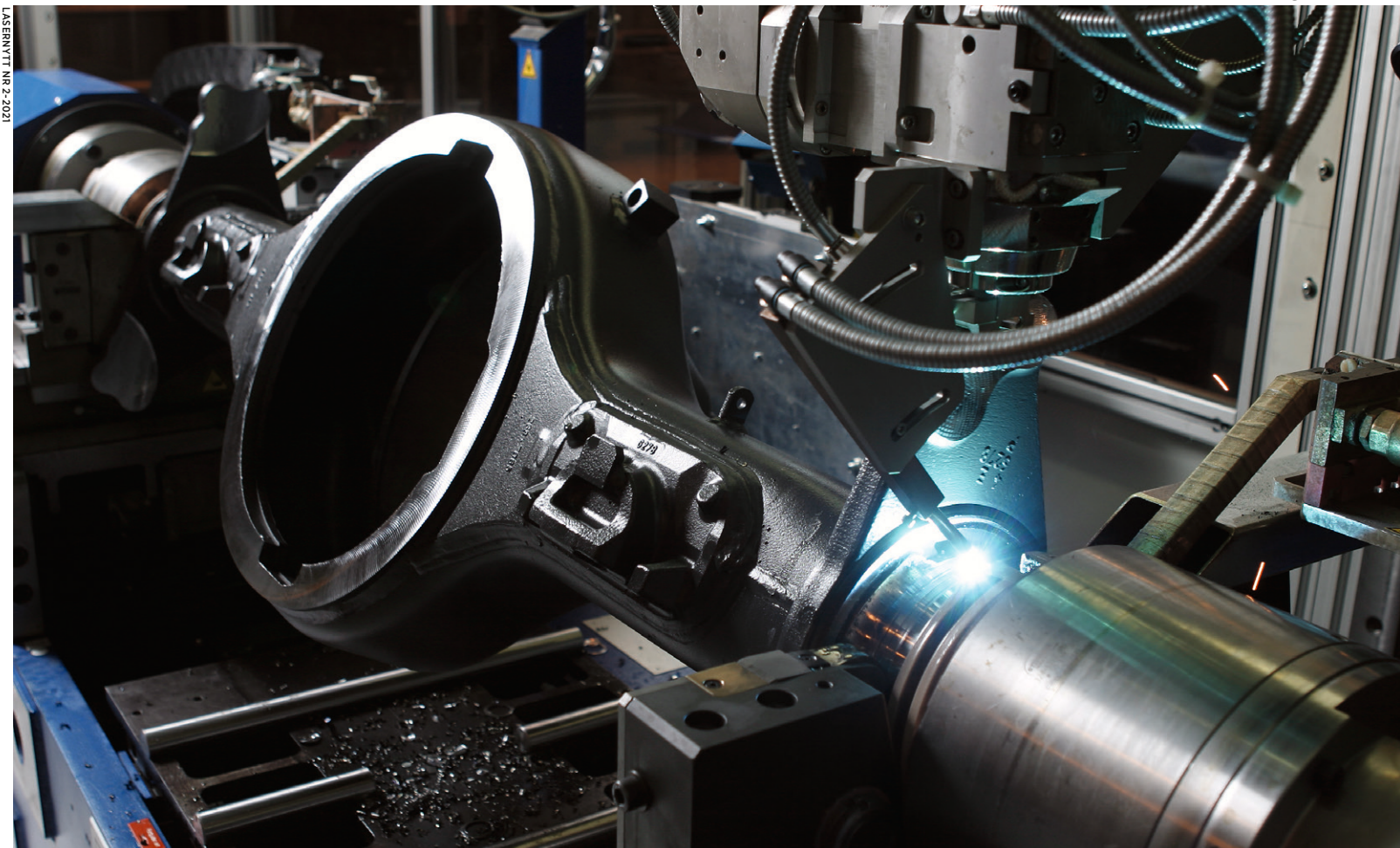


Lasernytt

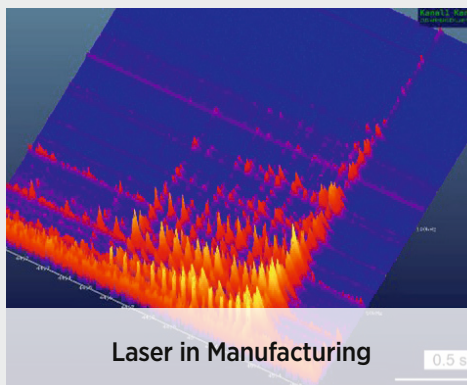
2-2021



LASERSVETTSNING I TJOCKT GODS



iiW-C-IV



Laser in Manufacturing



Rapport från 22nd EALA

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.

Intresseanmälan:

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

Datum: Kurs planeras för 2021, anmäl intresse för uppdatering av kursdatum

Mer information: Jan Frostevarg,
Luleå tekniska universitet
jan.frostevarg@ltu.se, 0920-49 1675

LASER

LASERGRUPPEN

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.eu

Omslagsbild

Pyramidstruktur

Pikosekundlaser

Bild: Johnny K. Larsson

Produktion: BrandFactory

Tryck: BrandFactory, Stockholm

www.brandfactory.se



INNEHÅLL

TANKAR FRÅN STYRELSEN

1

LASERSVETSNING I ALUMINIUM

2

LASERVETSNING I TJOCKT GODS

4

POWER BEAM PROCESSES – IIW 2021

6

LASERS IN MANUFACTURING – LIM 2021

11

LASERTEKNIKEN I E-DRIVE OCH E-MOBILITY

16

NOSTALGIARTIKEL – FRÅGA LASERDOKTORN

32

Tankar från styrelsen



TANKAR FRÅN STYRELSEN

BENGT JOHANSSON

Trots att vi genomgått och fortfarande genomgår en pandemi ser vi att industrin går på högvarv. Den inledande chocken med lockdowns och restriktioner har skapat ett uppdämt behov av material och tjänster. Vi har nu vant oss vid möten via Teams och Zoom och den ökade tiden hemma har också lett till ökad konsumtion särskilt när det gäller bygg och heminredning vilket tydligt också märks på verkstadsgolvet.

Inom plåtbranschen och laserskärsektorn ser vi nu nästan en överhettning med långa köer av jobb.

Idag råder materialbrist och priserna på metaller mm har gått upp ordentligt och i skrivande stund fortsatt ökande.

De små verkstäderna drabbas mest eftersom de ofta "står sist i kön".

Inom mindre företag syns ett ytterligare ökande intresse för laserskärning och laserteknik.

På maskinsidan ser jag en ökad marknad för fiberlasrar och speciellt att tekniken börjar bli mer överkomlig i pris tack vare att priset på laserkällorna och maskinerna tenderar att sjunka.

Vi kan tex se maskiner med effekter på 12kW under fyra miljoner kronor från Kina.

Däremot har inte lasersvetsning ännu fått något allmänt "lyft" inom legoindustrin något jag väntat på sedan tidigt 2000 tal då

laserskärning verkligen "exploderade" och fortfarande fortsätter.

Vad det beror på kan man ju alltid fundera över. I tex Tyskland är lasersvetsningen betydligt mer utbredd bland mindre företag.

Förmodligen är det en kombination av att tekniken är dyr och komplicerad jämfört med konventionella svetsmetoder eller att konstruktörerna inte har fått upp ögonen för tekniken.

Jag hoppas fortfarande på detta "lyft" skall komma särskilt nu när tekniken och laserkällorna börjar komma ner på mer attraktiva nivåer prismässigt och att bättre visionsystem för detaljigenkänning och fogföljning nu finns. Dessa tekniska framsteg tror jag kommer att göra lasersvetsningen mer tillgänglig och attraktiv inom en snar framtid.

Inom 3d och additiv tillverkning finns ett mycket stort intresse och nyfikenhet även bland mindre företag. Idag är det vanligt med mindre "desktopskrivare" för prototyper men produktionsmaskinerna och metallprintrarna har fortfarande en bra bit kvar.

Teknikutvecklingen står aldrig stilla och vi ser hela tiden många nya möjligheter för lasertekniken.

Författare
Bengt Johansson

New shielding gas mixtures for laser conduction welding of aluminum



Junjie Ma, Application Technologies, Linde Gas, Tonawanda USA.
Bo Williamson, Application manager laser and AM, Linde Gas, Region Europe North.

The automotive industry requires high surface quality of laser welded aluminum parts due to the need for flawless and defect-free painted automotive bodies [1]. It is common to use argon as shielding gas for laser welding of thin aluminum parts with filler wire. However, defects such as skips (i.e. discontinuities), holes in the weld and a rough weld surface is quite common when argon is used. Since the rough weld surface can be clearly seen after painting, additional processing (such as post weld grinding) is required to meet the quality requirements.



There are two types of laser welding modes: conduction and keyhole welding. When the laser beam intensity is less than 109 W/m², the laser beam irradiated on the workpiece surface is partially reflected and absorbed. The laser energy absorbed on the surface of the workpiece is transported into the material mainly by heat conduction and fluid convection of the melted material. This process is known as conduction mode welding.

During the laser conduction welding process, formation of surface defects such as skips, holes and scaly or wavy seam surfaces are

usually initiated by process irregularities that disturb the melt pool dynamics [2]. This interrupts the stable wetting and spreading of the molten metal. When argon is used as shielding gas during conduction welding of aluminum the surface tension of the molten aluminum is high, resulting in insufficient wetting. This makes the wetting and spreading of the aluminum melt pool prone to be disturbed during welding, resulting in surface imperfections.

Trials

Research was conducted to develop shielding gas mixtures targeted specifically for fiber laser conduction welding of aluminum alloys. A wide screening test of two-components argon-based mixtures with small amounts of various active gases (e.g. N₂, O₂, CO₂, N₂O) was carried out to understand the effect of gas additives on wettability, weld penetration, and surface roughness. The wettability was measured through the contact angle between the weld and the base material (a smaller angle indicates an improved wettability).

Results

As shown in Figures 1a and 1b, when the reactive gas content is below 1% there is no significant difference between the mixture and pure argon. Above 1%, the reactive gas addition improves wettability and increases penetration. The effect from different

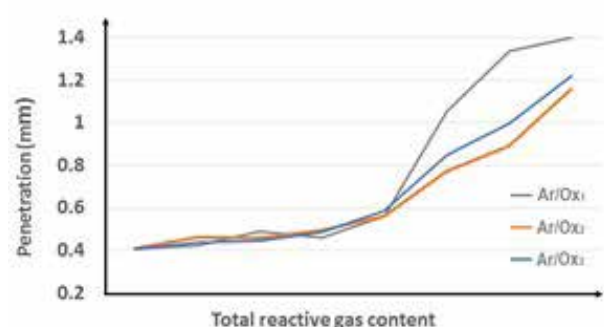
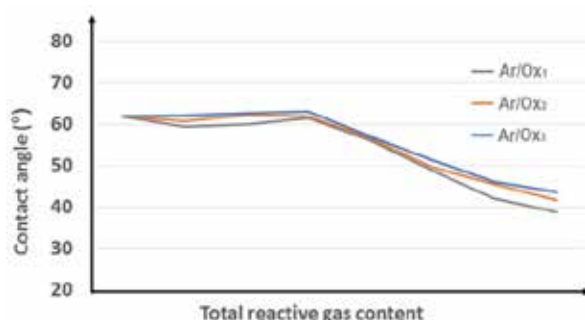


Figure 1: Effect of reactive gas additives on (a) contact angle and (b) weld penetration

reactive gases on wettability is similar at equivalent concentrations. The penetration is quantitatively different when the concentration is above 1%, and some additives give deeper penetration compared to others.

Active gases containing oxygen (e.g. O₂, CO₂, N₂O) react with the aluminum melt, forming aluminum oxides at the molten aluminum interface/surface. The oxide film lowers the surface tension of the aluminum melt, improving the wetting allowing the molten aluminum to spread out towards the toe of the weld. Moreover, the surface oxides enhance the laser beam absorption, allowing deeper penetration.

Microscope photos of the weld beads obtained with argon/active gas mixtures are shown in Figure 2. The surface roughness increases with increasing reactive gas content. The weld varies in width and height when the concentration of additives is above a level of 1%. Weld surfaces obtained with argon/oxygen mixtures are rougher than those obtained with argon/ N_xO_y mixtures at similar oxidizer concentration. The additive gas content should be controlled to below a certain level to achieve acceptable surface appearance.

As discussed previously, while the additives should be above a certain level to have effect on the wettability the additive gas content should be below a certain level to achieve acceptable surface appearance (Figure 3). There should exist an additive gas content window that allows improvement in wetting while maintaining an acceptable surface roughness and stable welding.

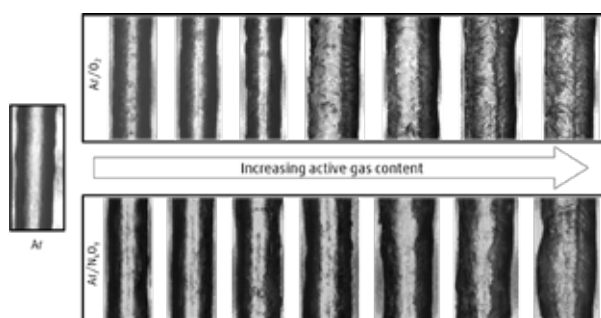


Figure 2: Effect of gas additive on contact weld surface roughness

Further studies were carried out on argon-based three-component gas mixtures, and the optimized gas mixture (0.5%N₂O/0.75%O₂ in Ar) was shown to improve wettability of the aluminum melt pool while maintaining the stability of the welding process and yielding acceptable surface roughness. Compared to pure argon, this novel shielding gas mixture improves weld surface quality for laser welding different types of aluminum alloys (e.g., AA6061, AA5052, AA3003) in a flare bevel joint configuration, a joint commonly used in rear lift gates in the automotive industry. The welding parameters are listed below in table 1.

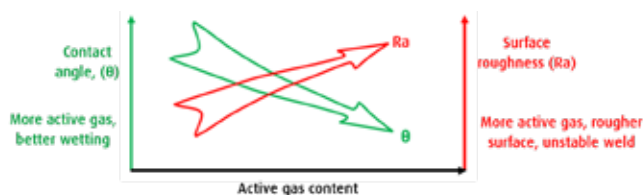


Figure 3: Effect from the active gas content on wettability and surface roughness

Table 1: Laser welding parameters

Laser power:	3150 W
Welding speed:	85 mm/s (5.1 m/min)
Wire feed rate:	5.1 m/min (85 mm/s)
Base metal thickness:	1.27 mm (0.05 inch)
Wire:	AA4047, 1.2 mm
Shielding gas flow rate:	30 SCFH
Nozzle (ID):	7.9 mm (5/16 inch)



Figure 4: (a) Flare bevel joint with locations (A to F) of the surface photos taken. (b) Schematic view of the cross-section of the flare bevel joint configuration

Figure 4a shows a 15-inch-long flare bevel AA 6061 weld joint. Surface photos were taken at five different positions on the bead, and microscope photos were taken from the center of the bead. The cross-sectional view of the joint design is also provided (Figure 4b). Figure 5 shows photos of the weld surfaces obtained under three conditions: (a) pure argon, (b) pure argon with 10% increased laser power, and (c) the new shielding gas mixture. When using pure argon as shielding gas there are skips present in the weld caused by the poor wetting. Also, the weld surface looks scaly or wavy. Poor wetting resulted in less tolerance to the disturbance during the welding causing very rough surface (Figure 5a). Increasing the laser power can mitigate the defect; however, the surface is still quite rough (Figure 5b). With the new gas mixture, the weld does not show any defects. The surface is also very smooth (Figure 5c).

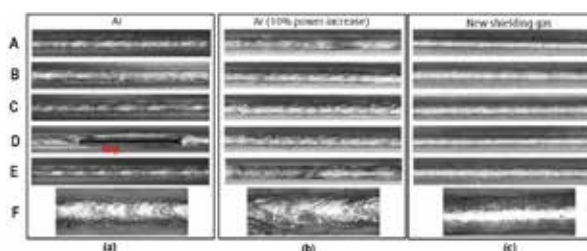


Figure 5: Surface photos (locations: A to F) of the welds obtained with (a) pure argon, (b) pure argon with 10% increased laser power, and (c) new shielding gas

Conclusion

By adding small amounts of oxidizing components, the results from conductive welding of aluminum alloys with filler wire using fiber laser technology may be enhanced in terms of weld quality and penetration. A small addition of oxygen and nitrous oxide to argon gives the optimum results in this context. ■

Reference:

- [1] G. Yang, et al., Decreasing the surface roughness of aluminum alloy welds fabricated by a dual beam laser, *Materials & Design* 127 (2017) 287–296
- [2] M. Ungers, et al., In-situ quality monitoring during laser brazing, *Physics Procedia* 5 (2010) 493–503

20 års erfarenheter av lasersvetsning i tjockt gods



Mikael Juntti,
Scania Luleå

Scania byggde 1968 en fabrik för tillverkning av chassikomponenter till lastbilar i Luleå. Det var från början främst rambalkar och tvärbalkar som tillverkades. Några år senare startades även tillverkning av bakaxelbryggor. Axeltapparna sammanfogades med bryggan med hjälp av friktionssvetsning. Man var då tvungen att bearbeta tapparna efter svetsning, vilket var ganska krävande bl.a. eftersom många bakaxelbryggor har en tyngdpunkt som är förskjuten från centrumlinjen.

Vid millennieskiftet inleddes ett arbete med att rationalisera flödet för tillverkning av bakaxelbryggor. Genom att ersätta friktionssvetsningen med lasersvetsning så kunde man svetsa på en färdigbearbetad axeltapp och därmed eliminera ett antal tillverkningssteg. Den beräknade livslängden på svetsförbandet ökade också genom att geometrin vid fogen blev mer gynnsam för att minimera utmattning.

Processen togs fram med hjälp av bl.a. LTU och är delvis patenterad. Ingående delar bearbetades med hög precision så där fanns goda förutsättningar för lasersvetsning. Mycket möda lades ner på att få en rigorös fixturering för att nå de högt ställda kraven. Eftersom artiklarna som ska svetsas är ganska stora och

förvärmning är en del i processen så krävdes fogsökning för att minimera risken för att man svetsar i fel position och då får bindfel. En utmaning var att klara att svetsa med 100% genomträngning i det tjocka materialet, 12,5–15mm. Svetsning görs utan tillsatsmaterial.

Valet föll på en CO₂-laser från Trumpf, som installerades 2002 och tillverkningen rampades upp och ersatte successivt friktionssvetsningen. 2008 installerades en andra cell med liknande specifikation. Med stöd av tekniker och erfarenheter från Scania Luleå installerades 2014 en svetscell hos Scania i Sao Paolo med samma koncept och därmed så svetsas i stort sett alla bakaxlar inom Scania med hjälp av laser.

Under projektets gång insåg man att ultraljudskontroll skulle vara nödvändigt för att kontrollera svetsresultatet. Förbandet är kritiskt och t.ex. ett bindfel kan få allvarliga konsekvenser på slutprodukten livslängd. Till en början införskaffades manuell ultraljud där svetsresultatet kontrollerades med hjälp av fixturer. Snart installerades en automatisk ultraljudsanläggning för att på ett rationellt sätt kunna kontrollera 100% av svetsarna. Den manuella ultraljudsutrustningen har behållits för att ha en dubbelkontroll genom stickprov. Utöver det görs visuell avsyning ut- och invändigt och regelbunden revision genom ett uttag till förstörande provning (makroprov).



Figur 1. En av lasersvetscellerna med tillhörande hanteringsutrustning



Figur 2. Lasersvetsning av bakaxelbrygga i roterande fixtur.

Om en svetsfog blir underkänd vid någon av kontrollerna så repareras den på olika sätt beroende på typen av avvikelse. Det kan handla om att TIG-behandla mindre fel, lasersvetsa en gång till, eller att kapa av axeltappen och svetsa en ny på plats. Allt är reglerat i tekniska föreskrifter framtagna efter utprovning av de olika metoderna.

2019 passerades en miljon lasersvetsade bakaxelbryggor

Vilka erfarenheter har då gjorts under denna tid? Man kan snabbt konstatera att personalens kompetens är väldigt avgörande för att man ska nå framgång. Och då menas alla som jobbar med processen. Operatörer, processtekniker, underhåll m.fl. Det är komplexa anläggningar med många system som ska kommunicera med varandra och där allt måste fungera. Det finns t.ex. system för själva svetsningen, fogsökning, processövervakning, hantering, värmebehandling, ultraljudskontroll, stickprovskontroller och spårbarhet av svetsdata och material för varje bakaxelbrygga som svetsats.

Alla kan inte kunna allt. Man bör se till att man på varje skift har en bra mix av den kompetens som behövs. T.ex. kan man ha olika nivåer där alla kan det mest grundläggande, men kanske bara några behöver kunna göra de mer avancerade uppgifterna t.ex. fininställningar av laserparametrar eftersom det normalt inte ska behöva justeras så ofta.



Figur 3. Axeltapp lasersvetsad ihop med bakaxelbrygga.

Ultraljudskontroll är en metod som ofta används för kontroll av svetskvalitet på lasersvetsar, särskilt stumfogar. Här ställs höga krav på personalens kunskap och erfarenhet för att uppfylla kraven i SS-EN ISO 9712. Krävande och kostsamma utbildningar måste till för att säkra detta. Har man skiftgång med produktion en stor del av veckans timmar och arbetsrotation så krävs ganska många som uppfyller dessa krav. Man måste ta höjd för detta när man planerar sin kvalitetskontroll och kompetensbehov.

Kvalitetskraven på lasersvetsar är ofta högt ställda. Ofta ställs krav på kvalitetsnivå B enligt SS-EN ISO 13919. Detta gäller då alla typer av diskontinuiteter. Man kan fundera på om detta är optimalt. T.ex. så uppstår ofta porer i viss grad i det överlapp som blir när man svetsar en rörsvets. Detta område bör placeras där man har minsta belastningarna, men kan ändå ofta leda till reparationer. Här är det viktigt att kraven ställs så rätt som möjligt så dom kan innehållas med kapabilitet och därmed undvika onödiga reparationer och kassationer. Önskvärt vore om man kan differentiera kraven så att man tillåter mer av de minst farliga diskontinuiteterna där det är möjligt t.ex. genom att ha lägre krav i lägpåkända områden.

