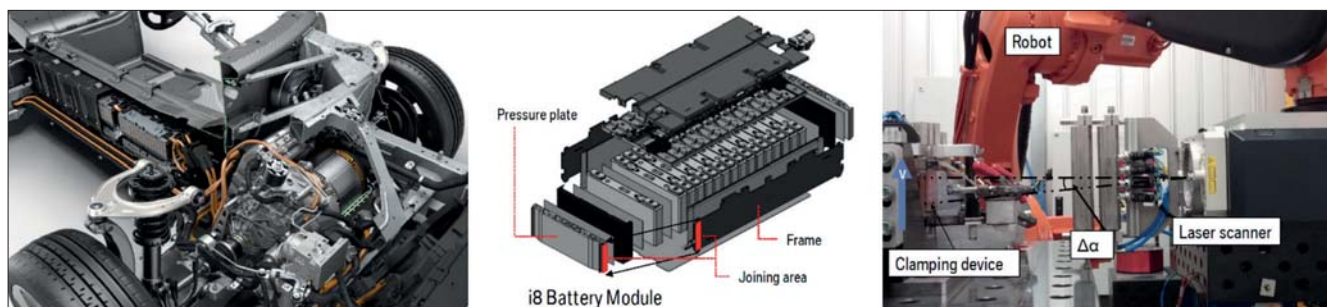


Figure 5: BMW avser att lasersvetsa de tryckplattor som ingår i ramen kring batteripacken på nya i8-modellen. Den försöks-uppställning som använts vid FIZ [Forschungs und IngenieurZentrum] i München syns t.h.

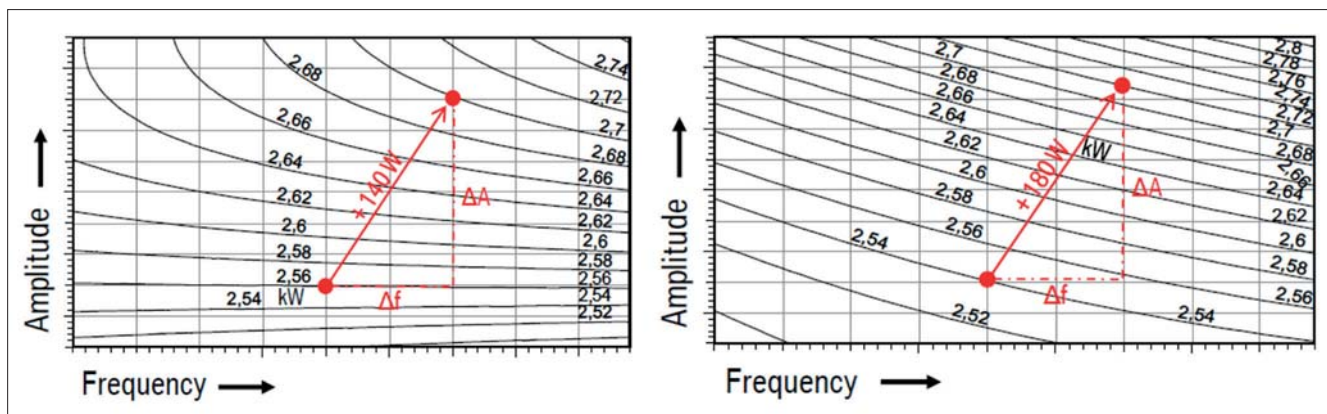


Figure 6: Vid longitudinell oscillering finns inget behov att öka lasereffekten för att bibehålla penetrationsdjupet så länge amplituden i pendlingen är liten (t.v.), medan det vid transversell oscillering (t.h.) alltid krävs en ökning av lasereffekten för att bibehålla penetrationen.