Underhåll av dessa komplexa anläggningar är en annan nyckelfaktor som måste fungera. Speciellt om man har tillverkning dygnet runt under de flesta av årets dagar.

Renhet på ytorna som ska fogas är en viktig faktor precis som vid all svetsning. Kvarvarande rester av t.ex. olja kan leda till olika problem såsom blowouts, porer etc. Automatiserad rengöring vore det ideala, men ofta blir man av praktiska skäl tvungen att rengöra för hand.

Detta är ett exempel på hur ny teknik ger nya möjligheter att förbättra processerna. Även om en anläggning är installerad och tagen i drift sedan länge så kan man fortfarande jobba med att hitta förbättringar. ■

Läs mer på Internet

www.scania.com/productionunitlulea/sv/home.html

Power Beam Processes – Rapport från 74th IIW Annual Assembly – Commission IV



Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering



Årets IIW [International Institute of Welding] Annual Assembly tvingades liksom förra året att genomföras digitalt p.g.a. rådande Corona-pandemi. Uppslutningen av svetsspecialister från hela världen var imponerande trots att många fick ansluta vid obehagliga tidpunkter då det var CET [Central European Time] som gällde, och trots bristande teknik vid detta IoT [Internet of Things] -genomförande. Från Lasergruppens sida hade vi bestämt att bevaka arbetet i den s.k. Kommission 4 [C-IV Power Beam Processes], vars ordförande är Dr. Herbert **Staufer** [Fig. 1] från Fronius GmbH med huvudsäte i Wels, Österrike. De tekniska presentationerna bjöd på ömsom vin och ömsom vatten, men nedan följer det väsentligaste i det innehåll som presenterades under två konferensdagar.



Figur 1. Herbert Staufer från Fronius GmbH ansvarar för Kommission 4, vilken är indelad i de tre undergrupperna:
A) Laserprocesser
B) Elektronstråleprocesser
C) Laserhybridprocesser

En gammal bekant i dessa sammanhang är Ömer **Üstündag** från BAM [Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung] i Berlin, där man framförallt fokuserat på lasersvetsning av grövre materialtjocklekar. Sålunda har man vid tidigare konferenser presenterat resultat från laserhybridsvetsning [HLAW = Hybrid Laser Arc Welding], och den här gången redogjorde

Ömer från försök utförda på plasmaskuret 20 mm tjockt konstruktionsstål [S355J2]. Vid tjocklekar i den här dimensionen ökar risken för varierande spalter vid stumfogar samt att svetsroten tenderar att hänga ner. Det senare kan motverkas om spalten mellan plåtarna minimeras i kombination med ökad svets hastighet och lasereffekt. Ett annat sätt är att introducera s.k.

Lorenz-krafter i smältan genom att applicera ett magnetfält 2 mm under svetsroten [Fig. 2]. Vid sådana försök hade en 20 kW fiberlaser använts i kombination med en 600 A GMAW [Gas Metal Arc Welding] -strömkälla, och tillsatsstråden var i materialet G3Ni1 [EN-ISO 14341-A].

Stumsvetsning av plattor med plasmaskurna kanter hade jämförts med

laserskurna dito, där de senare ger bättre förutsättningar genom mindre spalter och raka snittkanter [Fig. 3]. Dock visade sig spaltöverbrygnadsförmåga och svetskvalitet vara jämbördig då tekniken med elektromagnetiskt "rotstöd" utnyttjades [Fig. 4]. De parametrar som användes under svetsförsöken var:

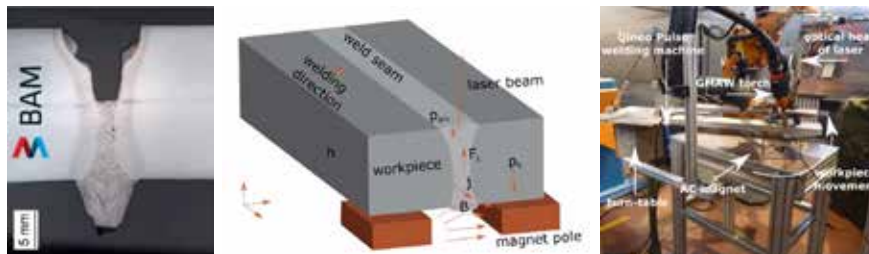
- Lasereffekt 11,5–13,7 kW
- Svetshastighet 0,5–0,75 m/min
- Trådmattningshastighet 12–15 m/min
- GMAW-effekt 1.140–1.450 W
- Frekvens 1,2 kHz

Fokuspunkten var placerad 6 mm ner i materialet då man som tumregel väljer denna position till 1/3 av plattjockleken.

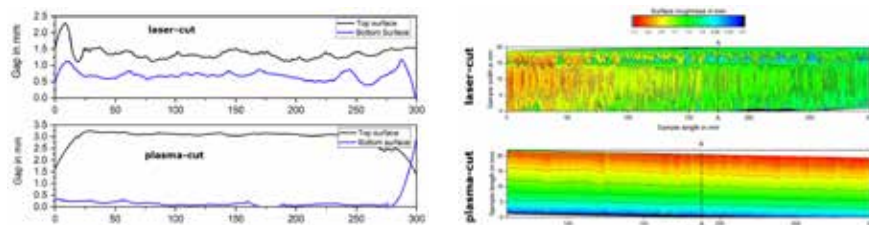
På en fråga från Dr. Stauffer angående det applicerade magnetfältets inverkan på ljusbågen blev svaret att en viss avlänkning av denna i svetsriktningen kunnat observeras. Avslutningsvis menade Herrn Üstündağ att potentialen för ytterligare HLAW-applikationer ökar med denna form av elektromagnetiskt "rotstöd" då såväl spalter som fellinjering upp till 2 mm ändå visat sig ge högkvalitativa svetsar.

Chris Punsion från CVE [Cambridge Vacuum Engineering] hade i samarbete med kollegor från företaget Cammell Liard och TWI [The Welding Institute] i Cambridge U.K. tagit fram procedurer för hur man kvalificerar metoder som laser- och elektronstrålesvetsning [EBW = Electron Beam Welding] under "lokalt" vakuum. Drivkraften för ett sådant tillvägagångssätt är att det inte finns tillräckligt stora vakuumkammrar om man önskar använda dylika processer vid svetsning av exempelvis stora tryckkärl. Därför har man vid CVE utvecklat en mobil lösning för ändamålet där vakuumkammaren kan evakueras på 6 minuter [Fig. 5]. Merparten av de redovisade experimenten handlade om orbital elektronstrålesvetsning av cylindrar med 60–80 mm väggjocklek [Fig. 6]. Dessa var tillverkade i antingen kol-mangan-stål eller austenitiskt rostfritt 304H. I det senare fallet hade orbitalsvetsning av cylindrar med 2 m diameter skett i 3G-position, men även 1,5 långa linjära svetsar hade utförts i 2G-position. Mr. Punsion lät meddela att nästa år förväntas man ha en liknande utrustning för lasersvetsning [Fig. 7], dock inte med full vakuum-kapacitet, men med så lågt tryck som 0,1 mbar!

Under kommissionsmötets andra dag bjöds vi på två presentationer från BIAS [Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik]. Först kunde vi lyssna till Herrn Marcel Möbus som presenterade ett



Figur 2. Vid laserhybridsvetsning av tjockt material tenderar svetsroten att hänga ner, något som kan motverkas genom att applicera ett magnetfält under fogen. T.h. den använda försökssupställningen vid BAM.



Figur 3. Uppmätta spalter mellan plåtarna samt plåtkanternas ytjämnhet indikerar bättre förutsättningar för en god svetskvalitet när laserskärning används jämfört med plasmadito.



Figur 4. För såväl laserskurna (t.v.) som plasmaskurna (t.h.) plåtar visade sig laserhybridsvetsningen vara mycket tolerant mot spalter och fellinjering när tekniken med elektromagnetiskt "rotstöd" användes.



Figur 5. Även om det finns stora vakuumkammare för EBW att tillgå idag rymmer de inte tryckkärl av dimensionen t.h. Därför har CVE utvecklat en mobil utrustning för lokal elektronstrålesvetsning vars kammare kan evakueras på under sex minuter.



Figur 6. Att EB-svetsa CMn-cylindrar med 80 cm diameter tar cirka 6 minuter med s.k. lokalt vakuum.



Figur 7. En installation för lasersvetsning under lokalt vakuum utvecklas nu vid CVE.

nytt angreppssätt då det gäller att variera energifördelningen i en laserstråle över olika fokalplan genom att superpositionera två laserstrålar med skilda våglängder med varandra. Att variera energiintensiteten i olika fokalplan möjliggörs genom att laserverktyget är försett med rörliga fokuser- och kollimeringslinser [Fig. 8]. De båda laserkällor som hade använts var en diskaser från Trumpf [TruDisc12002]

med 1.070 nm våglängd och en fiberlaser från IPG [YLR-8000S] med våglängden 1.030 nm. Den förstnämnda har en Rayleigh-längd på 4,2 mm och den senare en på 1,6 mm, och fokuspunktsdiametererna mättes till 390 respektive 180 μm .

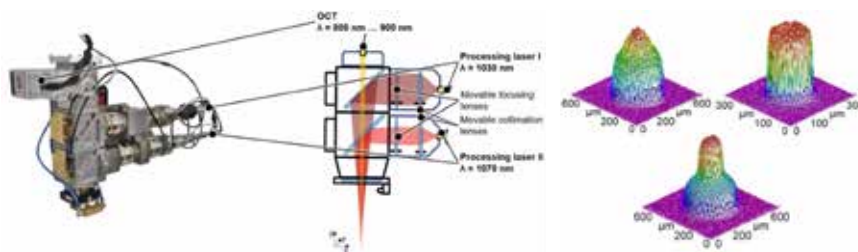
Svetsförsök hade utförts på S235JRC-stål och den totala laserenergin hade hållits konstant på 3 kW, men varierats i olika förhållanden mellan de båda laserkällorna.

Svets hastigheten i alla försöken låg på 2 m/min, och inverkan på penetrationsdjup, sprutbenägenhet och porbildning hade studerats [Fig. 9].

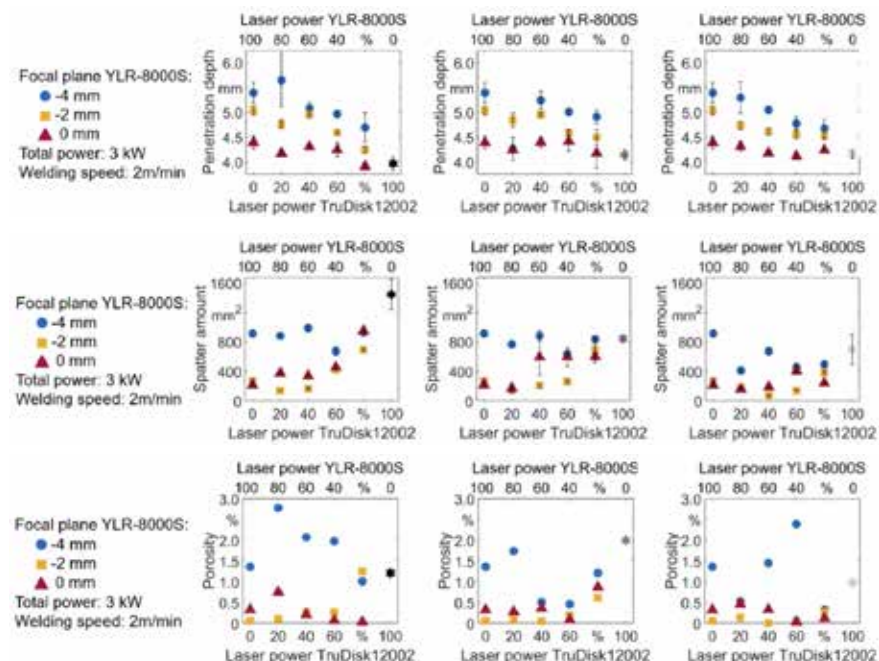
Penetrationsdjupet visade ha mest inverkan från fiberlasern, något som inte är förvånande då denna presenterade den minsta fokalpunkten, och penetrationen ökade då fokalplanet låg längre ner i materialet. Sprutbenägenheten var mindre beroende av energifördelningen mellan de båda laserkällorna, men här erhöill man den bästa processtabiliteten då fokalpunkten låg på plåtytan [$z=0$ mm]. Detta visade sig också i en förhållandevis låg porositet i svetsgodset, vilken däremot ökade väsentligt vid en djupare positionering av fokalpunkten [$z=4$ mm]. Disklasern är mindre känslig för läget hos fokalplanet, vilket förklaras av dess längre Rayleigh-längd. På en fråga från auditoriet om huruvida en diodlaser kan användas i denna form av hybriduppställningen svarade Herr Möbus att de båda våglängderna behöver ligga nära varandra, varför att kombinera en diodlaser med en diskaser är mindre rekommendabelt.

Den andra BIAS-presentationen genomfördes av välbekante Dr. Peer **Woizeschke** och handlade om hur man genom att öka plåtkanters tjocklek kan underlätta efterföljande fogningsoperationer. Vi har ju sedan flera år blivit bekanta med denna typ av "laseromformning", inte minst genom de beskrivningar som gjorts vid tidigare laserkonferenser av BIAS's institutionsföreståndare professor Frank **Vollertsen**. Genom laseruppvärmning och partiell smältning av änden på en metallstav eller kanten på en plåt, följd av en mekanisk tryckformning, kan man skapa lokala förtjockningar på en dylik artikel. Vid användning i syfte att öka tjockleken på en plåtkant hade två angreppssätt använts, dels att arbeta med defokuserad laserstråle, dels att använda sig av oscillering av strålen i framföringsriktningen [Fig. 10]. Detta skedde med en frekvens på 100 Hz och en amplitud på 6,3 mm. I det förstnämnda fallet krävdes hela 5,5 kW då fokalpunkten på plåtytan mätte 6,1 mm, att jämföras med oscilleringsalternativet där fokalpunkten blott var 200 μ m i diameter och därför krävde blott 1,1 kW lasereffekt. Framföringshastigheten låg på 0,8 m/min för båda alternativen och som skyddsgas använde man Argon med ett flöde på 20–30 l/min.

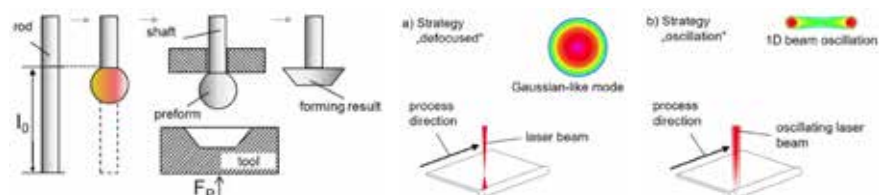
Praktiska användningsområden kan t.ex. vara att möjliggöra sprickfri 180°-falsning av plåtmateriel med låg



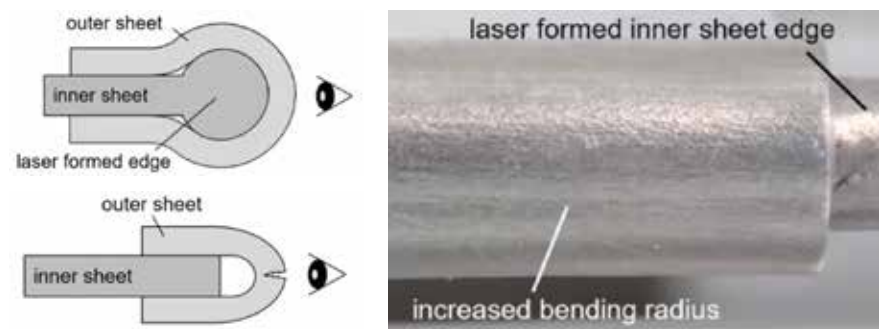
Figur 8. Ett specialverktyg med rörliga fokuser- och kollimeringslinser för två överlagrade laserstrålar med skilda våglängder. Övan t.h. energifördelningen i fokalplanet för våglängderna 1.030 resp. 1.070 nm och därunder den kombinerade strålens energiintensitet.



Figur 9. Penetrationsdjup, sprutbenägenhet och porositet vid svetsning av S235JRC-stål med olika energi-fördelning mellan fiber- och diskaser. Disklaserns fokalplan, angivet frv., 0, -2 och -4 mm.



Figur 10. Tv. grundprincipen för "laseromformning", och t.h. de båda angreppssätt man kan använda sig av för att förtjocka en plåtkant på liknande sätt; defokuserad laserstråle eller strålscillering i processriktningen.



Figur 11. Att öka kanttjockleken på den inre plåten möjliggör en sprickfri, efter-följande falsningsoperation.

duktilitet [Fig. 11], samt att skapa bättre förutsättningar för spaltöverbryggnad vid lasersvetsning.

Ett tredje exempel med lokal plåtförjockning handlade om lasersvetsning av ”dolda” T-fogar, ett ämnesområde som studerats av olika *BIAS*-medarbetare under årens lopp, då i kombination med OCT [Optical Coherence Tomography] som processövervakning [se *LaserNytt* 1-2020]. De senaste experimenten i detta ämne hade utförts på 1,5 mm tjockt aluminium [EN-AW5083] där änden på den vertikala plåten förtjockats till 3 resp. 5 mm med sagda metod för att kompensera för lägesavvikelser vid svetsningen. Laserkällan var en TruDisc12002 från *Trumpf* kombinerad med *Precitecs* svetsverktyg YW52 och deras OCT-verktyg IDM [In-Depth Monitoring]. Fokalpunkten positionerades i den horisontella plåtens underkant och mätte 75 μm , och svets-hastigheten var satt till 3 m/min. Två olika lasereffekter hade använts, 1,38 och 2,13 kW, något som visade sig ha en avgörande inverkan då OCT-signalen, vilken hade en insamlingsfrekvens på 70 kHz, skulle särskilja partiell penetration från full genombränning [Fig. 12].

I en av många kinesiska presentationer under konferensen kunde vi lyssna till Zhongyan **Mu** från *Huazhong University of Science and Technology*, som tillsammans med kollegan Shengyong **Pang** hade studerat förångningstryckets inverkan på nyckelhålet. Den plasmaformering som är ett resultat av sagda materialförångning kan påverka processtabiliteten vid lasersvetsning och leda till defekter i form av porer eller avsevärt svets-sprut.

Därför hade man utvecklat en simuleringsmodell av svetsprocessen för att hitta optimala parameterinställningar och validerat modellen genom att jämföra utfallen med resultaten från experimentella försök utförda på 5 mm tjockt rostfritt 316L-material som har en förångningstemperatur kring 3.000 °K. Modellen är indelad i vad man kallar en förångningsdel med ett kort tidssteg på 10-8 sekund och en solid metall-del med ett längre tidsintervall på 10-6 sekund. Initiala parametrar som provats var 4 kW lasereffekt, 250 μm fokalpunkts-diameter, en svets-hastighet på 2 m/min samt Argon som skyddsgas med ett flöde på 15 l/min. Precis som i verkligheten visade simuleringarna den våldsamma instabilitet, med en rumslig rörelse-hastighet kring 400 m/sek, som uppstår i nyckelhålet allteftersom förångningstrycket varierar lokalt [Fig. 13]. Detta gör att nyckelhålet

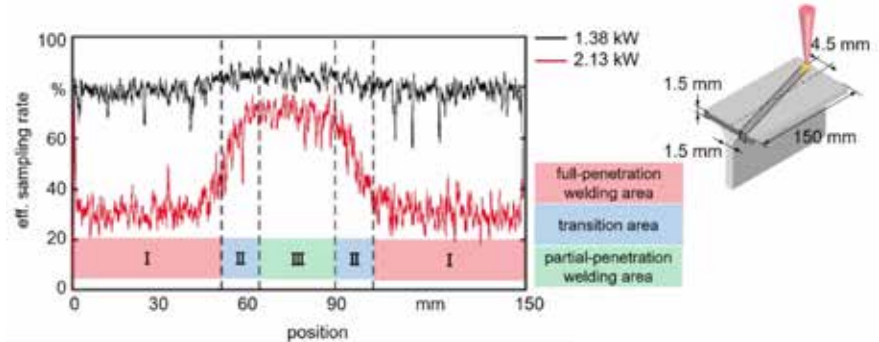


Figure 12. Vid svetsning av ”dolda” T-fogar kan man använda OCT för att detektera huruvida man träffar den vertikala plåten eller inte. Dock tycks den högre lasereffekten (röd kurva) ge en mer tillförlitlig indikation.

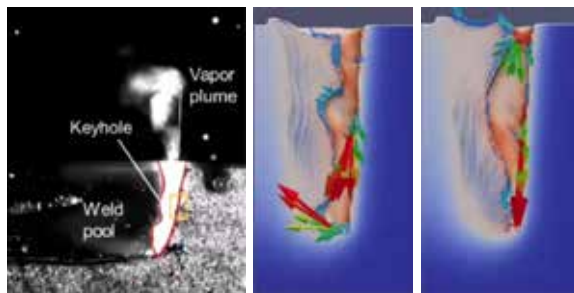


Figure 13. Närmast höghastighets-filmning som visar nyckelhålets instabilitet vid laser-svetsning, något som beror på lokala variationer i det förångningstryck som upprätthåller nyckelhålet. Detta expanderar och komprimeras växelvis, något som gick att validera i den utvecklade simuleringsmodellen.

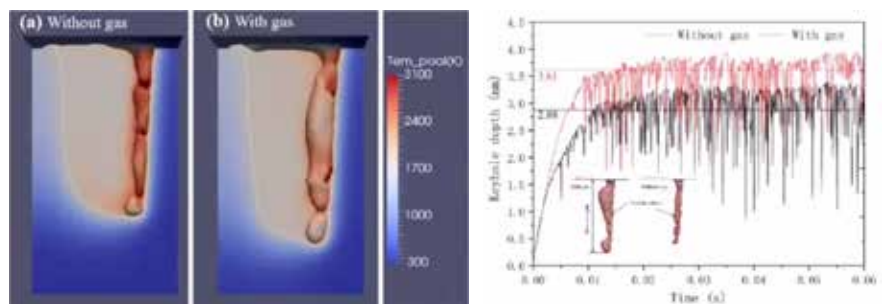


Figure 14. Simuleringar visade att lasersvetsning med skyddsgas medför en lägre temperatur i nyckelhålet samtidigt som penetrationsdjupet ökar (röd kurva).