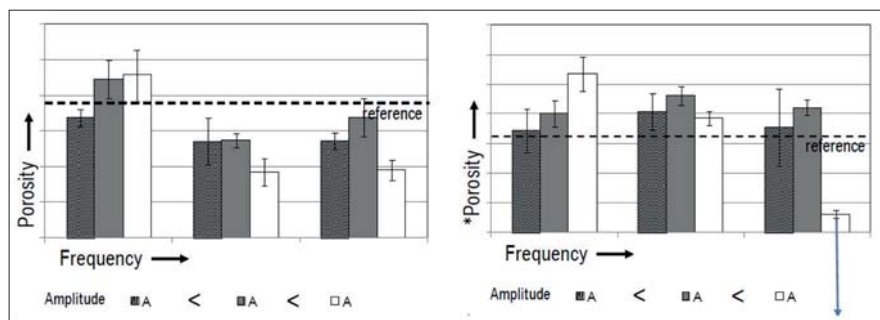


Figure 7: Vid longitudinell oscillering (t.v.) undertrycks porformeringen med ökande frekvens genom att oxidskiktet framför nyckelhålet avlägsnas, medan svets-processen vid motsvarande transversell oscillering (t.h.) blir instabil och resulterar i större svetsdefekter.

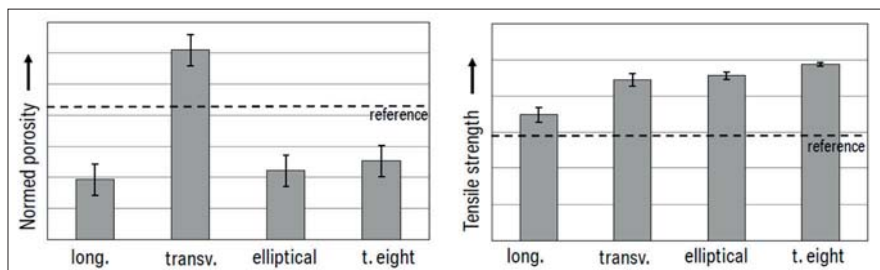
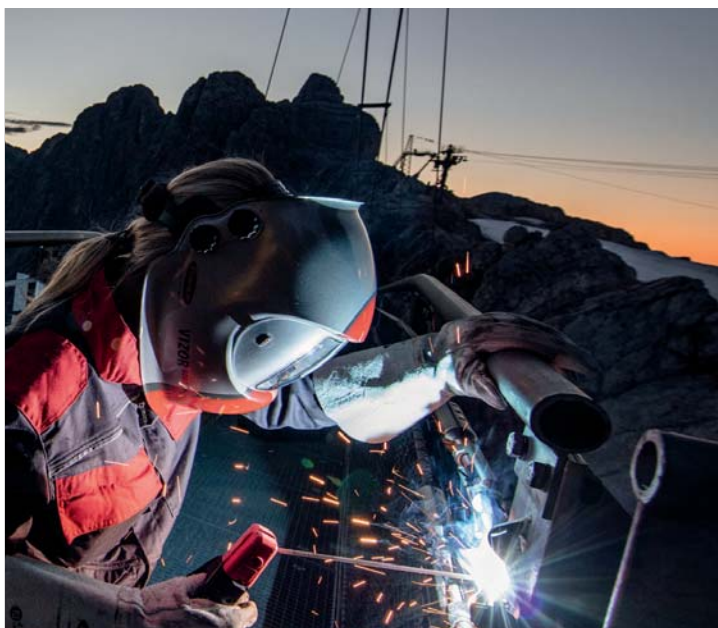


Figure 8: Genom att oscillera laserstrålen i ett elliptiskt eller åttaformat mönster kan man kombinera fördelarna med longitudinell respektive transversell oscillering, d.v.s. låg porförekomst och hög hållfasthet.

ningen och kunnat konstatera att för att bibehålla ett konstant penetrationsdjup vid ökad amplitud måste detta kompenseras med ökad lasereffekt. Detta gäller alltid i fallet med transversell oscillering, men endast vid stora amplituder

då oscillering sker i svetsriktningen [longitudinellt]. Beträffande svetsfogens bredd har longitudinell oscillering ingen inverkan, men självklart ökar bredden vid transversell sådan, dock har man inte kunnat se någon inverkan