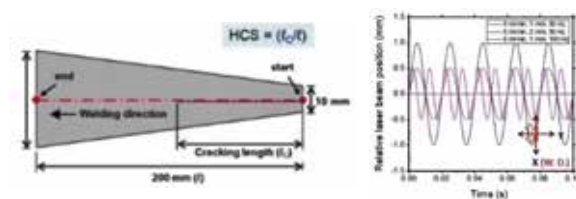


Figure 15. Den provstavsgeometri (närmast) och oscillerings-mönster som man använde vid försöken för att fast-lägga sprickkänsligheten hos aluminiumlegeringen AA-6061-T4 vid lasersvetsning.

oscillerar genom att det växelvis expanderar och komprimeras. I några simuleringar hade man jämfört skyddsgasens inverkan på nyckelhålet [Fig. 14]. Inte helt förvånande blev nyckelhålet bredare, djupare och hade en lägre temperatur jämfört med svetsning utförd utan skyddsgas.

Sanghoon **Kang** och hans kollegor vid *Korea Institute of Industrial Technology* hade studerat att svetsa aluminiumlegeringen AA-6061-T6 med hjälp av en oscillerande laserstråle. Ett välkänt problem vid lasersvetsning av aluminium utan tillsats-material är uppkomsten av varmsprickor, och något som kan motverka detta är att

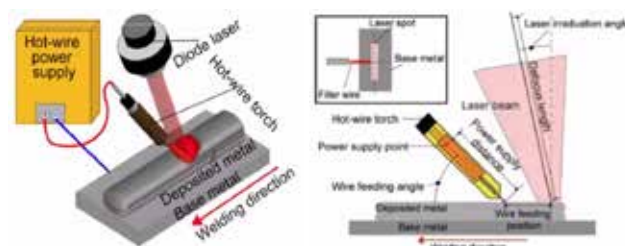
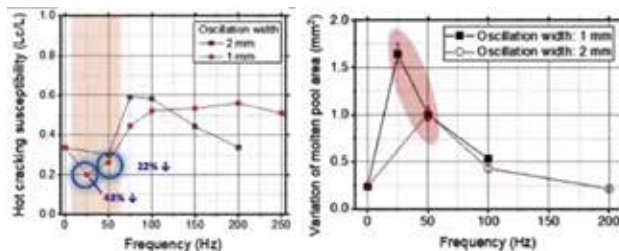
utvidga smältbadets storlek. Ett sätt att göra detta på är en longitudinell pendling av laserstrålen i svetsriktningen. Vid de experimentella försöken hade man använt en MM [MultiMode] -fiberlaser från *IPG* [YLS-3000] kombinerad med deras skanner-verktyg IPG-D30. Parametrar som varierades var svets-hastighet, oscillerings-frekvens och -amplitud. Svetsningen av det 1,4 mm tjocka materialet hade utförts som BOP [Bead-on-Plate] på för sprickkänslighetsanalys [HCS = Hot Cracking Susceptibility] speciellt trapetsoid-formade plåtkuponger [Fig. 15]. Kortast spricklängd uppnåddes vid en framförings-hastighet

på 6 m/min i kombination med en låg oscilleringsfrekvens. Med en amplitud på 1 mm kunde sprickkänsligheten reduceras med 22% vid 50 Hz och hela 43% vid 25 Hz jämfört med svetsning utan oscillering [Fig. 16]. Vid frekvenser över 100 Hz kunde man inte se någon minskning av sprickkänsligheten och ej heller ökade smältbadets storlek vid högre pendlingsfrekvenser.

Hur additiv tillverkning skall hanteras inom IIW-sfären tycks inte vara helt klarlagt idag, då de olika AM [Additive Manufacturing] -processerna kan hamna i olika av de traditionella kommittéerna. Hursomhelst dök en sådan presentation från *Hiroshima University* upp i kommission C-IV då den handlade om varmtrådbaserad AM med hjälp av diodlaser. Här berättade Mr. Zhu Song att fördelen med varmtråd är att produktiviteten fördubblas i jämförelse med när kalltillatstråd används. Fyra trådmaterial hade undersökts, alla med 1,2 mm diameter; rostfritt SUS308L, Inconel625, aluminium A5356AW samt kopparlegeringen NCU-M. Som laserkälla använde man som sagt en diodlaser vars fokuspunkt mätte 1,6×11 mm, och tråden matades in släpande i 45° på ett avstånd av 50 mm framför fokuspunkten [Fig. 17].

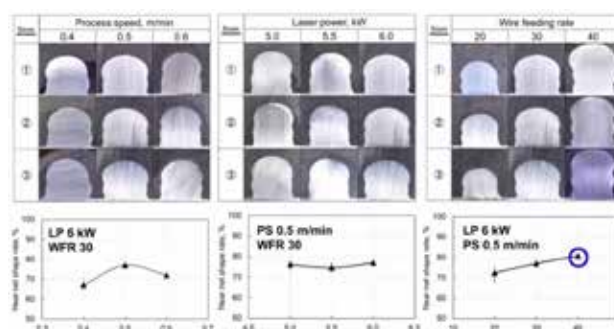
Experimentellt hade man fastlagt det bästa strömstyrkeintervallet vid uppvärmning av de olika trådarna med hänsyn till processtabilitet. Dessa värden hade sedan använts vid uppbyggnad av plattstrukturer i tre lager där parametrarna framföringshastighet, lasereffekt och trådmatningstakt hade varierats [Fig. 18]. Det senare begreppet skall tolkas som förhållandet mellan trådmatningshastighet och framföringsdito. Som en av flera responsfaktorer användes graden av "near net shape", alltså hur väl man lyckades skapa den uppsatta målbilden för plattstrukturernas tvärsnitt. Bäst resultat för exempelvis Inconel625, med en "near net shape" på 80%, fick man vid 6 kW lasereffekt, framföringshastigheten 0,5 m/min och en trådmatningstakt på 40, d.v.s. en trådmatningshastighet på 20 m/min.

Figur 16. Vid låga frekvenser mellan 25-50 Hz och en amplitud på 1 mm bidrar oscilleringen till en minskad sprickbenägenhet. Detta sammanfaller med att det då även uppstår ett större smältbad (t.h.)



Figur 17. Princip och försökssupställning vid de utförda AM-experimenten med varmtråd.

Figur 18. Tvärsnitt genom plattstrukturer av Inconel625 uppbyggda med additiv tillverkning och varmtråd där fr.v. parametrarna framföringshastighet, lasereffekt och trådmatningstakt varierats, och korrelerats till den avsedda tvärsnittsformen.



Nästa års sammankomst är planerad att genomföras i Tokyo 17–22 juli direkt efter *Japan International Welding Show* som löper 13–16 juli. Låt oss hoppas att alla restriktioner beträffande resor och sammankomster då är "ett minne blott".

Merparten av de ovan refererade presentationerna går att anskaffa i sin helhet via IIWs hemsida. Kontakta i så fall *Svetskommissionen* [info@svets.se] för närmare information. Hör följer de officiella dokumentnumren och -namnen:

- Doc.IV-1479-2021; Understanding the force effect of vapor on keyhole in laser welding with an efficiency multiphase model
- Doc.IV-1480-2021; Hybrid laser-arc welding of laser and plasma-cut 20 mm thick structural steels

- Doc.IV-1481-2021; Development and qualification of local vacuum power beam welding for construction of pressure vessels in an industrial environment
- Doc.IV-1483-2021; Highly efficient additive manufacturing phenomena of various wires using hot-wire and diode laser
- Doc.IV-1484-2021; Laser welding setup for coaxial combination of two laser beams to vary the intensity distribution
- Doc.IV-1485-2021; Benefits of laser-generated mass accumulations at sheet edges for joining processes



Digital konferens för Lasers in Manufacturing (LiM)



Joerg Volpp, Luleå Tekniska Universitet - jorg.volpp@ltu.se
Handika Sandra Dewi, Luleå Tekniska Universitet - handika.sandra.dewi@ltu.se

För första gången har LiM 2021 hållits som en onlinekonferens och dessutom mycket välorganiserat. De tillhanda höll en plattform med schema, rum, förfaranden och deltagarlista. Plattformen hade en sociala mediefunktion där deltagare kunde hitta personer enligt deras expertis eller forskningsområde och kontakta dem genom att skicka privata chattmeddelanden. Konferensrummen fanns tillgängliga via Zoom -mötesrum, där presentationer hölls och deltagare kunde ställa frågor antingen via zoomchattfunktionen eller direkt efter presentationen. Det hölls cirka 224 informativa presentationer och det var 320 deltagare från 24 länder som kunde njuta av uppdateringar från laser-samhället och i ett stort utbud av samtal under konferensen inklusive de inbjudna talarna. Med över 180 deltagare dagligen hade alla sessioner en stor publik, inklusive de inbjudna talarna. En första höjdpunkt var talet av Reinhard Genzel, nobelpristagare 2020, som presenterade "A forty year journey" av sitt arbete. Nedan följer våra utvalda presentationer från konferensen.

Additiv tillverkning (additive manufacturing, AM)

I huvudpresentationen av prof. Turichin demonstrerades imponerande möjligheterna att producera stora delar med AM för storskaliga tillämpningar (*figur 1*).

I AM-processen Direct Energy Deposition (DED) är processövervakning ett hett ämne. Irene Buchbender presenterade möjligheten att använda strukturburen akustiska processutsläpp för att upptäcka brister som sprickor under bearbetning (*figur 2a*). Julian Ulrich Weber visade att akustiska mätningar till och med kan indikera delamineringseffekter (*figur 2b*).

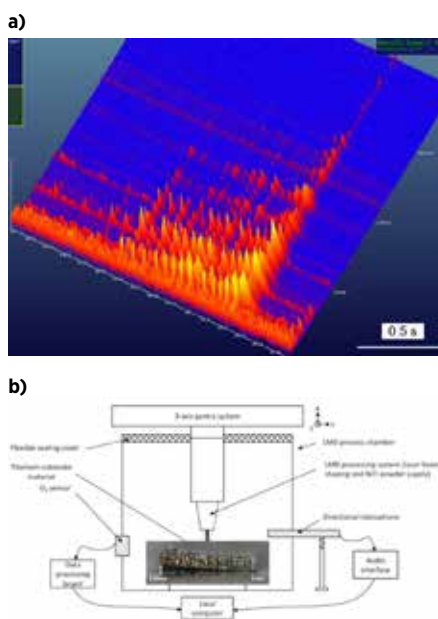
Temperaturmätningar för kvalitetsövervakning och kontroll är också mer och mer utvecklade. Avelino Zapata presenterade effekterna av pyrometerfläckstorlekar i förhållande till smältpoolen som skapades under lasertrådsavsättning och visade processens emissivitet i olika faser (*figur 3a*), vilket kan hjälpa kalibreringen av övervakningssy stemet. Laserinducerad framåtöverföring (LIFT) visades som metod för skräddarsydd deponering av material på ett substrat för t.ex. skivmaterial (*figur 3b*).

Processövervakning är också ett ämne där intresset ökar för Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Karen Schwarzkopf visade att optisk koherenstomografi kan användas för att identifiera kvalitetsegenskaper i för-, in- och efterbehandlingen (*figur 4a*). Termiska mätningar visades av Dieter Tyralla för att hjälpa till att identifiera delar skapade med LPBF.

De olika materialrelaterade utmaningarna med begränsad absorption av laserljus studerades genom att variera den använda laservåglängden. Daniel Heussen undersökte våglängdens inverkan på kopparpulverbäddabsorption (*figur 5a*), medan



Figur 1. Exempel på storskaliga additivt tillverkade strukturer (Turichin et al.)



Figur 2. a) Struktur-fördäkt akustiskt utsläppsspektrum för sprickdetektering (Buchbender et al.), **B)** inställning för akustisk detektering av delaminering (Weber et al.)

Guillaume Nordet använde en grön laser på 1 kW för att mäta processreflektivitet (figur 5b).

LPBF är känt för att skapa ganska små smältområden. Artur Leis visade att LPBF med 16 kW också är möjlig (figur 6a) med positiva effekter på bygghastigheten (figur 6b), medan utmaningar relaterade till porositet identifierades (figur 6c).

Andra processoptimeringsmetoder introducerades för att förbättra ytkvaliteten efter LPBF. Pulsning av laserstråle visades av Yuta Mizuguchi för att öka ytjämnheten (figur 7a). Laser som efterbehandling visades av Markus Hofele för att effektivt avlägsna ytpartiklar (figur 7b).

Laserskärning

Laserskärning är välutvecklad och används ofta inom industrin. Ny insikt visades dock i simuleringar av Ulrich Halm (figur 8), medan absorptionsregioner på snittfronten visualiserades. Ytterligare insikt är möjlig när man använder höghastighetsröntgenobservationstekniker som Jannik Lind visade. Man såg att svängning av laserstrålen kan öka processhastigheten med bibehållen hög kvalitet.

Handika Sandra Dewi visade snittdynamik under syreassisterad laserskärning av 20 mm tjockt mjukt stål, vilket observerades med en höghastighetskamera som tittade genom borosilikatglas, som placerats för att så nära som möjligt ha identiska processförhållanden som under skärning inuti plåt. Observationen indikerade att viskositeten hos det smälta materialet och syrgasflödets momentum är de viktigaste påverkande faktorerna för strippbildning i syreassisterade laserskärningsprocesser. Viskositeten kan påverkas av tjocklek i valshudskiktet innan skärning, där variationer kan uppstå genom ex repor på ytan.

Lasersvetsning

Vid lasersvetsning ligger fokus i forskningsundersökningarna på förståelsen av ångkanalen (nyckelhålet) under laser djup penetration svetsning. Online-röntgenfilmning användes för att bättre förstå effekten av olika laserparametrar av Frauke Faure (figur 10a). Höghastighets synkrotronobservationer gav ytterligare inblick i smältflödet runt nyckelhålet, visat av Eveline Reinheimer (figur 10b). Volframpartiklar kunde spåras, vilket möjliggjorde spårning av smältflödet. Dessutom visade Jonas Wagner hur nyckelhålsgeometrier kan extraheras från röntgenbilder och rekonstrueras för att identifiera typiska

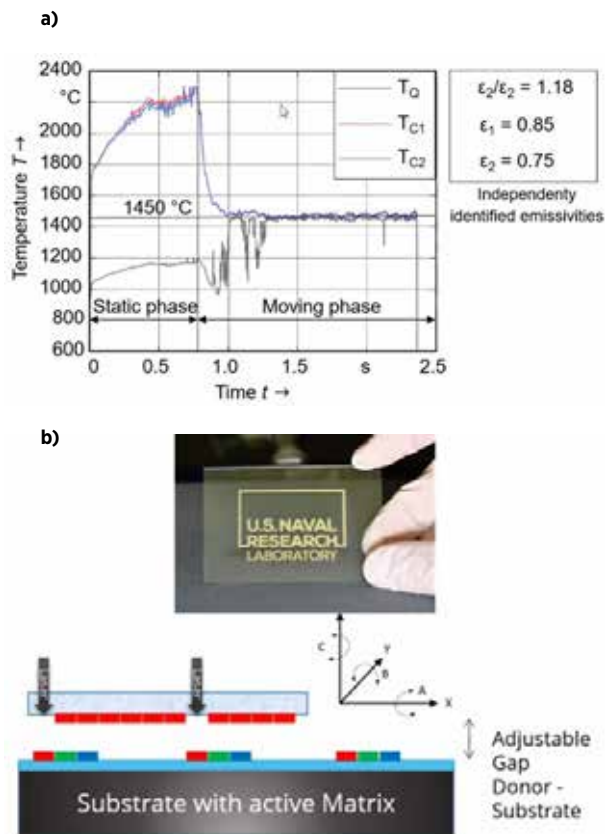


Figure 3. a) Ytemissivitet förändras i olika behandlingsfaser (Zapata et al.); **b)** LIFT principskiss och demonstrator del (Piqué et al. och Li et al.)

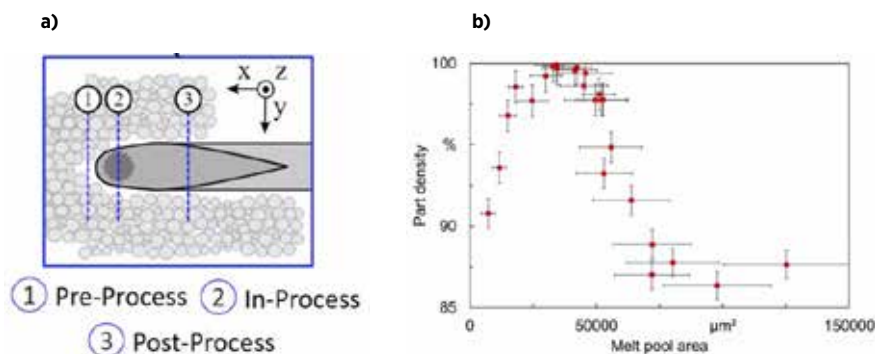


Figure 4. a) Mätpositioner för kvalitetskontroll av optisk koherens tomografi (Schwarzkopf et al.); **b)** Smältpoolsdimension i termiska mätningar relaterade till delens densitet (Tyralla et al.)

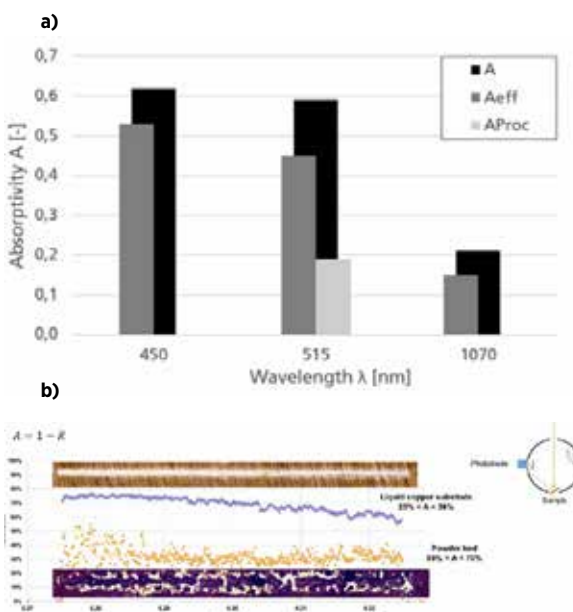
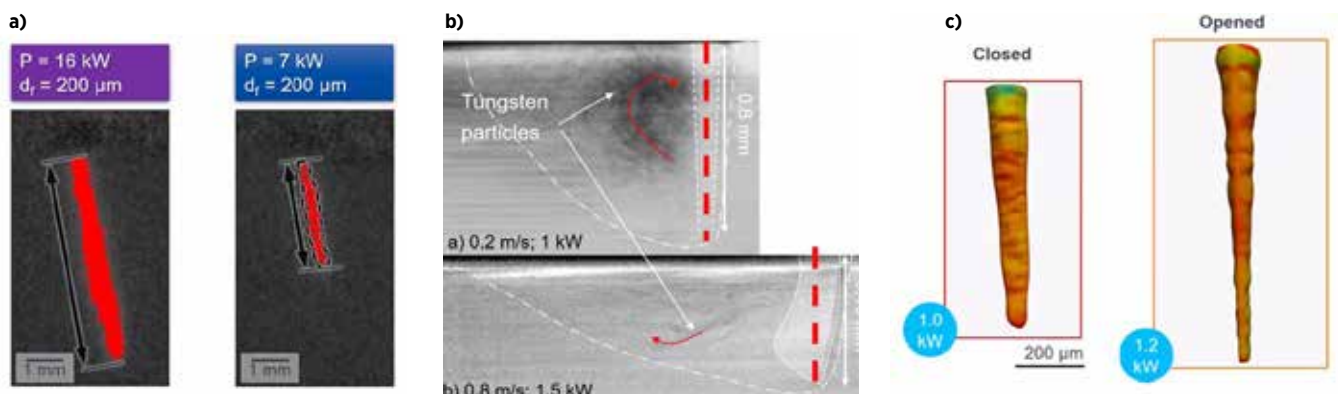
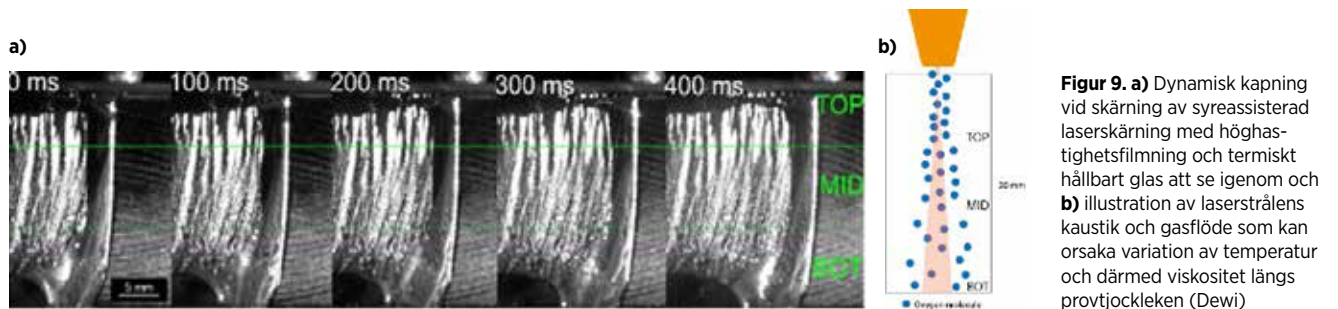
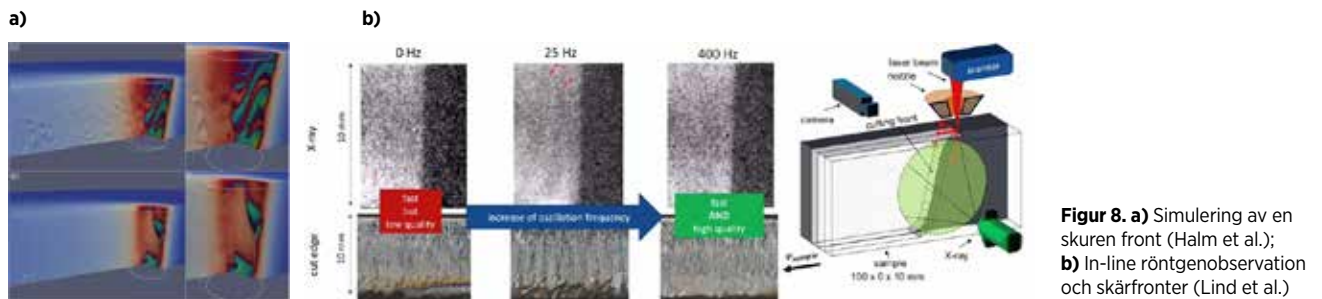
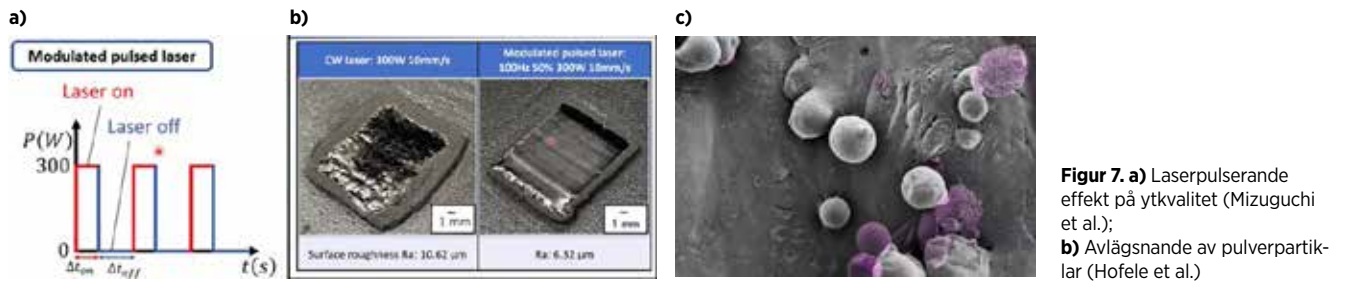
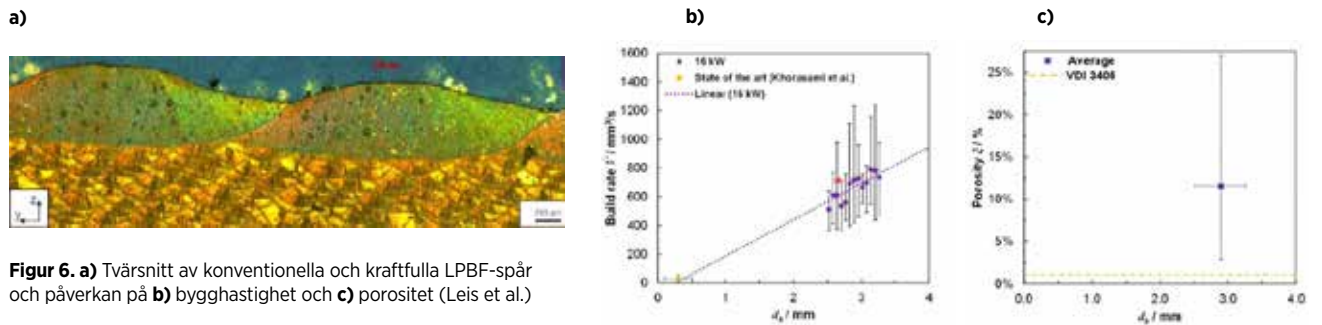


Figure 5. a) Absorptivitet beroende på laservåglängden (Behler et al.); **b)** kontinuerlig reflektivtetsmätning under kopparbearbetning (Nordet et al.)



nyckelhålsformer vid olika bearbetningslägen (figur 10c).

Avancerade tillverkningsmetoder inkluderar hybridtillverkning, t.ex. kombination av laser- och TIG-källor. Insa Henze presenterade en experimentell installation effekten av laserinducerad metallång på ljusbågsstabiliteten undersöktes (figur 11a) och kunde observera interaktionszonen med Schlieren-mätningar (figur 11b).

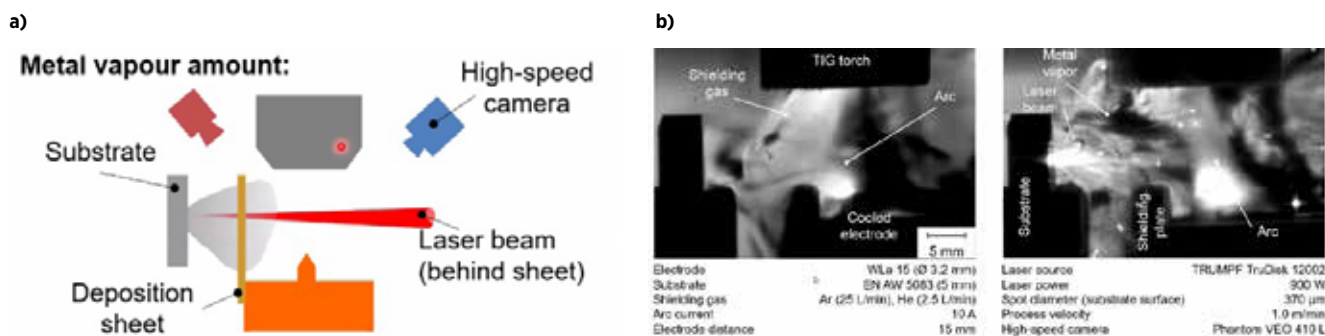
Strålförning

Strålförning var en stor del av diskussionerna under LiM på grund av nya bearbetningsmöjligheter. Benjamin Kessler visade att stråleoskillationer visade sig stabilisera lasersvetsprocessen. Avancerad akusto-optofluidik demonstrerades kunna ändra strålförningen i sub- μ s intervall (figur 12b).

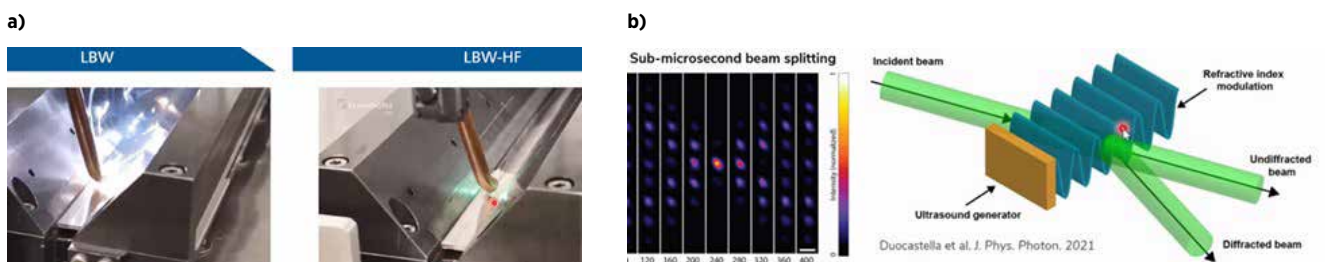
Axel Jahn visade en avancerad strålförningsmetod som möjliggör z-rikt-

nings fokusrörelse under processen, visad för svetsning av ett lutat prov (figur 13a). Statisk strålförning visades av Ulrike Fuchs att effektivt användas för ytstrukturering (figur 13b).

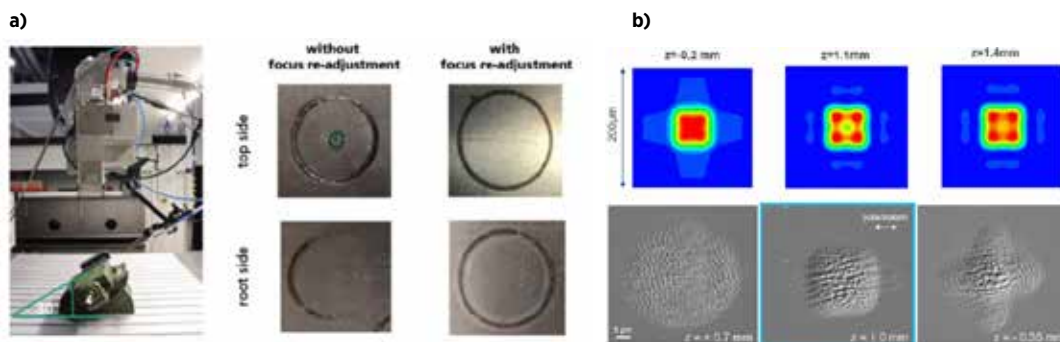
Andreas Otto visade möjligheterna att simulera laserprocesser med dynamisk strålförning, medan olika stråleoskulationsfrekvenser resulterade i olika smältpölsdimensioner och porbildning (figur 14a). Craig Arnold visade effekten



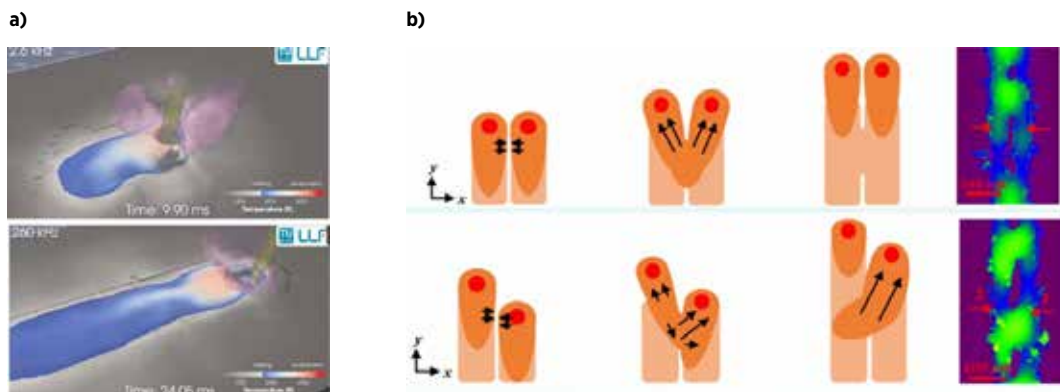
Figur 11. a) Mätinställningar och b) Schlieren -mätningar (Henze et al.)



Figur 12. a) Stabilitetsförbättring under lasersvetsning (Kessler et al.), b) Acousto-optofluidik som metod för sub- μ s stråldelning (Duocastella et al.)



Figur 13. a) Fokusering under laserstrålesvetsning (Jahn et al.); b) strålförning för ytstrukturering (Wilms et al.)



Figur 14. a) Simuleringar av laserstrålesvetsning med olika laseroscillationsfrekvenser; b) Interaktion mellan två strålar under LPBF

av användning av dubbelstråle i LPBF och förklarade effekten av olika positionering av de två laserstrålarna (figur 14b).

Joerg Volpp presenterade ett nytt sätt för axiell strålformning, som producerar flera strålmidjor längs strålaxeln (figur 15a). Man såg att nyckelhålets dimensioner kan ändras av olika energinmatningar, till och med påverka sprutbildningen.

Maskininlärning

Maskininlärning har visat ökade möjligheter att även användas för att förbättra lasermaterialbearbetning. Beñat Arejita presenterade en igenkänningsalgoritm för att identifiera batteripaket före svetsning (figur 16a). Kilian Wasmer gav en bred översikt över användning av maskininlärning för olika applikationer och påpekade utmaningarna med klassificeringar

(figur 16b) för data från pulver-AM, laser-svetsning och till och med osteotomi. ■

Läs mer på Internet

LiM - www.imaging.org/site/IST/IST/Conferences/LIM/LIM2021/LIM2021_Home.aspx

LiM Artiklar (betalningsvägg)
www.ingentaconnect.com/content/ist/ac

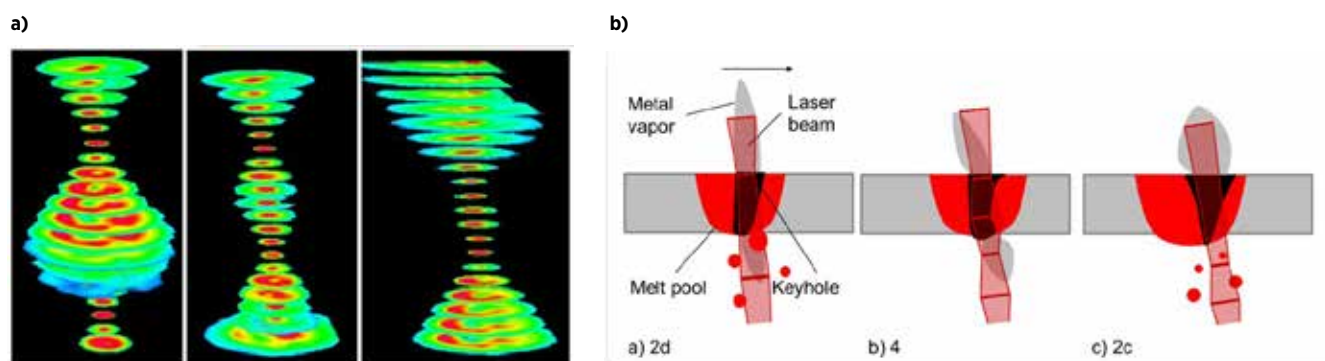


Figure 15. a) Uppmätta strålformar producerade med axiell strålformning; **b)** Strålformande inverkan på nyckelhålssvetsning (Volpp et al.)

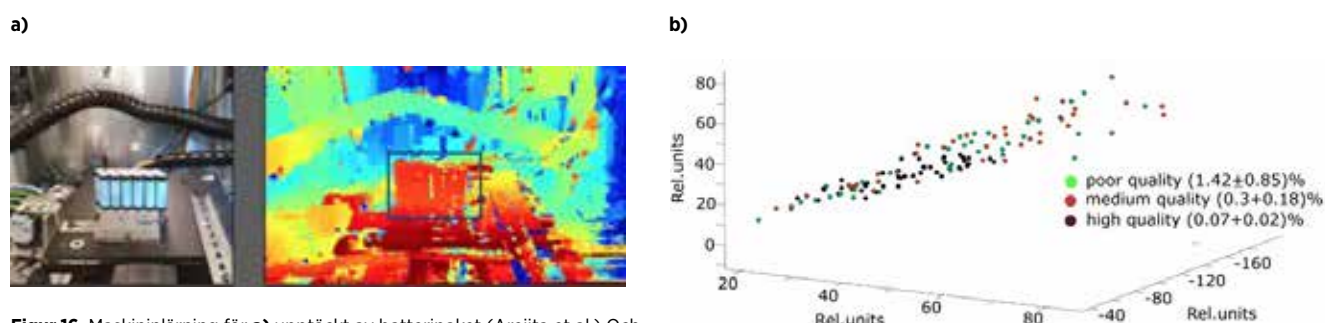


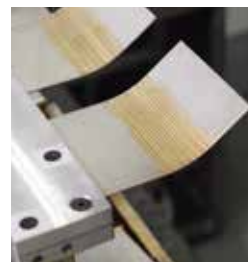
Figure 16. Maskininlärning för a) upptäckt av batteripaket (Arejita et al.) Och **b)** visualisering av klassificeringssvårigheter (Wasmer et al.)

Lasertekniken har funnit nya användningsområden i form av "e-Drive" och "e-Mobility"

Rapport från 22nd European Automotive Laser Applications Conference



Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering



Fjolårets EALA [European Automotive Laser Applications] -konferens hann precis genomföras traditionsenligt i februari innan Europa och världen i övrigt tvingades stänga ner p.g.a. Corona-pandemin. Därför kom det att dröja hela 15 månader innan vi laserexperter från bilindustrin fick möjlighet att på nytt träffas för att utbyta erfarenheter och presentera de senaste nyheterna i branschen. Visserligen fick det hela genomföras i en virtuell miljö, men här gavs möjligheter att ha individuella eller gruppdiskussioner med kolleger via den förträffliga mötesplattformen "wonder.me".

Den fungerade så att man först fick skapa sin egen s.k. avatar och med den kunde man sedan vandra runt i ett digitalt rum och söka upp en kollegas avatar. Så snart två avatrar träffade på varandra aktiverades individernas kameror och mikrofoner i ett gemensamt digitalt rum, varpå man kunde ha ett virtuellt "face-to-face"-möte. Tyvärr var det endast ett fåtal av de 113 konferensdeltagarna [Tab. 1a] som utnyttjade denna möjlighet, men genom det virtuella upplägget fanns möjlighet till ett globalt deltagande. Detta visade sig i att hela 17 nationer var representerade, vilket var ett land mer jämfört med EALA2020. Av deltagarna kom 25% från bilföretagen själva [OEM = Original Equipment Manufacturers, Tab. 1b] medan den dominerande kategorin utgjordes av utrustningsleverantörer till bilindustrin, s.k. OES [Original Equipment Suppliers]. Vanligtvis brukar de senare visa upp sina senaste produkter vid träffarna i Bad Nauheim, men eftersom denna möjlighet inte fanns i år märktes detta i form av ett lägre deltagarantal från deras sida. Några av företagen försökte sig på virtuella

varianter av marknadsföring, men detta blir ju aldrig detsamma som när man har möjlighet att titta och känna på t.ex. olika laserverktyg och koncept för processövervakning.

Som traditionen dock bjuder hälsades vi välkomna av Dr. Dirk **Meine** från arrangerande ACI [Automotive Circle International]. Han inledde med att tacka konferensens sponsorer som i år var 7 till antalet och bestod av *Blackbird Robotersysteme GmbH*, *IPG Laser GmbH*, *Laserline GmbH*, *mksOphir*, *Precitec GmbH*, *Primes GmbH* samt *Trumpf GmbH + Co. KG*. Därpå gav han allehanda praktisk information gällande konferensens virtuella genomförande. Programmet var uppdelat i tre ämnesområden:

- Laserapplikationer inom området e-mobility
- Strålomformning och -manipulering
- Processövervakning och -kontroll

Dock sträckte sig vissa presentationer över mer än ett av dessa områden, vilket kommer att framgå i min följande redovisning.

Första dagen fokuserade på hur laser-

Tabell 1a. Deltagare per nation

Nation	Antal
Tyskland	61
Japan	11
USA	11
Spanien	5
Frankrike	4
Österrike	4
Italien	3
Sverige	3
Nederländerna	2
Canada	1
Danmark	1
Indien	1
Israel	1
Kina	1
Korea	1
Storbritannien	1
Turkiet	1
Summa	113

Tabell 1b. Deltagare per OEM

OEM	Antal
BMW AG	3
General Motors	3
Honda	3
Mercedes AG	3
Audi AG	2
Ford Motor Co.	2
Nissan	2
Adam Opel AG	2
Volkswagen AG	2
FCA [Fiat/Chrysler]	1
Hyundai	1
Jaguar Cars	1
Maruti-Suzuki	1
Renault S.A.S.	1
Volvo Cars	1
Summa	28

bearbetning, och då främst lasersvetsning, används vid tillverkning av batterier för eldrivna fordon. Här inledde Dr. Jan-Philippe **Weberpals** från *Audi AG*, tillika ordförande i *EALA*:s programkommitté, med en redogörelse kring lasersvetsning av koppar. Sedan tidigare vet vi att kortare våglängder i det synliga ljusspektret har en överlägsen absorptivitet i koppar och därmed en gynnsammare inkopplingsmekanism för laserenergin. Detta är dock endast giltigt vid starten av svetsprocessen, och när väl en smälta är etablerad har våglängden en underordnad betydelse. Därför vill biltillverkarna helst kunna fortsätta att använda de 1 μm IR [InfraRed] -lasrar som man har investerat i, eftersom absorptionen för denna typ av laserkälla ökar med temperaturen, medan det motsatta förhållandet gäller om en s.k. grön eller blå laser används [Fig. 1].

Basala försök hade genomförts med kopparlegeringen Cu-PHC [Oxygen-free Extra Low Phosphorus Copper] där fyra olika laserkällor/arrangemang hade använts; LDM_{blue} 1500-60 från *Laserline*, TruDisk green från *Trumpf*, LDF 10.000-6 från *Laserline*, samt en hybrid-variant där den blå laserstrålen superpositionerats med IR-laserns [Fig. 2].

Vid svetsning med blå våglängd [$\lambda=450$ nm] sker processen främst i form av värmeledningssvetsning och det är endast vid mycket låga svetshastigheter som ett nyckelhål kan uppstå. Vid batteriapplikationer rör det sig emellertid om svetsning av mycket tunna folier i koppar och aluminium, med penetrationskrav som understiger 0,5 mm, och här visade det sig att endast den "blå" laserkällan kunde åstadkomma ett grunt penetrationsdjup utan någon risk för genombränning [Fig. 3]!

Med den gröna våglängden [$\lambda=515$ nm], där laserkällan erbjuder en betydligt mindre fokalpunkt, erhöll man nyckelhålssvetsning vid en effektnivå på 1,5 kW. IR-lasern, som ju hade den minsta fokalpunkten, gav inte oväntat djup penetration och en relativt stabil process. Dr. Weberpals menade att det svetsstrut som förekommer vid höga IR-effekter kan undvikas om det finns möjlighet att utföra svetsprocessen i vakuum. Intressant här var att hybridvarianten, som hade en konstant effekt på 1,5 kW från den "blå" diodlasern, faktiskt gav lägre penetrationsdjup vid låga IR-effekter jämfört med när enbart den senare laserkällan var inkopplad [Fig. 4]! Detta förklarade Dr. Weberpals med att här blir hybridprocessen dominerad av diodlasern, som ju enbart bidrar

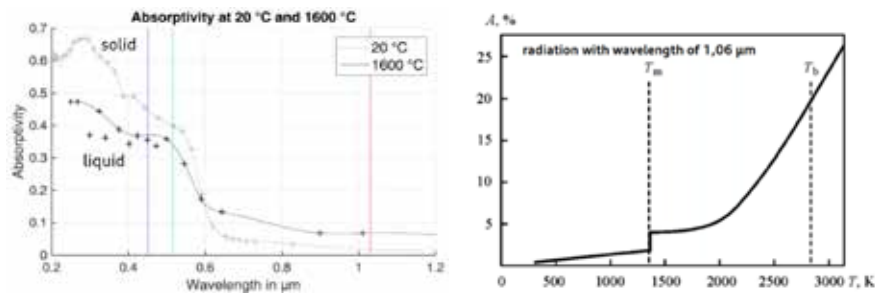


Figure 1. En laserstråle med "blå" eller "grön" våglängd absorberas mycket bättre i solid koppar jämfört med en IR-laser, men så fort materialet börjar smälta förbättras inkopplingsmekanismen för den senare med tilltagande temperatur (t.h.).