av oscilleringsfrekvensen. Risken för porformering undertrycks vid en longitudinell oscillering med hög frekvens. Teorin bakom detta är att oxidskiktet framför nyckelhålet avlägsnas genom en förlängd smälta. Däremot får man en negativ inverkan vid transversell oscillering då svetsprocessen blir instabil vid höga frekvenser och större amplituder, eftersom nyckelhålet momentant överskuggas av smältan. Då longitudinell oscillering har en positiv effekt när det gäller att minimera porförekomsten och transversell oscillering ger en högre hållfasthet genom den bredare svetsen fastnade BMW slutligen för att undersöka dels ett elliptiskt oscilleringsmönster och dels ett som beskriver formen av en "åtta". Förhoppningen var att man på så sätt ytterligare skulle öka hållfastheten genom att på detta sätt skapa en såväl bred som porfri svets. Detta blev också resultatet och man har kunnat konstatera att med detta nya svetsförfarande blir det möjligt att öka hållfastheten med 35 % och minska porositeten med 40 % jämfört med konventionell, "rak" lasersvetsning, varför den nya oscillerings-svetsningen nu håller på att transfereras in i serieproduktion av dessa batteriramar. ■



VI ÄR SVETS.

Möt morgondagens trender och innovationer på Sveriges ledande branschmässor. Här hittar du ett brett utbud av allt inom svets och fogningsteknik.

Elmia Svets och Fogningsteknik är en av sex parallella mässor under det gemensamma namnet Elmia Produktionsmässor.

Registrera dig för fri entré!



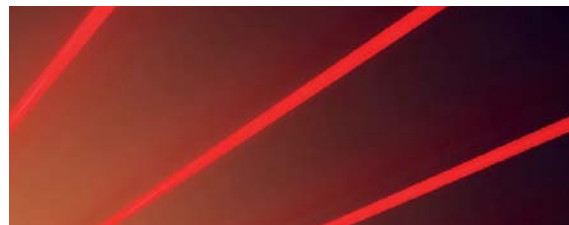
10–13 maj 2022
Produktionsmässorna.se
Jönköping



Välkommen till Laserdagen

Torsdag 12 maj

Elmiamässan, Jönköping



Vi träffas på ELMIA mässan i Jönköping på arenan för Svets & Fogningsteknik.

Torsdag 12 maj

Lasergruppens årsmöte, 08:30 – 09:30

Laserdag I, 10:00 – 14:00

Program:

Välkommen med ett morgonfika

Presentationer från:

- Joachim Andersson, Duroc Laser Coating
- Bo Williamsson, Linde
- Björn Lekander, Permanova
- Jan Frostevarg, Luleå tekniska universitet
- Mikael Olsson, Trumpf

Efter presentationerna och lunch tar vi en tur ut på mässan.

Ett mer utförligt program för Laserdagen I kommer på Lasergruppens webbplats här:



Anmälan:

Du anmäler dig till Laserdagen och årsmötet här:



Laserdagen är kostnadsfri för alla medlemmar. Icke medlemmar betalar 1 000 kr som faktureras innan mötet.

Svetsmässan

Svets och Fogningsteknik

10-13 maj 2022 i Jönköping

Nordens största svetsmessa Svets och Fogningsteknik är inrymd i hall A där Svetskommissionen är placerad mitt i hallen i monter A05:14 i anslutning till scenen där mycket intressant kommer att presenteras under veckan.