Figure 2. Tre olika laserkällor och ett hybrid-arrangemang hade använts vid lasersvetsning av kopparlegeringen Cu-PHC.

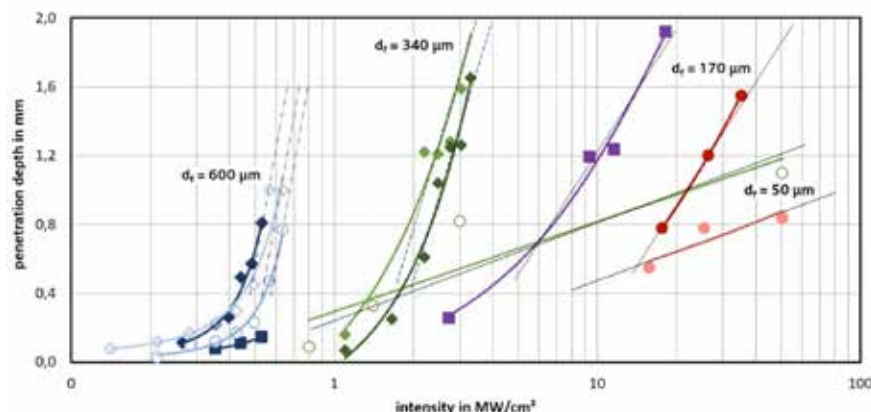


Figure 3. Endast med "blått" laserljus går det att undvika genombränning vid svetsning av de mycket tunna kopparfolier som ingår i batterier (för färgkodning se Fig.2).

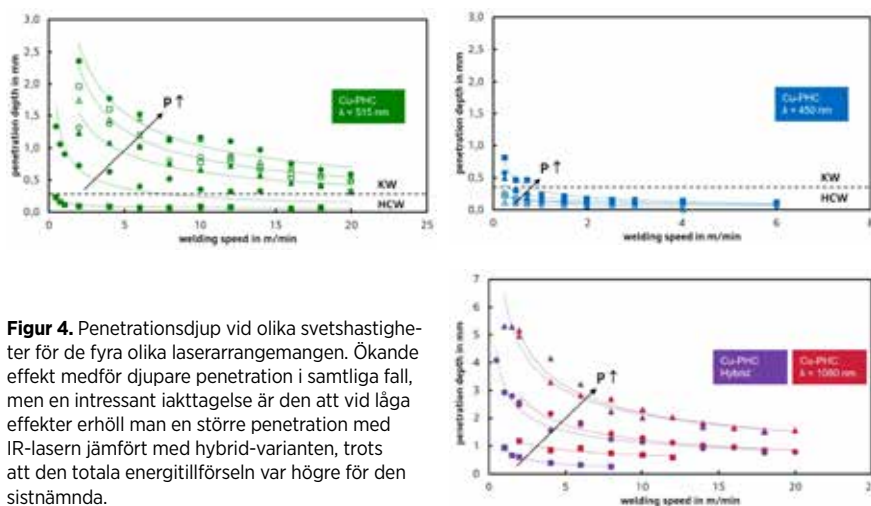


Figure 4. Penetrationsdjup vid olika svetshastigheter för de fyra olika laserarrangemangen. Ökande effekt medför djupare penetration i samtliga fall, men en intressant iakttagelse är den att vid låga effekter erhöill man en större penetration med IR-lasern jämfört med hybrid-varianten, trots att den totala energitillförseln var högre för den sistnämnda.

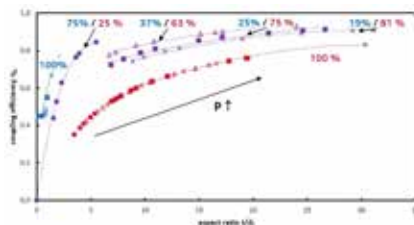
med värmeledningssvetsning. Däremot bidrar den kortare våglängden till en bättre inkopplingsmekanism och därmed ett bättre energiutnyttjande av de båda superpositionerade laserstrålarna [Fig. 5].

Coherents ARM [Adjustable Ring Mode] -lösning har ju tidigare beskrivits i denna publikation ett flertal gånger. Nu gav herrarna Klaus **Kleine** och Peter **Kallage** en uppdatering i ämnet. Konceptet bygger på en fiberlaser som kan ha effekter upp till 10 kW och som kombineras med en optik med vars hjälp laserstrålen kan delas upp i en central fokuspunkt med ett omgivande s.k. ringfokus [Fig. 6]. Fördelningen av lasereffekten mellan de båda fokin kan göras steglöst, dock med högst 7,5 kW i den centrala fokuspunkten. Ringfokus har en förvärmande effekt vilket gör att absorptionsförmågan i det bearbetade materialet ökar. Dessutom stabiliserar den del av ringen som ligger efter den centrala fokuspunkten, sett i svetsriktningen, nyckelhålets bakre vägg. Man erbjuder ett antal olika distributionsfibrer, vilka är okänsliga för överreflexion av laserstrålen, och som ger fokuspunktsdiametrar från 20/170 μm till 100/290 μm på arbetsstycket.

Ett antal svetsförsök utan skyddsgas hade utförts på såväl koppar som aluminium där laserstrålen oscillerades i en cirkelformig rörelse och där olika svetsgeometrier kunde skapas genom att utnyttja *HighYags* skanning-verktyg RLSK [Remotes Laser SkannerKopf]. Vid svetsning av dylika reflektiva material kommer svetsens kvalitet och utseende att vara starkt beroende av ytstrukturen [Fig. 7].

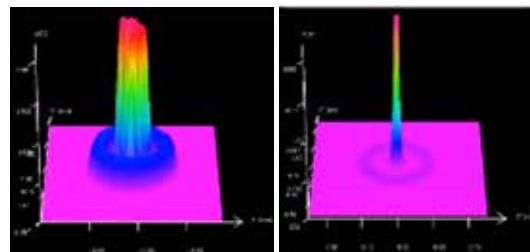
Cylindriska battericeller hade svetsats med 4 kW effekt och en framföringshastighet på 150 mm/sek. För att innehålla kravet på tillräcklig svetsbredd, utan att riskera genombränning, hade operationen skett i två överlagrade, koncentriske cirklar [Fig. 8]. Som framgick tidigare i denna artikel är IR-lasern överlägsen i penetrationsförmåga vid kopparsvetsning jämfört med kortare våglängder. Problemet är emellertid att kunna realisera en stabil svetsprocess. Här visade ARM-teknologin sin överlägsenhet över traditionell svetsning med 1 μm -lasrar genom en helt sprutfri process vid BOP [Bead-On-Plate] -svetsning av Cu-HCP [High Purity, Low Level Residual Phosphorus Fig. 9]. Här kunde man konstatera penetrationsdjup på cirka 4 och 6 mm vid lasereffekter på 6 respektive 10 kW.

För att skräddarsy energifördelningen på arbetsstycket kan man även använda

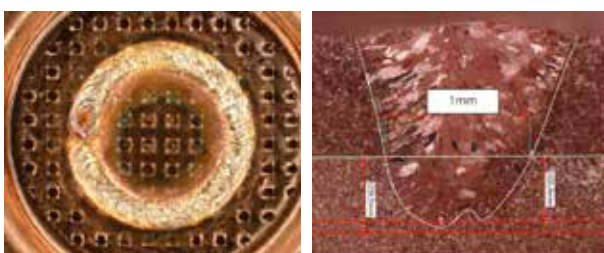


Figur 5. Energiutnyttjandet förbättras då IR-lasern kombineras med en laserstråle i det blå våglängdsområdet.

Figur 6. Två exempel på hur laserenergin kan varieras i Coherents ARM-koncept för två olika distributionsfibrer; t.v. 70/180 μm och t.h. 50/200 μm . Den senare ger en minimal spalt mellan ringfokus och den centrala fokuspunkten vilket leder till ett exceptionellt stabilt nyckelhål.



Figur 7. Ytan har ett avgörande inflytande på svetskvaliteten vid lasersvetsning av koppar. T.h. ses övergången från polerad till sandpapperslipad yta vid svetsning med 4 kW lasereffekt.

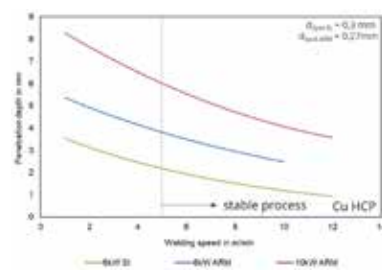


Figur 8. För att skapa en bred svets med god elektrisk ledningsförmåga, men med ett begränsat penetrationsdjup, kan svetsningen ske i två överlagrade koncentriske cirklar.



Figur 9. En jämförelse mellan konventionell IR-svetsning (ovan t.v.) och ARM-teknologin (ovan t.h.) vid svetsning av koppar med avseende på kvalitet och penetrationsförmåga.

Tvärsnitten visar fr.v. svets med konventionell IR-laser och 6 kW, samt svetsar utförda med ARM och 6 resp. 10 kW vid 4 m/min i framföringshastighet.



sig av vad som kallas dynamisk strålomformning, och *EALA2021* bjöd på några intressanta presentationer i detta ämnesområde. Sålunda visade den trogne konferensdeltagaren Dr. Dirk **Dittrich** från *Fraunhofer IWS* [Institut für Werkstoff und Strahltechnik] i Dresden upp

ett nytt koncept där fokuspunkten kan oscilleras i tre dimensioner. Tvådimensionell pendling har ju visat sig vara en fördel då det gällt att undvika svetsprut, porer och varmsprickor vid lasersvetsning, utan tillsatsmaterial, av sprickkänsliga aluminiumkvaliteter som AA2024 och AA7075.

De positiva effekterna, i form av ett längre steltningsintervall, hade registrerats i en försöksanläggning vid HZB [*Helmholtz-Zentrum Berlin*] där höghastighetsfilmning kombinerats med röntgen [Fig. 10; se även *LaserNytt* 1-2021]. Svetsförsöken hade utförts på 3 mm tjockt aluminium med 600 W från en SM [SingleMode] -laser och en fokalpunktsdiameter $\leq 100 \mu\text{m}$. Provtavlar som svetsats med 2D-oscillering uppvisade därför bättre utmattningsegenskaper än de som svetsats med "stationär" laserstråle [Fig. 11].

Riktigt intressant var emellertid möjligheten av även oscillera strålen i z-led med hjälp av en piezo-elektrisk drivning av optiken [Fig. 12]. Någon direkt inverkan på svetsdjupets storlek hade inte denna funktion, men däremot var penetrationen stabilare och pormängden kunde reduceras [Fig. 13]. Dessutom ger 3D-oscilleringen möjlighet att justera fokalpunktsläget i de fall då detta tenderar att förskjutas p.g.a. värmedistorsioner i optiken eller kontaminering av skyddsglasat. De maximala frekvenserna vid 2D- och 3D-oscillering ligger på 4.000 respektive 1.000 Hz och z-rörelsen är begränsad till 28 mm vid en fokallängd på 245 mm.

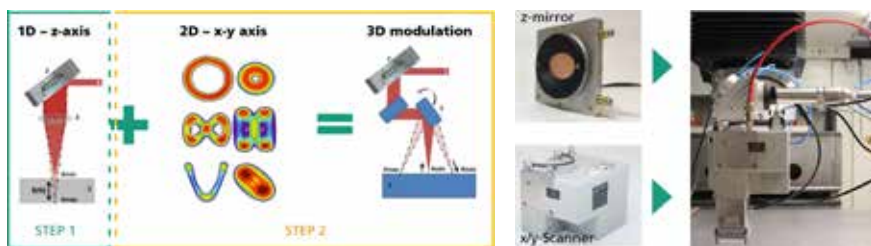
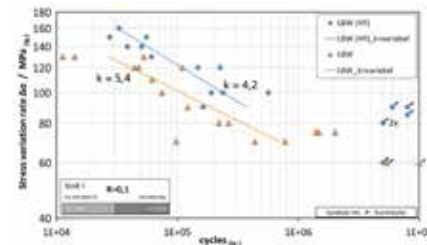
Ytterligare ett exempel på strålmodulering presenterades av Eyal **Shekel** från israeliska företaget *CIVAN Technology* tillsammans med Jesús Jiménez **Palacios** från *Valeo* där man avser att använda sig av den här tekniken vid tillverkning av kylsystem för batterier. Strålomformning med OPA [Optical Phase Array] kom jag första gången i kontakt med vid *International Laser Symposium 2018* [se *LaserNytt* 2-2018] i Dresden. Med en dylik elektro-optisk optik kan man manipulera laserstrålen snabbare än vad som är möjligt med mekaniska galvo-speglar. Genom att variera det elektriska fältet med frekvenser upp till 10 kHz, vilket innebär omställningar på nano-sekunder kan man få i princip vilken energifördelning på arbetsstycket som helst [Fig. 14]. Detta kan man utnyttja vid exempelvis svetsning av problematiska aluminiumlegeringar.

Kylelementen tillverkas av 0,4 mm tunna aluminiummembran i kvalitén AA3003 och hittills har sammanfogningen skett genom ugnslödning, en föga produktiv eller miljövänlig process. Därför har *Valeo* beslutat att i stället använda sig av lasersvetsning, men har då konstaterat att man med traditionell sådan har svårt att kontrollera svetsdjup och -bredd, samtidigt som den höga framföringshastigheten på mellan 12–15 m/min som krävs, leder

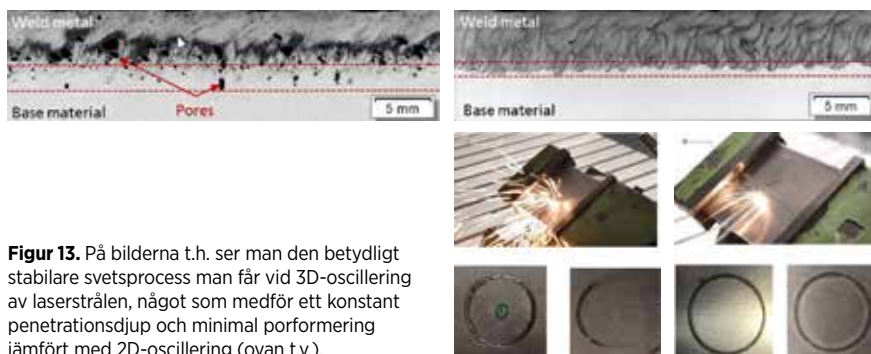


Figur 10. Ovan ett utsnitt från en höghastighetsfilmning utförd hos HZB (t.v.) som tydligt visar att man kan få nästan helt porfria svetsar i AA7075 genom att växla från en "stationär" laserstråle till en dynamiskt oscillerad sådan.

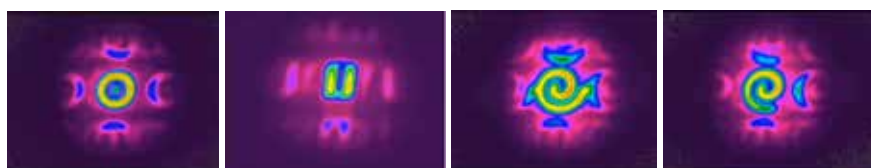
Figur 11. Då lasersvetsning av aluminium sker med oscillerad stråle (LBW HF) blir svetskvaliteten överlägsen den som kan åstadkommas med en "stationär" laserstråle, vilket resulterar i en bättre utmattningshållfasthet



Figur 12. En av få riktiga nyheter vid EALA2021 var denna strålscillering i tre dimensioner med hjälp av en z-spegel kombinerad med x/y-skanner.



Figur 13. På bilderna t.h. ser man den betydligt stabilare svetsprocess man får vid 3D-oscillering av laserstrålen, något som medför ett konstant penetrationsdjup och minimal porförmning jämfört med 2D-oscillering (ovan t.v.).



Figur 14. Några exempel på hur energifördelningen i laserstrålen kan manipuleras inom loppet av nanosekunder med hjälp av en s.k. elektro-optisk optik (OPA).

till omfattande svetssprut. Dessutom föreligger absoluta täthetskrav på elementen, vilket provas vid läkagetester med 4 bars tryck. Tidiga svetsförsök hade utförts med en 4 kW disk laser från *Trumpf* [TruDisc 4001] och *Blackbirds* skanner-verktyg "intelliweld II FT" då det är allmänt bekant att rumslig strålscillering är gynnsam när det gäller att begränsa pormängden vid lasersvetsning av aluminium. Nackdelen är emellertid att framföringshastigheten, och därmed produktiviteten, minskar p.g.a. den transversella rörelsen av laserstrålen.

Därför har *Valeo* undersökt alternativa tekniker för skräddarsydd energifördelning såsom "BrightLine" från *Trumpf* och det ovan beskrivna "ARM"-konceptet från *Coherent*. Till slut valde man emellertid *CIVAN*:s elektro-optiska optik. Här hade parametrar som strålförhållande, frekvens och framföringshastighet studerats och bäst resultat uppnåddes med en timglasformad strålförhållande, som gav en helt sprutfri process vid 150 kHz [Fig. 15]. Övriga parametrar var 2,9 kW lasereffekt, en 0,3 mm stor fokalpunkt och 12 m/min i

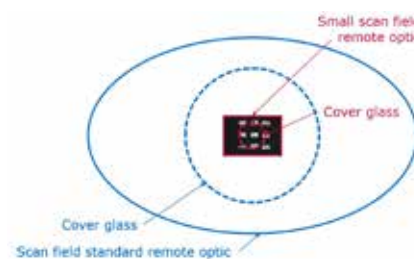
framföringshastighet. Vid efterföljande svetsning av verkliga kylelement hade en något högre frekvens [225 kHz] använts initialt tillsammans med 3,5 kW lasereffekt. Men eftersom hög produktivitet är en viktig kravparameter hade slutligen en framföringshastighet på 15 m/min valts, något som medför att penetrationsdjupet minskar. Genom att försöka hålla den smälta volymen konstant med hjälp av en högre lasereffekt [3,9 kW] gick det att skapa en bredare svetsfog [584 µm mot 560 µm], något som gynnar tätheten hos fogen. Vid de efterföljande läckagetesten kunde man konstatera att samtliga svetsfogar var helt täta. Fortsatt forskning hos Valeo är inriktad mot ännu högre svetshastigheter kring 20 m/min eller mer, samt svetsning av koppar och koppar/aluminium-kombinationer.

Dr. Pravin Sievi från Scansonic GmbH visade upp ett nytt skanner-verktyg med förhållandevis litet arbetsområde. Syftet sades vara att minska verktygskostnaden, men motiverades av att många applikationer inom "e-mobility" endast behöver ett begränsat skanningsfält [Fig. 16]. Det som driver kostnaden vid stora skanningsområden är skyddsglasets storlek samt mängden tryckluft som krävs för att skydda detsamma. Ett standardskyddsglas mäter 5" och konsumerar mellan 2.200–4.400 liter skyddsgas i minuten, medan man med ett 2" skyddsglas endast behöver 700–800 l/min. En beräkningsövning gav vid handen att driftskostnaden för ett mindre skanningsfält ligger på 6,6 €/tim medan den för standardstorleken på 5" blir 15,3 €/tim. Sammantaget skulle detta innebära en årlig kostnadsbesparing på 45.000 euros.

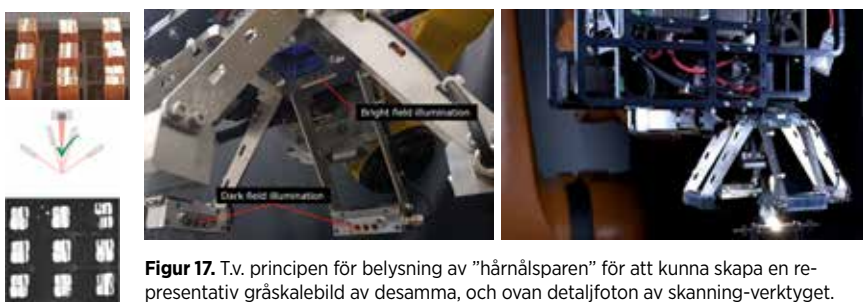
Vid svetsning av s.k. hårnålar kan positionering och storleken hos dessa försvåra förutsättningarna för att nå ett kvalitativt svetsresultat. Om "hårnålarna" är av olika längd kan en åtgärd vara att maskinbearbeta dem så att dess topppytor ligger i samma plan, men detta innebär ju samtidigt att en mängd kopparmaterial måste avverkas och därmed är att behandla som skrot. Med tanke på den mängd av "hårnålar" som ingår i en enstaka stator skulle materialförlusten kunna uppgå till 47 ton koppar under ett år "world-wide", vilket representerar en kostnad kring 150.000 € per år och produktionslinje. Därför rekommenderar Scansonic att "hårnålarnas" positioner detekteras innan svetsning, och här förordade Dr. Sievi att använda sig av gråskaleavbildning genom illuminering av varje hårnålspår med åtta



Figur 15. Svetsning av aluminium AA3003 och en timglas-formad energifördelning med olika frekvenser, fr.v. 10, 100, 150 och 200 kHz, där 150 kHz visade sig ge en i det närmaste helt sprutfri process.



Figur 16. Vid svetsning av många "e-mobility"-applikationer behövs endast ett begränsat skanningsfält. Detta innebär att man kan använda ett betydligt mindre och billigare skyddsglas (2", röd markering) jämfört med det vanliga 5"-glas (blå markering).



Figur 17. T.v. principen för belysning av "hårnålsparen" för att kunna skapa en representativ gråskalebild av desamma, och ovan detaljfoton av skanner-verktyget.



Figur 18. T.v. komponenterna som ingår i Blackbirds maskininlärningssystem för svetsning av elektriska komponenter till bildindustrin; skanner-verktyg samt kontrollenheter för detta och robot. T.h. en schematisk skiss av företagets skanner-verktyg med integrerad "ScaVis"-kamera.

belysningsenheter, hellre än triangulering, vilken han menade gav en mindre tillförlitlig information. Fyra enheter registrerar ljusintensiteten i själva svetsområdet, medan de övriga fyra är mer perifert riktade för att ge önskad kontrasteffekt [Fig. 17]. Varje enhet består av tre stycken s.k. VCSEL [Vertical Cavity Surface Emitting Laser] om vardera 6 W effekt. Sedan man väl identifierat svetsytornas läge kan man genom korrekt parameterval kompensera för höjd- och spaltavvikelser. Vid avvikelser i höjddled måste svetsprocessen alltid starta på den högst belägna "hårnålen" då smältan påverkas av gravitationen. Ett antal imponerande höghastighetsfilmer beskrev svetsförloppet vid olika förutsättningar beträffande "hårnålarnas" utseende

och position. Här tog det 80 ms för att identifiera lägena för 9 "hårnålar" och 20 ms för att korrigera svetsparametrarna.

En snarlik lösning för bildanalys har presenterats tidigare av Herrn Thibault Bautze [Blackbird Roboter System GmbH], senast i *LaserNytt* 3-2020 ["Samtal kring lasertrender"]. Nu berättade den gode Thibault om hur man avser att använda tekniken vid s.k. maskininlärning. Tre beståndsdelar ingår; en 2D- eller 3D-skanner från Scanlab, en kontrollenhet för skanner-verktyget [SCU = ScanControlUnit] och en dito för roboten [RSU = RobotSyncUnit]. Verktyget har två belysningsmoduler och är försett med företagets "ScaVis"-kamera som är riktad koaxiellt med laserstrålen [Fig. 18].

Maskininlärningsalgoritmer gör att eventuella felpositioneringar av "hårnålar" kan kompenseras med en oscillering av laserstrålen, men om exempelvis spalten mellan "hårnålarna" är så stor att den inte går att överbrygga, eller att linjeringsfelet mellan "hårnålarna" är för stort, sker inget försök till svetsning ["NOK", **Fig. 19**]. Processhastigheten för att svetsa ett "hårnålpar" med *Blackbirds* lösning ligger under 40 ms enligt Herrn Bautze, vilket är nödvändigt för att innehålla bilindustrins korta cykeltidskrav.

Laserljus med blå våglängd kommer jämt på tapeten vid svetsning av koppar. Dessa "blå" lasers förträfflighet diskuterades av Markus **Rütering** från *Laserline GmbH* som har erbjudit sådana produkter sedan 2017. Fördelarna ligger främst i våglängdens goda absorption i kopparmaterial, cirka 5–10% högre jämfört med "grönt" laserljus, men också i dessa diodbaserade lasers kompakta storlek som kan vara mer än 10 gånger mindre i förhållande till en "grön" laser med motsvarande effekt. Nackdelarna består främst i man har större effektförluster i distributionsfibern jämfört med andra typer av laserkällor. En ytterligare nackdel som har framförts är att oscillering av den relativt stora fokuspunkten är begränsad. Detta motbevisades nu av Herrn Rütering, som på en direkt fråga från Dr. Weberpals svarade att *Laserline* nu kan erbjuda ett skanner-verktyg för sina "blå" lasrar med ett arbetsområde på 50×50 mm [**Fig. 20**] tack vare en strålkvalitet på 20 mm*mrad och en 400 µm distributionsfiber. Dock menade den gode Markus att för lasersvetsning av "hårnålar" med diodlasers större fokuspunkt behövs ingen oscillering av strålen. Han motsade därmed Dr. Sievis påstående att det skulle vara nödvändigt att starta svetsningen från den högst belägna ytan vid positioneringsavvikelser i vertikalled.

En intressant iakttagelse vid svetsförsök utförda på kopparmaterial var att legeringen CuSn₆ har bättre absorption och lägre värmeledningsförmåga jämfört med rent kopparmaterial [Cu-ETP (Electrolytic Tough Pitch), **Fig. 21**]. Alltså borde detta vara ett intressant alternativ ur svetsningssynpunkt, men på minussidan finns då legeringstypens sämre elektriska ledningsförmåga.

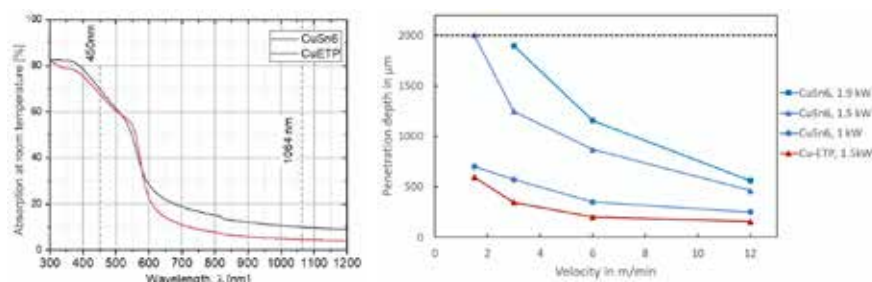
Herrn Rütering är fortsättningsvis intresserad av att studera de miljömässiga CO₂-avtrycken hos olika laserkällor och sträckte därför ut en hand för samarbete kring detta till biltillverkarna och deras underleverantörer.



Figur 19. Med maskininlärningsalgoritmer går det snabbt att avgöra om "hårnålarnas" positionering är tillräckligt exakt för att ett kvalitativt svetsutfall är att förvänta.



Figur 20. Laserline har nu presenterat ett skanner-verktyg (t.v.) för sin LDM_{blue}-serie baserad på en konverterad diod-laser med 20 mm*mrad i strålkvalitet. För en diodlaser av standardtyp är emellertid fokuspunkten så stor (ø = 1mm) att felpositionerade "hårnålar" kan svetsas utan strålscillering.



Figur 21. Kopparlegeringen CuSn₆ har en låg värmeledningsförmåga (75 W/m*K) jämfört med Cu-ETP (380 W/m*K) vilket ökar absorption (t.v.) och penetrationsdjup (t.h.) vid lasersvetsning.



Figur 22. Panasonic's kompletta system "LAPRIS" med dess användarvänliga operatörssupport som ger vägledning till parameterval vid såväl skärning som svetsning (t.h.)



Figur 23. Även med en diodlaser går det att skapa en förstklassig strålkvalitet om man kombinerar flera strålar från lysdioder med olika våglängd, s.k. WBC vars princip ses t.h.

Laserline tycks ha fått en konkurrent då det gäller både konventionella diodlasrar och sådana med "blått" laserljus i form av *Panasonic Industry*. Deras presentation hölls av Per **Schumacher**, som tydligen kom från företagets marknadsavdelning då han hade uppenbara problem med att besvara frågor av teknisk karaktär. Hursomhelst redogjorde han för deras

"LAPRIS" [Laser Process Robot Integrated System Solution] -koncept, som innebär ett komplett system med laserkälla, industrirobot med verktygsoptik samt styrsystem [**Fig. 22**]. Man har ett mjukvaruprogram som kallas "Navigator", och som kan hjälpa operatören att välja bästa parameteruppsättning med avseende på fogutformning.

Panasonic kan idag erbjuda diodlaserar med 4 och 6 kW effekt som har en utmärkt strålkvalitet tack vare att man använder s.k. WBC [Wavelength Beam Combining **Fig. 23**]. Därför kunde Herrn Schumacher visa exempel på både laserskärning med "blått" laserljus [**Fig. 24**] och svetsning av TWB [Tailored Welded Blanks] med tillsatstråd, där den senare matades genom robotens ihåliga arm. Här hade man utvecklat ett svetsverktyg med två separata gasflöden; ett för att undertrycka plasmaformering och ett för att hålla skyddsglasat rent från metallsprut [**Fig. 25**].

Ett alternativ till batterier är att använda bränsleceller för fordonens framdrift och här är ju Tyskland lite av ett föregångsland inte minst med tanke på Mercedes' kraftfulla satsning på tekniken, och den globala försäljningen av vätgasdrivna bilar beräknas överstiga en miljon år 2030, en siffra som prognostiseras växa till 11 miljoner 2040. Nu gav Frau Dr. Isabel Thome från *Trumpf GmbH* oss en uppdatering kring tillverkningen av s.k. bipolära plattor. Dessa bygger upp bränslecellerna och måste vara rengjorda från pressolja och övrig smuts för att garantera en 100%-ig täthet hos svetsarna då vätgas och syrgas måste hållas åtskilda i bränslecellerna. För denna rengöringsprocess använder man lämpligtvis *Trumpfs* nano-pulsade laser *TruMicro7060* som förångar föroreningarna [**Fig. 26**]. Sålunda kan en yta på 20×30 cm rengöras på 6 alternativt 12 sekunder om 1 kW eller 500 W lasereffekt används.

Produktivitetsskravet är viktigt då varje bipolär platta sammanfogas med 3–6 m lasersvets, vilket innebär en svetslängd på mellan 900–2.400 m för en bränslecellsstapel [**Fig. 27**]. Därför krävs exakt positionering av laserstrålen och höga svetshastigheter. För att säkerställa det förstnämnda hade man använt företagets kamerabaserade sensorverktyg "VisionLine". Svetsningen hade utförts med en *TruFiber SM*-laser och *Trumpfs* skanner-optik PFO 33-2. Lasereffekten låg mellan 400–600 W och fokuspunktsdiametern på arbetsstycket mätte 35–50 µm vilket resulterade i en svetsbredd på 80 µm. Beträffande svetshastigheten kunde man konstatera att "humping"-problem uppstod vid hastigheter överstigande 600 mm/sek.

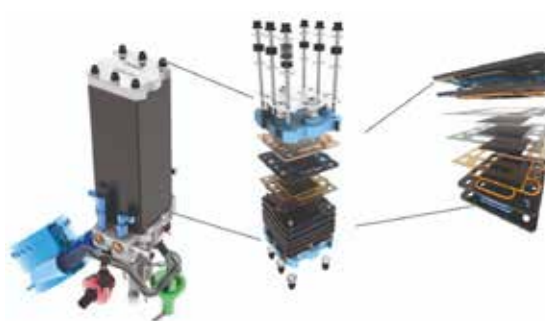
Viktigt är också att spalten mellan plattorna inte är större än 10 µm varför fixeringen av desamma är viktig, annars finns risk för sprickor och bindfel, s.k.



Figur 24. Laserskärning med "blå" våglängd.

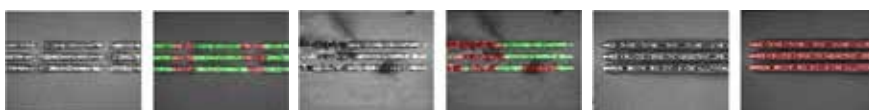


Figur 26. Med *Trumpfs* pulsade *TruMicro7060*-laser går det utmärkt att rengöra ytorna på de bipolära plattorna till bränsleceller så att man inte riskerar att få otäta fogar vid den efterföljande lasersvetsningen.



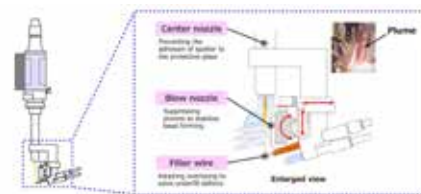
Figur 27. De bipolära plattorna byggs upp av tunna rostfria folier med tjocklekar mellan 75-100 µm. Dessa byggs sedan samman till staplar som kan innehålla mellan 300-400 plattor med en sammanlagd svetslängd på drygt 2 km(!) för vissa varianter.

Figur 28. Vid de höga svetshastigheter som blir aktuella vid sammanfogning av de bipolära plattorna är risken uppenbar för att s.k. humping skall uppstå. Därför använder man bildanalys kombinerad med AI för att detektera fr.v. nedan; avbrott i svets, ofullständig svets p.g.a. smuts på ytan samt "humping"-beteende.



false friends. Man använder en form av bildanalys för att kontrollera svetskvalitén och planerar att snart kunna kombinera denna med någon form av AI [Artificiell Intelligens, **Fig. 28**].

Dr. Alexander Olowinsky leder den grupp som forskar kring mikrobearbetning vid *ILT [Institut für LaserTechnik]* i Aachen, men har på senare tid engagerat sig kraftfullt i att undersöka hur olika laserprocesser kan integreras i ett kontinuerligt produktionsflöde vid tillverkning av batterielektroder. Elektroderna tillverkas utifrån plåtrullar där ett processteg handlar om att torka materialet. Här är lasern överlägsen traditionell ugnstorkning



Figur 25. *Panasonics* svetsverktyg med två separata skydds-gasflöden.



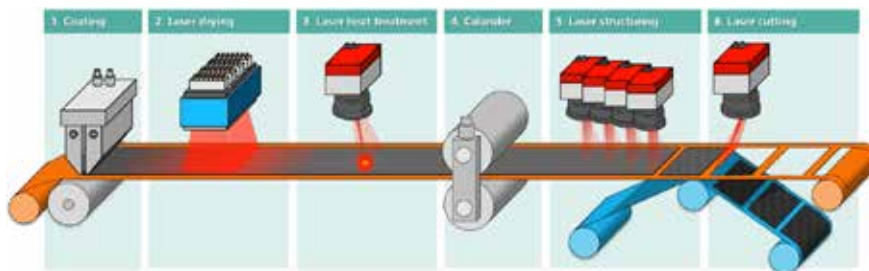
genom sin korta interaktionstid på några millisekunder och snabba uppvärmningskapacitet [$>1.000\text{ }^{\circ}\text{K/sek}$], vilket resulterar i en likvärdig morfologi. Andra operationer är värmebehandling, strukturering för att öka energilagringsskapaciteten samt slutligen konturskärning av elektroderna [**Fig. 29**]. I det senare fallet hade man observerat fördelar med att använda en UKP [Ultra KurzPuls] -laser med grön våglängd, som kombinerar hög absorptivitet av laserljus med snittkantskvalitet utan tendenser till delaminering.

Svetsning av anod- och katod-elektroder av Se-Cu58- respektive Al 1085-material, samt deras kontaktering hade

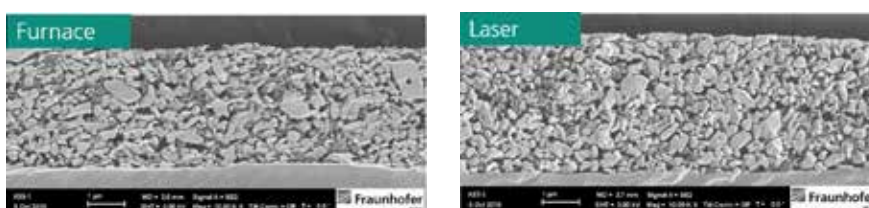
studerats i de båda utvecklingsprojekten "HoLib" och "Mikropuls". I det förstnämnda projektet hade tre olika laserkällor, alla med 1 kW effekt använts; diodlaser, disk-laser och IR-laser med våglängderna 450, 515 respektive 1.070 nm. Med optimala processinställningar kunde kvalitativa svetsar åstadkommas med samtliga lasertyper. I "Mikropuls"-projektet hade svetsning med nanosekund-långa pulser jämförts med cw [continuous wave] -svetsning [Fig. 30]. Lägre medeleffekt behövdes vid den pulsade svetsningen, men då på bekostnad av längre processtider. Fogens hållfasthet var jämbördig för de båda förfarandena, så också en god repeterbarhet och minimala intermetalliska faser.

Gamle bekantingen Herbert **Staufer** från *Fronius International GmbH* berättade om tillverkning av batteriramar i aluminium med hjälp av laserhybrid-svetsning. Ramarna mäter 1,6x2,2 m och består av ett antal extruderade profiler i legeringen AA6063 med vägg tjocklekar mellan 4–15 mm. En stor del av presentationen beskrev ljusbågsprocessen och de nya möjligheter som finns med förbättrad styrning hos strömkällan såsom CMT [Cold Metal Transfer], LSC [Low Spatter Control] och PMC [Pulse Multi Control]. Här hade en av företagets senare innovationer LSC använts för att undvika uppkomsten av svetsprut, men att också bättre kunna stabilisera såväl penetrationsdjup som bågslängd [Fig. 31], och skapa en bättre rotgeometri i områden med begränsad åtkomst. Herrn Staufer visade också hur man genom att mäta spänningen över den med 120 Hz reverserade tillsatstråden kunde använda denna för fogsökning.

Vid basala hybridförsök hade 3 mm tjockt material svetsats med 6 kW effekt från en TruDisc10002-laser från *Trumpf* och en fokalpunktsstorlek på 0,6 mm. Framföringshastigheten var 4 m/min med en trådmatning på 7,5 m/min. Intressantare var emellertid de försök där laserstrålen hade roterats med 100 Hz inom en diameter på 2 mm för att på så sätt öka svetsbredden eller överbrygga större spalter [Fig. 32]. Här krävdes en mindre fokalfpunkt på 0,3 mm varför en 10 kW fiberlaser från *IPG* hade använts vid dessa försök. Periferihastigheten hos laserstrålen låg på 38 m/min, men framföringshastigheten sjönk till 1,8 m/min vid 6 kW lasereffekt p.g.a. strålscilleringen. På en fråga från auditoriet svarade den gode Herbert att cirkelmönster upp till 3–4 mm i diameter är möjliga, men då på bekostnad av ett sämre penetrationsdjup.



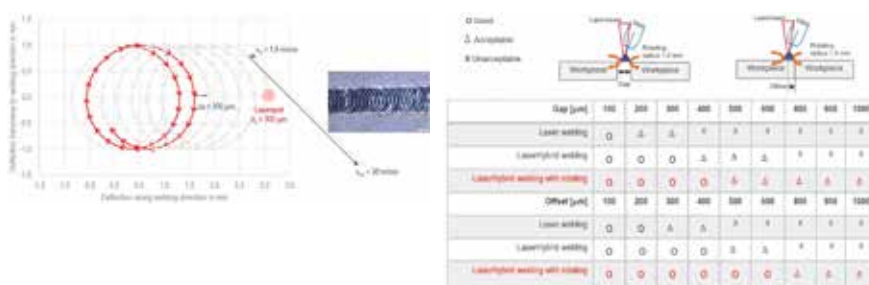
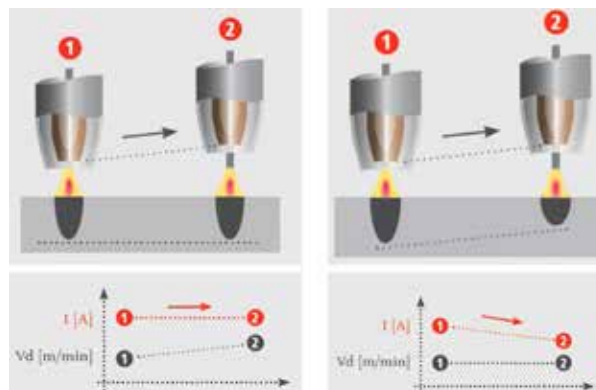
Figur 29. Ovan en idé om hur man med olika laserprocesser åstadkommer en kontinuerlig tillverkning av batteri-elektroder. En operation är torkning av substratytan där laserns uppvärmningskapacitet vida överträffar den som är möjlig vid ugnstorkning. Dock ses morfologin vara likvärdig för de båda metoderna (nedan).



Figur 30. En tvärsnittsanalys av dessa blandfogar mellan aluminium och koppar visar ingen nämnvärd skillnad om de svetsas med kontinuerlig laser-effekt (närmast) eller med nanosekund-pulser. Dock behövs mindre medeleffekt i det senare fallet.



Figur 31. Principen för Fronius' LSC-funktion (närmast) där man med bibehållen strömstyrka ökar trådmatningen för att vid längre "stand-off" bibehålla penetrationsdjupet. T.h. det normala beteendet då avståndet mellan kontaktmysticket och plåtytan ökar.



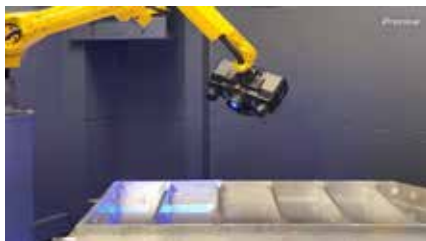
Figur 32. Vid hybridsvetsning med roterande laserstråle ges bättre möjligheter att överbrygga spalter och kompensera för fellinjering.

Kompleta batteriramar hade sedan svetsats med denna teknik [Fig. 33], och där man använt OCT [Optical Coherence Tomography] för processkontroll. På så sätt kunde distorsioner minimeras och en repeterbar dimensionsnoggrannhet uppnås.

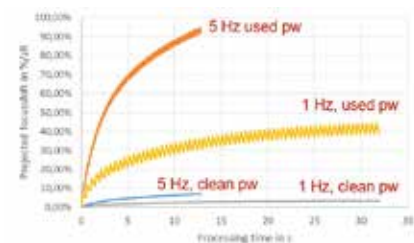
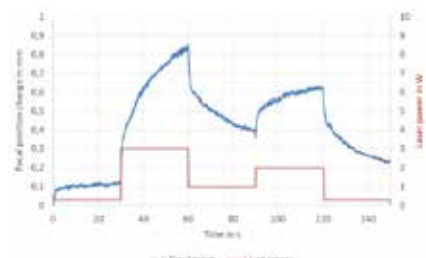
Ett av EALA-konferensens teman var processövervakning och -kontroll, ett område inom vilket vi hittar alltmer sofistikerade lösningar för att övervaka olika laserprocesser och tillse att dessa utfaller med högsta möjliga kvalitet på slutresultatet. Förste talare i den här sessionen var Thomas Umschlag från Primes GmbH. Företaget har ju varit framgångsrikt med sina verktyg för mätning av den verkliga lasereffekt som når fram till arbetsstycket. Bl.a. används deras PMM [Power Measurement Module] i över 1.000 olika anläggningar världen över. Nu fokuserade Herrn Umschlag på det klassiska problemet med fokalpunktsförskjutning, vilket uppstår antingen genom att optiken förändras p.g.a. uppvärmning eller då skyddsglasat blir smutsigt. Denna förskjutning av fokuspunkten ökar med tilltagande lasereffekt och likaledes med längre kontinuerlig drift [Fig.34].

Därför har Primes utvecklat ett verktyg kallat "FocusTracker" [Fig.35] som kan detektera en sådan fokalpunktsförskjutning, och indikera när det är dags för någon form av förebyggande underhåll. Liksom företagets produkter för effektmätning är det fråga om ett "off-line"-instrument, men Herrn Umschlag lät meddela att man håller på att ta fram en lösning där "FocusTrackern" sitter integrerad i laserverktyget och sålunda kan utföra mätningar "in-situ".