Air Liquide Gas AB

031-338 26 48
Wallinsgatan 6
431 41 Mölndal

Alfa Laval Corporate AB

046-36 65 00
Rudeboksvägen 1
226 55 Lund

Autokropolis Engineering

031-774 06 88
Övre Fogelbergatan 6
411 28 Göteborg

Ferruform AB

092-07 65 94
Box 815
971 25 Luleå

GKN Aerospace Engine Systems Sweden

052-09 38 33
461 81 Trollhättan

GKN Automotive AB

0221-76 20 00
Box 961
731 29 Köping

Husqvarna Construction Products Sweden AB

036-570 60 00
Box 2098
550 02 Jönköping

Hydro Extruded Solutions AB

012-28 30 39
612 81 Finspång

Höganäs AB

042-33 80 00
263 83 Höganäs

Högskolan Väst

0520-223 000
461 86 Trollhättan

Laser Machining Inc. LMI AB

028-13 07 16
Storbygatan 7
780 53 Nås

Lasernova AB

063-18 08 80
Odenskogesvägen 1
831 48 Östersund

Lasertech LSH AB

058-68 48 00
Bofors Industriområde
691 80 Karlskoga

Linde Gas AB

08-706 95 00
Products & Applications
Box 30193, 104 25 Solna

Luleå Tekniska Universitet

0920-49 10 00
Avd. för produktionsutveckling
971 87 Luleå

MERITOR HVS AB

058-18 43 86
Ishockygatan 3
711 34 Lindesberg

NKC Manufacturing Sweden AB

031-337 11 39
Kvibergs Broväg 10
402 52 Göteborg

Nippon Gases Sverige AB

076-501 08 00
Box 51
731 22 Köping

Oerlikon Metco Europe GmbH

070-683 84 11
Metco Norden Filial
Gesällvägen 6, 145 63 Norsborg

PG Benson AB

070-6718996
Ryttarvägen 22
132 45 Saltsjö Boo

Pepab Produktionspartner AB

0270-42 91 51
Bröksmyravägen 33
826 40 Söderhamn

Permanova Lasersystem AB

031-706 19 80
Krokslättsfabriker 30
431 37 Mölndal

Scania CV AB

08-553 810 00
151 87 Södertälje

Siemens Industrial Turbomachinery AB

012-28 22 39
612 83 Finspång

SSAB Emea AB

024-37 00 00
781 84 BORLÄNGE

SSAB Oxelösund AB

0155-25 40 00
613 80 Oxelösund

Strandmöllen AB

037-21 55 40
Nasvägen 22
341 34 Ljungby

Swerim AB

08-440 48 70
Isafjordsgatan 28A
Box 7047
164 07 Kista

TeknikCentrum i Gnosjö

037-927 29
Gunnarsvägen 1
335 31 Gnosjö

Tetra Pak Dairy & Beverage Systems AB

046-36 55 59
Ruben Rausings gata
221 86 Lund

Trumpf Maskin AB

0322-66 97 00
Box 606
441 17 Alingsås

Volvo Construction Equipment AB

016-15 10 00
631 85 Eskilstuna

Volvo Car Corporation

Advanced Body Engineering
Dept 93711
Geo. loc. PV2A60
405 31 Göteborg

Volvo Lastvagnar AB Umeverken

090-70 74 77
Bölevägen
Box 1416
901 24 Umeå

Volvo Powertrain Corporation AB

073-902 33 51
405 08 Göteborg
Mikael Nordqvist

Väsman Invest Laserteknik AB

024-01 31 74
Svetsarevägen 1
771 42 Ludvika

Westinghouse Electric Sweden AB

021-34 70 00
SE-721 63 Västerås

Wugang Tailored Blanks Sweden AB

0454-57 47 50
VCBC Norra Industriområde
293 80 Olofström

EWF - SPECIALKURS

LASERSVETSNING / LASERHYBRIDSVETSNING

Lasersvetsning är en högproduktiv sammanfogningsmetod för den moderna tillverkande industrin. Lasersvetsning är framtidens metod enligt många experter och ersätter allt mer konventionella svetsmetoder som MIG/MAG-, TIG-, motstånd- och elektronstråle-svetsning

European Welding Federation, EWF, har utvecklat en fristående specialkurs inom lasersvetsning och laserhybridsvetsning som Luleå tekniska universitet ger på svenska. Ett internationellt diplom, EWF-diplomet, garanterar utbildning av hög kvalitet

Kursen, nivå B, omfattar totalt 68 timmar och ger Dig goda teoretiska och praktiska kunskaper om lasersvetsning, men även en överblick över andra laserbearbetningsmetoder

Kursen vänder sig till

svetsingenjörer, svetstekniker, konstruktörer, produktionstekniker, utvecklingsingenjörer och utbildare m.fl. som vill skaffa sig kunskap om metodens möjligheter för rationell och effektiv sammanfogning

För mer kursinformation:

<https://www.ltu.se/EWF>

*Vi erbjuder även anpassade kortare kurser
(utan diplom), intresseanmäl för mer info*

**Datum: Kurs planeras för
2023, anmäl intresse för
uppdatering av kursdatum**

**För intresseanmälan, kontakta:
Jan Frostevarg, Luleå tekniska universitet
jan.frostevarg@ltu.se, 0920 - 49 1675**



Inte bara en ny logga

**Nu tar vi ett starkare grepp
mot en hållbar tillverkning**



PERMANOVA