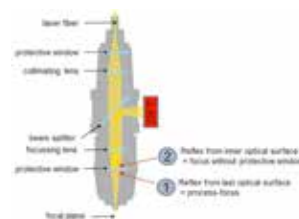
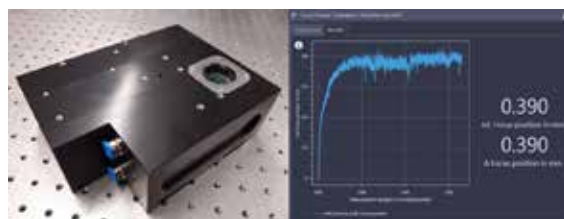
Precitec GmbH var väl representerat vid EALA2021 och bjöd på två presentationer inom området processövervakning. Den första framfördes av Jens Reiser som berättade om hur man kan använda olika intelligenta sensorer och optiker vid tillverkning av den elektriska motorns stator. Tre olika sensortyper [Fig. 36] hade använts för att detektera de s.k. hårnålarnas position; CLS [Chromatic Line Sensor], CVC [Chromatic Vision Camera] samt FSS [Flying Spot Sensor]. Den kromatiska linjesensorn arbetar med 4 kHz frekvens och skannar cirka 4.000 linjer per sekund. Med 50 µm inbördes avstånd mellan linjerna innebär detta att hela statorn kan avsynas på 2,5 sekunder. Kamera-varianten har en högre kapacitet med sina 80 kHz och 80.000 linjer per sekund, vilket gör att, med 10 µm mellan linjerna, den totala



Figur 33. Inmätning och laserhybridsvetsning av batteriramar där laserstrålen oscilleras med 100 Hz i ett cirkelmönster för att säkerställa svetsgeometrin vid variationer i positionering och spalter.



Figur 34. Problemet med fokalpunktsförskjutning tilltar vid ökad lasereffekt och långa driftstider, liksom vid ett nedsmutsat skyddsglas.



Figur 35. Primes' "FocusTracker", som ger en lättöverskådlig bild av fokalpunktsförskjutningen, utlovas komma i en variant som kan integreras i själva laserverktyget och möjliggöra avläsning av effekten i realtid (t.h.).



Figur 36. Tre kommersiella mätverktyg från Precitec; fr.v. en linjeskanner (CLS, en kromatisk kamera (CVC) samt punktsensorn FSS.



Figur 37. Svetsverktyget LWM 4.0 från Precitec kan kombineras med företagets skanner-verktyg "ScanMaster", och tillsammans med OCT- och kameramoduler fungera som en intelligent svetsoptik.

kontrolltiden stannar på smått otroliga 0,6 sekunder! Dessa båda sensortyper kan fastlägga avstånden mellan de enskilda "hårnålarna", men för att kontrollera dess läge i såväl z- som x- och y-led kan man använda företagets rörliga punktsensor FSS som bygger på OCT-teknik. Den

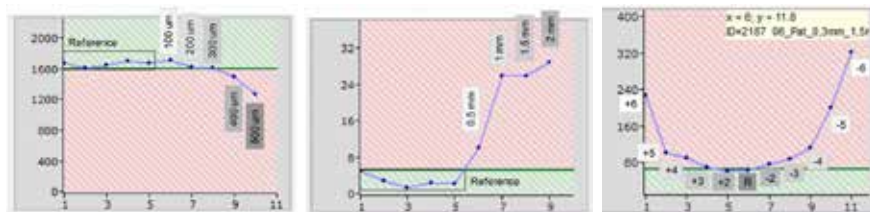
arbetar med en frekvens på 70 kHz och skannar 70.000 punkter per sekund!

Därpå visade han hur själva svetsoperationen utförs med Precitecs LWM 4.0 [Laser Welding Monitor, Fig. 37] -modul monterad på ett skanner-verktyg. Svetsningen hade skett med 2 kW effekt

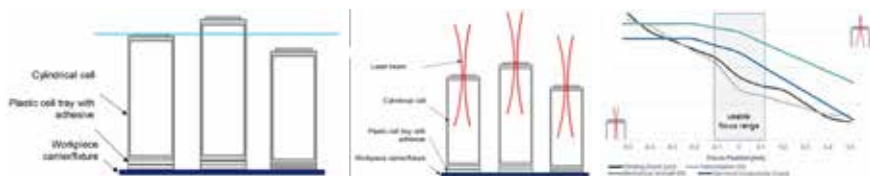
från en ”grön” laser och svets hastigheten låg på 150 mm/sek vilket gjorde att ett ”hårnålspår” processades på mindre än 0,25 sekund. LWM 4.0 innehåller tre fotodioder med olika våglängd och 2,4 mm Rayleigh-längd. Verktöget kan även användas för att kontrollera ”hårnålarnas” ytor efter att den korrosionsskyddande filmen avlägsnats kring svetsstället med hjälp av laserpulser. Dess förmåga att reagera på olika processvariationer hade sedan undersökts i en mängd svetsförsök. Sålunda hade man svetsat vid spalter upp till 500 µm, höjdavvikelse upp till 2 mm, samt fokalpunktslägen mellan -6 och +6 mm [Fig. 38]. Slutligen visade Herr Reiser upp vad han kallade *Precitecs* intelligenta optik som bestod av företagets skannerverktyg ”ScanMaster” med motoriserad kollimering som möjliggör s.k. 2,5D-bearbetning, kompletterat med en OCT-sensor, LWM-modul samt kromatisk kamera. Vikten för ett sådant komplett system ligger kring 27 kg.

Nästa *Precitec*-presentation stod kologan Lutz **König** för, nu med benäget bistånd av välkände *Mercedes*-profilen Christian **Elsner**. Här visade man upp hur LMW-verktyget används i produktion vid någon av *Mercedes*-koncernens sju(!) batterifabriker. I Europa finns sådana i Kamenz, Untertürkheim, Sindelfingen och polska Jawor, samt dessutom i Beijing, Bangkok och Tuscaloosa, AL. En batterimodul för exempelvis modellen EQC [projektbeteckning N293] innehåller över 300 lasersvetsar mellan battericellerna men även mellan cell och kontaktdon, vilka samtliga måste uppvisa en fullgod kvalitet. Man använder sig av ”ScanMaster”-verktyget som kan arbeta inom våglängdsområdet 1.030–1.080 nm och med upp till 6 kW kontinuerlig lasereffekt. Verktöget är försett med en f-Theta-lins med 340 mm brännvidd som kan täcka in ett elliptiskt format arbetsområde på 220×104 mm. LWM-sensorns känsliga kamera identifierar svetsläget inom <10 ms och visualiserar detta i en gråskalebild, varpå dess OCT-funktion, som arbetar med 70 kHz frekvens, hittar battericellens verkliga toppyta också inom 10 ms, något som är viktigt då battericellernas höjd kan variera inom 0,5 mm. Med hjälp av *Precitecs* ”AutoFocus”-funktion kan sedan fokalpunkten positioneras korrekt [Fig. 39].

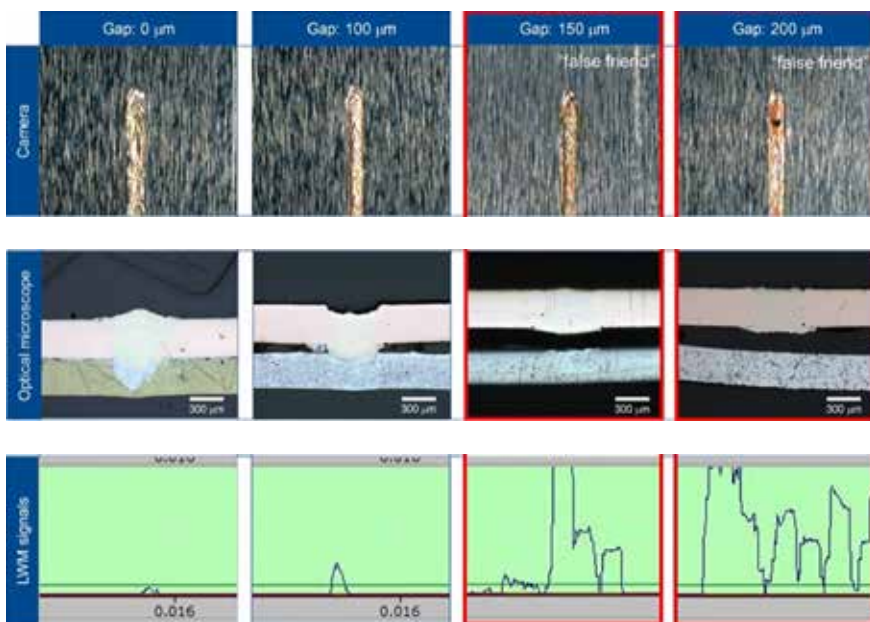
Under själva svetsprocessen kan sedan LWM 4.0 larma vid för stora spalter eller s.k. false friends genom signaler från emissioner från nyckelhålet vilka transformeras till spänningvärden [Fig. 40]. Operatören



Figur 38. Genom att fastlägga en kravnivå kan avvikelser i fr.v. spaltstorlek och förskjutning mellan ”hårnålarna”, samt fokalpunktsläge, enkelt upptäckas då ljusemissioner omvandlas till spänningvärden.



Figur 39. Positionen av battericellernas toppytor kan variera inom 0,5 mm, men kan kompenseras med *Precitecs* ”AutoFocus” så att man under produktion kan innehålla ett fokalpunktsläge på ±0,1 mm.



Figur 40. Några exempel på hur LWM 4.0-verktyget kan larma vid för stora spalter eller s.k. false friends.



Figur 41. Det användarvänliga, Linux-baserade, operatörsgränssnittet med ”touch-screen”-funktion.

har tillgång till omfattande information via en synnerligen användarvänlig ”touch-screen” [Fig. 41], där även svetsgeometrin kan bedömas med gråskalebaserad bildanalys.

Som framgår av ovanstående är OCT ett allmänt använt verktyg för processövervakning inte minst då det gäller att

svetsa applikationer inom ”e-mobility”, och här följer två presentationer som gick något mer detaljerat in på praktiska hänsynstaganden vid användning av tekniken. Jan **Hermani** från *Trumpf GmbH + Co. KG* berättade om företagets egen OCT-modul och hur denna kan integreras i deras skanner-verktyg PFO33

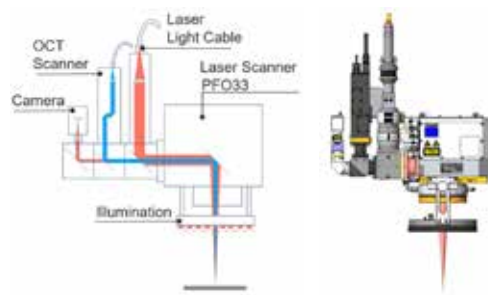
[Fig. 42]. Typiska användningsområden är fogföljning, kontroll av penetrationsdjup och svetsprofil, samt lägesbestämning av exempelvis "hårnålar" innan svetsning. För det senare ändamålet är kameraövervakning inte optimal då den inte hittar avvikelser mellan "hårnålarna" i vertikal led, eller om dessa uppvisar skador eller geometriska avvikelser på sina topppytor.

Eftersom man arbetar med två laserstrålar; processtrålen på 1.030 nm och OCT-strålen med en våglängd kring 840 nm, är det viktigt att dessa är positionerade så nära varandra som möjligt för att OCT-signalen skall ge relevant information [Fig. 43]. Därför hade grundläggande studier genomförts där kravet var att avvikelserna mellan de båda fokuspunkterna inte fick överstiga 10 µm. Eftersom man kan förvänta sig att det kan bli problematiskt att innehålla ett sådant krav vid kontinuerlig produktion under varierende temperaturförhållande hade försök genomförts under nio timmar under vilka temperaturen varierades cykliskt inom 25 °K. Glädjande nog kunde man konstatera att kravet uppfylldes även under sådana extrema produktionsförhållanden.

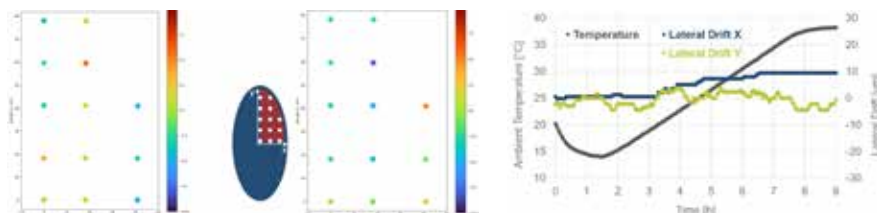
För att säkerställa positioneringen mellan de båda laserstrålarna har *Trumpf* utvecklat ett kalibreringsverktyg med ett centralt stifthål. OCT-strålens axiella justering sker här med mätverktyget yta som referens, medan den laterala justeringen görs via en koaxiell linjering gentemot stifthålet. Kalibreringsprocessen är helt automatiserad och hade validerats vid lägesbestämning av "hårnålars" position, och resultaten visade att man fick en noggrannhet på ± 10 µm lateralt och ± 25 µm i z-led för mätvärdena.

Richard **Steinbrecht** [*Lessmüller GmbH*] tillsammans med doktorandstuderande Marius **Swartz** redogjorde för hur OCT kommer till användning vid batteritillverkning hos *Mercedes-Benz AG*, när det gäller att mäta svetsdjup och -profil. Vid mätning av penetrationsdjupet bör man beakta att nyckelhålets djup är något mindre än svetsens då OCT-strålen träffar en 10–20 µm tjock laminär smälta i nyckelhålets botten [Fig. 44]!

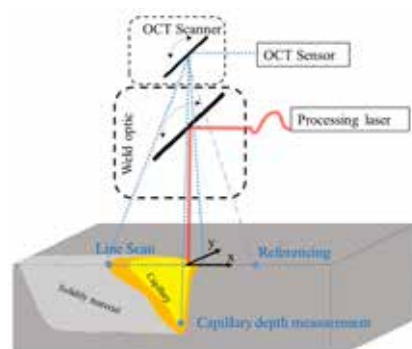
Vid överlappssvetsning av 0,2–0,6 mm tunna membran av aluminium och koppar hade tekniker med linjär respektive punktuell OCT-skanning jämförts. Den linjära varianten mäter längs hela svetsens längd, medan fördelen med den punktvisa skanningen är en mycket hög signalupplösning, och i kombination med ett percentil-filter får man en mycket god



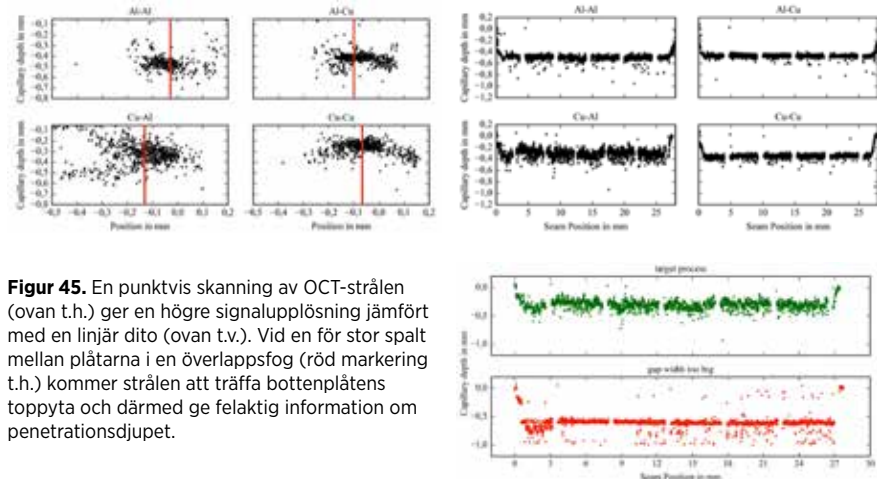
Figur 42. Trumpfs OCT-modul kan enkelt integreras i företagets skanner-verktyg PFO33.



Figur 43. Avvikelser i x- (t.v.) och y-led (t.h.) mellan processtråle och OCT-dito vid olika positioner inom skanningsfältet. Blå färgskala innebär < -10 µm och röd $< +10$ µm. Även vid cykliska temperaturvariationer innehålls kravet på < 10 µm avvikelse.



Figur 44. Doktorandstuderande Marius Swartz kunde konstatera att OCT-strålen träffar en tunn laminär smälta i nyckelhålets botten, varför man bör räkna med ett något större svetsdjup än vad som indikeras via OCT-sensorn.



Figur 45. En punktviss skanning av OCT-strålen (ovan t.h.) ger en högre signalupplösning jämfört med en linjär dito (ovan t.v.). Vid en för stor spalt mellan plåtarna i en överlappsfog (röd markering t.h.) kommer strålen att träffa bottenplåtens topppyta och därmed ge felaktig information om penetrationsdjupet.

överensstämmelse mellan OCT-signalen och penetrationsdjupet [Fig. 45]. Vid för stor spalt mellan membranen för att en fullgod svets skall kunna åstadkommas, kommer OCT-strålen att träffa det underliggande membranets topppyta och

inte i botten på något nyckelhål, något som detekterades mycket väl med den punktuella skanningen.

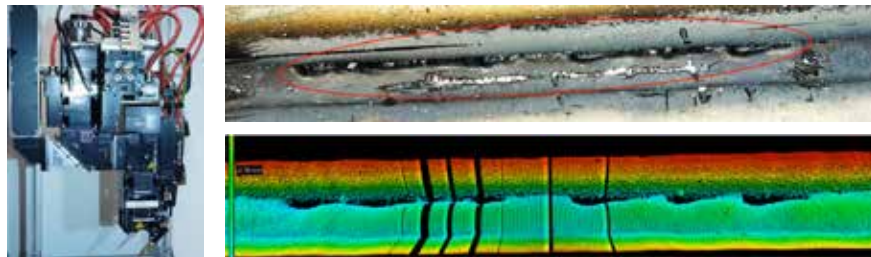
Svetsförsök hade utförts på aluminium med OCT-enheten integrerad i *Scansonics ALO3*-verktyg. Svets hastigheten uppgick

till 2 eller 5 m/min vilket innebar 50 respektive 120 μm mellan OCT-punkterna. Ett antal pre-fabricerade svetsdefekter kunde enkelt detekteras, och förtydligades då OCT-signalen konverterades till en färgskalebild [Fig. 46]. Liksom *Precitec* erbjuder *Lessmüller* förutom OCT-modul även en kameralösning kallad *WeldEye®* för processövervakning av själva svets-smältan.

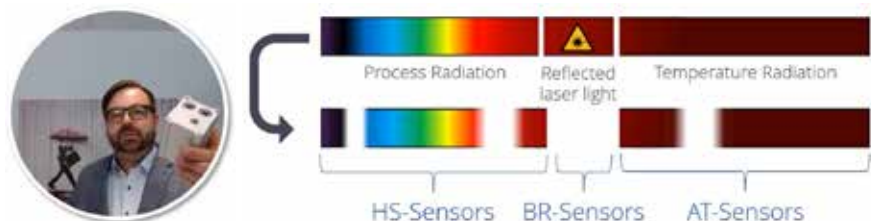
En känd profil i lasersammanhang är Christoph **Franz**, som under flera år arbetade för *Scansonic GmbH* där han var med om att utveckla flera laserverktyg. Sedan några år basar han över verksamheten hos *4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen mbH*, som levererat över 1.500 laserverktyg och -system "world-wide". Man kombinerar tre olika typer av sensorer som mäter strålningen från laserprocessen, återreflekterat laserljus samt värmestrålning, och vilka har beteckningarna HS, BR respektive AT. Man täcker på så sätt in hela 32 olika våglängdsområden från UV [UltraViolet] till IR [Fig. 47]. Sensorerna, som ingår i företagets produktfamilj "WeldWatcher®" kan integreras antingen i bearbetningsverktyget eller i själva laserkällan [Fig. 48], och för att få ut bästa tillförlitliga information rekommenderade Christoph det senare.

Två praktikfall där denna sensorlösning använts presenterades, där den första handlade om det välbekanta ämnet svetsning av "hårnålar" i koppar, och det andra om borttagning av den korrosionsskyddande isoleringen på sagda "hårnålar". I det förstnämnda fallet hade svetsningen skett med 5 kW från en TruDisc8001 från *Trumpf* i kombination med skannerverktyget PFO33. Processhastigheten låg på 12 m/min där den cirkelformiga oscilleringen repeterades tre gånger med en radie på 1 mm för varje "hårnålspår", där den enskilda "hårnålens" toppyta mäter 2x4 mm. I detta fall hade en sensor av AT-typ använts, vilken hade en insamlingsfrekvens på 20 kHz och var integrerad i laserkällan. Olika förutsättningar vid svetsningen hade analyserats såsom kvarsittande isolering, olika spalter mellan "hårnålarna" [Fig. 49] och olinjär positionering av desamma.

Då det gällde lokal borttagning av isoleringsskiktet hade *Trumpf*-lasern TruMicro 7070 använts i kombination med PFO33-verktyget. Distributionsfibern mätte 460x460 μm och här hade man valt en sensor av typen HS med insamlingsfrekvensen 20 kHz. Kvarsittande rester av isoleringen ger helt andra



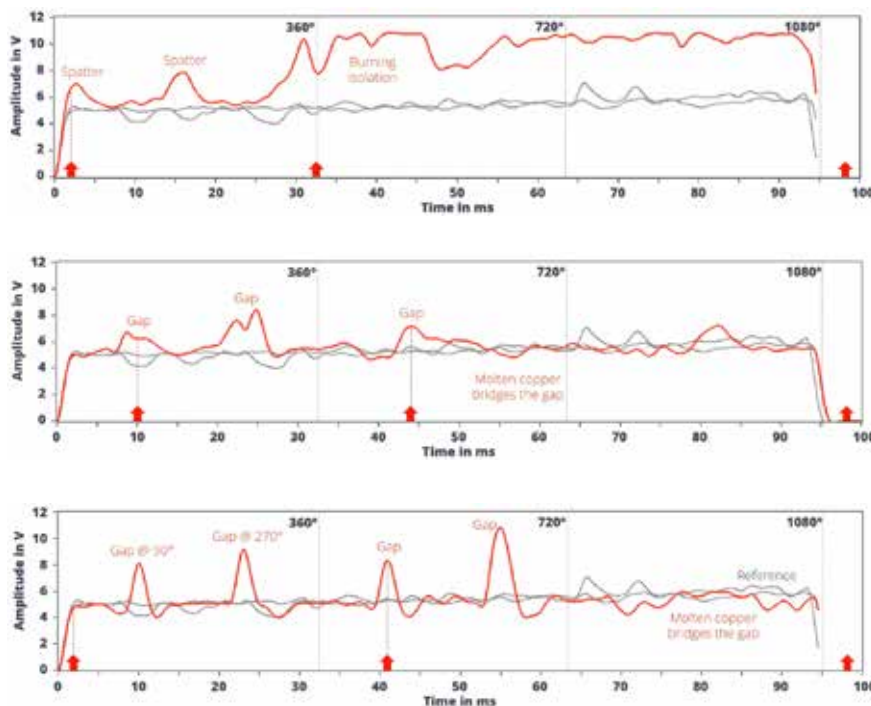
Figur 46. T.v. Lessmüllers OCT-modul integrerad i Scansonics svetsverktyg ALO3. Därjämte ser vi hur väl uppkomna defekter i lasersvetsen överensstämmer med färgskalebilden baserad på OCT-signalen.



Figur 47. Christoph Franz visar stolt upp det mätinstrument med tre olika sensortyper (HS, BR och AT) som täcker in hela 32 olika våglängdsområden.



Figur 48. Sensormodulen (markerad i blått) kan integreras i såväl verktyg (t.v.) som laserkälla (t.h.). Det senare är att föredra ur tillförlitlighetssynpunkt.



Figur 49. En sensor av typen AT hade använts för att identifiera kvarsittande isolering (ovan) samt spalter mellan "hårnålarna" på 0,2 resp. 0,5 mm (t.h.).

signaler jämfört med en helt rengjord "hårnål" [Fig. 50], samtidigt som signalnivån är stabil och repeterbar p.g.a. de korta laserpulserna med högt energiinnehåll.

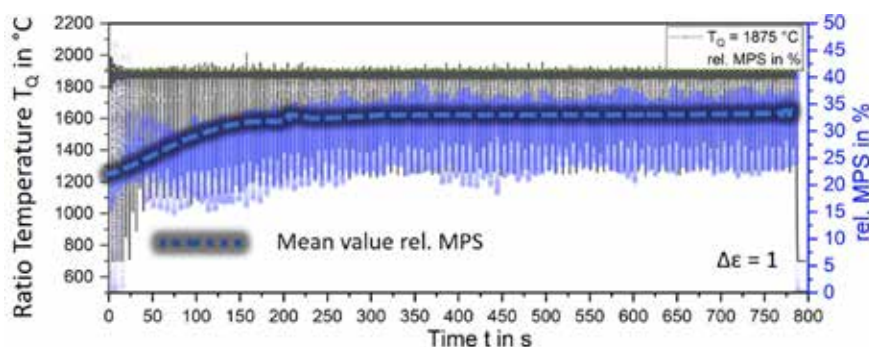
Ytterligare en sensortyp [6WEA] hade använts vid överlappsvetsning av 0,3 mm tjocka kopparmembran positionerade ovanpå en 1,0 mm tjock aluminiumplåt. Svetsningen hade skett med 6 kW lasereffekt och en framföringshastighet på 18 m/min där sensorns datainsamlingsfrekvens låg på 8 kHz. Med signalamplituden konverterad till ett spänningsvärde kunde man detektera områden längs svetsen där uppblandningen av aluminium i svetsgodset blivit så hög att detta material nådde upp till svetsens toppyta.

Helmut **Kriz** från *Sensortherm* fick avsluta sessionen kring processövervakning och -kontroll. Han, tillsammans med samarbetspartnern Oliver **Henschel** från *FAU [Friedrich-Alexander Universität]* i Erlangen berättade om hur företagets pyrometer av "two-colour"-typ kan kontrollera temperatur och därigenom smältans storlek [MPS = Melt Pool Size] då man bygger strukturer med hjälp av LMD [Laser Metal Deposition]. Ett sådant verktyg ansågs vara nödvändigt för att undvika ökande temperaturer under byggnation av strukturen, något som kan resultera i varierande skiktjocklekar, dimensionsavvikelser och inhomogena materialegenskaper. Datainsamlingsfrekvensen hos *Sensortherms* tvåfärgspyrometrar ligger på drygt 10 kHz, och de båda våglängdsområden som betraktas är 1,4-1,6 µm och 1,6-1,8 µm. Pyrometeroptiken kan placeras antingen koaxiellt med påläggningsmunstycke och laserstråle eller lateralt till detsamma, dock blir påläggningsprocessen riktighetsberoende i det senare fallet. Den kan sedan förses med en s.k. PID [Proportional Integral Derivative] som ger en "closed-loop" av processen genom reglering av lasereffekten [Fig. 51].

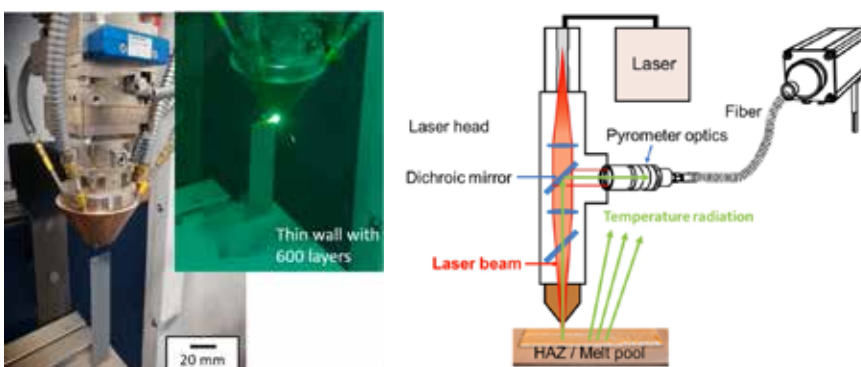
Experimentell tillverkning av tunna väggar [200×200×15 mm] respektive rätblocks-formiga strukturer [55×20×15 mm] hade sedan utförts med hjälp av *Trumpfs* disklasers *TruDisc1000* och *Precitecs* påläggningsmunstycke *YC52* med fyra diskreta öppningar för pulverflödet. Pulvermaterialet var gasatomiserat *AISI [American Iron and Steel Institute]* *H11 [1.2343]* med kornstorlekar mellan 20-60 µm och matades med 2 g/min. Processhastigheten uppgick till 400 mm/min och som skyddsgas hade en blandning av helium och argon använts. Med processkontrollen blev dimensionsnoggrannhe-



Figur 50. Sensorsignalen kan indikera hur väl "hårnålarna" rengjorts, och vi ser att vid endast en sekvens med laserpulser sitter en stor del av isoleringen kvar (grön kurva).



Figur 51. Med en pyrometer försedd med en s.k. PID kan en "closed-loop" skapas där lasereffekten regleras för att ge en konstant temperatur i de LMD-byggda objekten och därmed en stabil storlek hos smältan.



Figur 52. 600 mm höga strukturer hade byggts med pyrometern monterad lateralt i förhållande till laserstrålen (t.v.). Nackdelen med ett sådant arrangemang är att processen blir riktighetsberoende, något som kan undvikas om man i stället använder en koaxiell lösning (t.h.).

ten hög och mätte för väggstrukturerna i höjd $\pm 0,1$ mm, väggjocklek $\pm 0,15$ mm och ytplanheten låg mellan $\pm 0,105/\pm 0,158$ mm. Även 600 mm höga väggstrukturer hade tillverkats [Fig. 52] för att utvärdera den relativa densiteten, och med optimerade parametrar var det möjligt att uppnå så höga värden som 99,94%. Samtidigt kunde man registrera homogena mikrostrukturer och hårdhetsvärden.

Årets upplaga av *EALA* bjöd på få praktikfall för laserbearbetning som inte handlade om batteri- eller andra "e-mobility"-applikationer. Dock fanns några som kan vara värda att lyfta fram, och jag

börjar då med klassisk takskarvsvetsning av karosser, i detta fall *Audi A8* där utmaningen ligger i att dess struktur är helt tillverkad i olika aluminiumlegeringar och -typer. Tillsatstråd är fortfarande nödvändig, men för att åstadkomma en förhöjd kvalitet av dessa synliga skarvar ville man undersöka olika alternativ av skräddarsydd energifördelning [Fig. 53]. Företagets talan fördes inte oväntat av Dr.-Ing. Jan-Philippe **Weberpals**, med god hjälp av kollegan Herrn Daniel **Böhm**, och man hade fastnat för att använda sig av *Laserlines* "spot-in-spot"-koncept med en strålomformningsmodul benämnd

KHW1,5. Denna hade integrerats i Scansonics ALO3-verktyg.

Med traditionell "top-hat"-fördelning av laserenergin och en relativt stor fokalpunkt är det svårt att undvika processvariationer och därmed blir det svårt att ha kontroll över värmeförseln. Bättre då att kombinera värmeledningssvetsning med nyckelhålsdito, vilket man kan göra med sagda "spot-in-spot"-koncept. Dessutom bidrar värmeledningsdelen med att man får en snygg toppyta på den visuella svetsen.

Vid produktionsprov av modellerna Audi A8 och Volkswagen Touareg hade man använt Laserlines konverterade diodlaser LDF 6.000-6 med en distributionsfiber på 0,3 mm, vilket gjorde att fokalpunktsdiametern för "nyckelhålet" kunde begränsas till 0,3 mm och på så sätt bidra till ett förbättrat penetrationsdjup. Tillsatstråden matades med Abicor Binzels system "MFS-V3.1". Denna typ av strålomformning, kombinerad med en högre effekt då dagens processupplägg baseras på en 4 kW diodlaser, gjorde att processhastigheten kunde drivas upp från 60 till 95 mm/sek, eller med cirka 37%, med en förbättrad processtabilitet jämfört med svetsning med en singular fokalpunkt. Dock medförde samtidigt ny laserkälla plus svetsverktyget med integrerad strålomformningsmodul en 22%-ig högre investeringskostnad. Samtidigt undersökte teamet om man kunde byta ut dagens skyddsgas i form av helium till betydligt billigare argon-gas utan att försämra penetrationsförmåga eller det visuella utseendet hos fogen [Fig. 54]. Beträffande det senare måste man emellertid fortfarande utföra en efterföljande borstningsoperation av fogen. Eftersom ingen märkbar skillnad kunde identifieras med hänsyn till skyddsgasbytet innebar detta en 98%-ig besparing för denna förbrukningsdel, vilket gjorde att den aktuella investeringskostnaden i inalles sju karosfabriker kunde skrivas av inom loppet av 1,5 år!

Även i nästa praktikfall figurerade Laserline då Dr. Thomas Molitor föredrog ett intressant användningsområde i form av LMD [Laser Metal Deposition] av bromsskivor. Problem idag är att vid anläggning av bromsoket till skivan uppstår en friktion som gör att fint pulver med partikelstorlekar under 10 µm frigörs och sprider sig i luften. Detta kan i sin tur leda till hälsorisker då så fint pulver inandas, och resultera i skador på såväl lungor som blodkärl och nerver. Därför förväntas de "Euro 7"-emissionsregler som



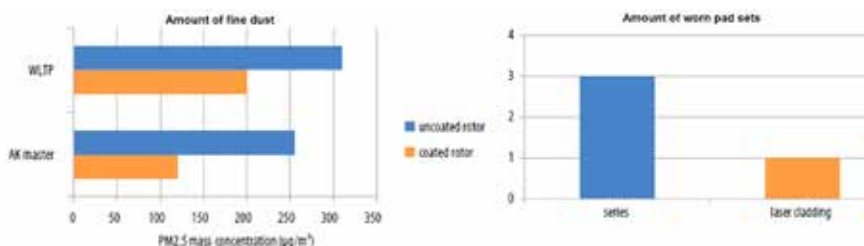
Figur 53. Vid takskarvssvetsning av Audi A8:s aluminiumkaross använder man sig av Laserlines strålomformningsmodul (ovan t.h.) som gör att man kombinerar värmelednings- och nyckelhåls-svetsning.



Figur 54. Takskarven svetsad med 6 kW lasereffekt och 100 mm/sek, och med Helium som skyddsgas t.v. eller Argon t.h. visade sig inte ge några visuella kvalitetsskillnader.



Figur 55. Thomas Molitor från Laserline berättade initierat om hur man kan belägga bromsskivor med hjälp av LMD-processen för att öka slitlängden. Först läggs ett s.k. buffertlager i rostfritt material och ovanpå detta slitskyddet i form av wolframkarbider.



Figur 56. Nötningsprov utförda med två olika metoder ger vid handen att de LMD-belagda bromsskivorna avger 60% lägre pulverpartiklar vid inbromsning (t.v.), något som gör att skivornas livslängd ökar med hela 300% (t.h.)!

träder i kraft år 2025 att också innehålla dylika gränsvärdekrav. Alltså gäller det att hitta en mer slitlång lösning och det man fastnat för är ett toppskikt bestående av wolframkarbider ovanpå ett s.k. buffertlager av rostfritt 316L [Fig. 55]. Det senare används för att öka korrosionsmotståndet, men också för att förhindra sprickor som uppstår i toppskiktet att propagera i

substratmaterialet. Laserspåläggning har visat sig ge 60% lägre mängd fint pulver samtidigt som bromsokens livslängd kan förlängas 300% [Fig. 56].

Standardmaterialet i dagens bromsskivor utgörs av gråjärn som är billigt att tillverka men samtidigt har ett högt kolinnehåll på >2%, vilket gör det extremt svårsvetsat. Fördelen med att istället

pulverbelägga skivorna med LMD är att värmeförlusten är ytterst begränsad. Genom att använda den förhållandevis nya metoden EHLA [Extremes Hochgeschwindigkeit Laser Auftragsschweißen] eller s.k. höghastighetspåläggning [se *LaserNytt* 2-2018, 2-2020 och 3-2020], där pulverfokus och laserstrålens fokuspunkt ligger ett fåtal millimeter ovanför substratytan [Fig. 57], vinner man ett antal fördelar jämfört med konventionell laserpåläggning. Eftersom pulverpartiklarna till stor del redan befinner sig i smält form kan processhastigheten ökas väsentligt, men möjliggör också tunnare skikt [0,1-0,2 mm] och lägre inlösning och värmepåverkan i grundmaterialet.

Försöken hade hittills begränsats till att lägga buffertsikt, som utgjordes av rostfritt pulver med en hårdhet på 220 HV_{0,3}, och som matades med 300 g/min. Lasereffekten uppgick till 22 kW och med en för ändamålet lämplig "tophat"-profil och fokuspunktsstorlek lades 100 µm tjocka skikt under en total processtid på blott 20 sekunder! Kapaciteten uppgår till 8 m² per timme och pulverutnyttjandegraden låg kring 90%. För processövervakning av påläggningsskiktets tjocklek användes lasertriangulering och för svetsmältans storlek och temperatur en termo-kamera utvecklad inom ramen för "CLAMIR" [Control for Laser Additive Manufacturing - InfraRed] -projektet. Vidare användes utrustningar som kontrollerade skyddsglasets kontaminering, förslitning av påläggningmunstycket samt själva pulvermatningen. Framtida experiment kommer att undersöka alternativa beläggningar med wolframkarbider, men även s.k. enskiktlösningar med buffertmaterialet integrerat i toppskiktet. Avslutningsvis kommer man även att titta på likartade lösningar för bromsskivor till elbilar, vilka enligt Dr. Molitor kräver lägre friktion vid inbromsningar jämfört med bilar med förbränningsmotor, och därför endast behöver någon form av korrosionsskyddande beläggning.

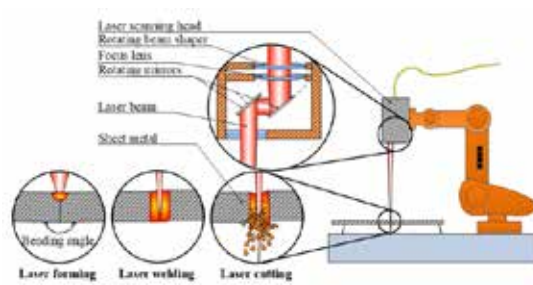
Att lasertekniken har diversifierade användningsområden känner vi alla till, och detta var något som framgick med all önskvärd tydlighet i professor Morten Kristensens [Aalborg University] presentation. I laboratoriet i Aalborg har man byggt upp en försöksanläggning för tunnplåtsbearbetning där lasern kan användas för såväl skärning, formning och svetsning [Fig. 58]. Man har utvecklat en optik som gör det möjligt att växla mellan de olika processerna och där 3D-mätning sker



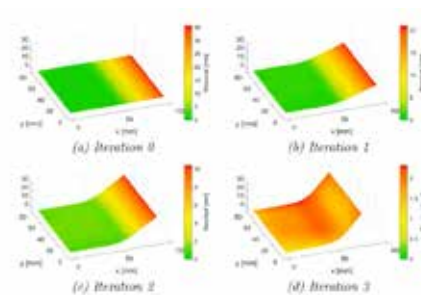
Figur 57. Konventionell LMD t.v. och EHLA t.h. med ett något längre avstånd mellan fokuspunkter och substrat, något som medför högre processhastighet och tunnare beläggningsskikt.



Figur 58. Professor Morten Kristensen och hans kollegor vid Aalborg University har byggt upp en försöksanläggning för laserbaserad tillverkning av tunnplåtsartiklar, vilken innefattar processerna skärning, formning och svetsning.



Figur 59. Stort intresse vid EALA-konferensen väckte detta multi-verktyg med en optiklösning som gör det möjligt att växla mellan olika laserprocesser.



Figur 60. Även dubbelkrökta ytor går att forma med lasertekniken, och för det ändamålet har ett unikt simuleringsprogram tagits fram vid Aalborg University.

med lasertriangulering [Fig. 59], något som väckte stort intresse bland åhörarna.

Presentationen fokuserade sedan på laserformningsdelen, där professor Kristensen förklarade hur man genom att värma selekterade områden på en plåt med hjälp av laserstrålen kan skapa tredimensionella former. När dessa områden svalnar uppstår nämligen kompressionspänningar som gör att detaljen deformeras och därmed kan olika former skapas. Aluminium och rostfritt med plåttjocklekar ända upp till 5 mm tjocklek har kun-

nat formats på detta sätt, och genom att deformationen sker via kompression och inte p.g.a. introducerade böjspänningar blir det bearbetade området starkare och mindre känsligt för sprickbildning. Fortsättningsvis avser man att även prova material som titan, mässing, duplexstål rostfritt samt verktygsstålet Invar [Fe 64% och Ni 36%]. Ett för ändamålet skapat simuleringsprogram gör det även möjligt att laserforma dubbelkrökta ytor [Fig. 60], och metoden kan också användas för att justera detaljer till deras tilltänkta form.

Eftersom det finns ett starkt samband mellan arbetsstyckets temperatur och deformationsgrad bör någon form av temperaturkontroll användas under formningsprocessen.

EALA-konferensen avslutades på vanligt sätt med att bilföretagens representanter i programkommittén fick uttala sig om nuläge och framtiden vad gäller laseranvändning i branschen. Uppenbart har konferensens innehåll på senare år växlat från karossapplikationer till batteri och andra "e-mobility"-tillämpningar. Detta underströks av Thorge **Hammer** [VW] som kunde konstatera att inga nya karosseriapplikationer tillkommit hos *Volkswagen* under de senaste sex åren! Detta förklarade han berodde bl.a. på de höga startkostnader man har för utbildning av operatörer då laserverktygen blir alltmer komplexa vid installation. Han såg det vidare som realistiskt med laseroptiker som med alla inbyggda faciliteter kan kosta mer än själva laserkällan.

Jan-Phillip **Weberpals** [Audi] gjorde samma konstaterande att laseranvändningen alltmer fokuserar på "e-mobility", något som gjort att hans ansvarsområde

som laserkoordinator inom företaget vuxit. Vidare såg han en ytterligare tillväxt beträffande olika sensortekniker, men också kanske en begagnatmarknad för att kunna återanvända laserkällor och -verktyg och rekonditionera dessa istället för att "köpa nytt".

Återanvändning av utrustningar lyftes också fram av Christian **Elsner** [Mercedes-Benz]. Men som gammal drivlineexpert, som nu tvingas byta kompetens till "e-mobility", såg han ett behov av ytterligare kunskapsuppbyggnad kring lasersvetsning av tunna membran i aluminium och koppar, där det också kan bli aktuellt att använda lasern som ett rengöringsverktyg.

Christian **Brémont** [Renault SAS] såg även han en fortsatt utveckling mot laseranvändning inom "e-mobility" och menade att olika former av ytbehandling med hjälp av laser kommer att växa. Vidare försöker han och företaget också på att minimera energianvändningen i koncernens fabriker.

Slutligen Daniele **Bassan** [Centro Recerche Fiat], som gärna kommer med långa önskelistor i dessa sammanhang, nämnde också konsekvenserna av en ökad

elektrifiering av fordonen. Han tror vidare att framtida lasersvetsning kan handla om att sammanfoga komponenter av samma material och legering, men med olika tillverkningsätt såsom plåt, gjutgods och additivt tillverkade komponenter. Vidare ser han röntgen som ett mer precist instrument för processkontroll. Tydligt hade han även inspirerats av professor Kristensens presentation, ty den gode Daniele såg också en framtid i kombinerade laserprocesser som kan hantera såväl skärning, svetsning och ytmodifiering.

Avslutningsvis kan man konstatera att det här digitala formatet av EALA2021 fungerade överraskande bra, men självklart saknas de riktigt spontana kontakter och diskussioner som vi känner till från Bad Nauheim. Värst drabbade blev naturligtvis branschens underleverantörer som detta år inte kunde utnyttja konferensen som ett skyltfönster för sina senaste produkter. Förhoppningsvis har pandemi-situationen förbättrats till det blir dags för EALA2022, som är planlagd att gå av stapeln, förhoppningsvis som vanligt på hotell *Dolce by Wyndheim* i Bad Nauheim, den 8–9 februari nästa år. ■



Som ni vet har det alltid finns mycket intressant att läsa i Lasernytt!

Styrelsen och Chefredaktören har därför tänkt börja "om-publicera" en del äldre artiklar som kan vara extra intressanta för er. Vi har därför startat ett arbete med att ta fram artiklar ända tillbaka från starten av LaserNytt. Dessa Nostalg-artiklar kommer att komma i slutet av varje nummer.

Trevlig läsning!

Fråga laserdoktorn

Fråga

En fråga som vi har funderat på är plasmabildning vid lasersvetsning. Hur fungerar det, och varför är det ett problem? Finns det några rekommendationer och tips kring plasmadiskussionen?

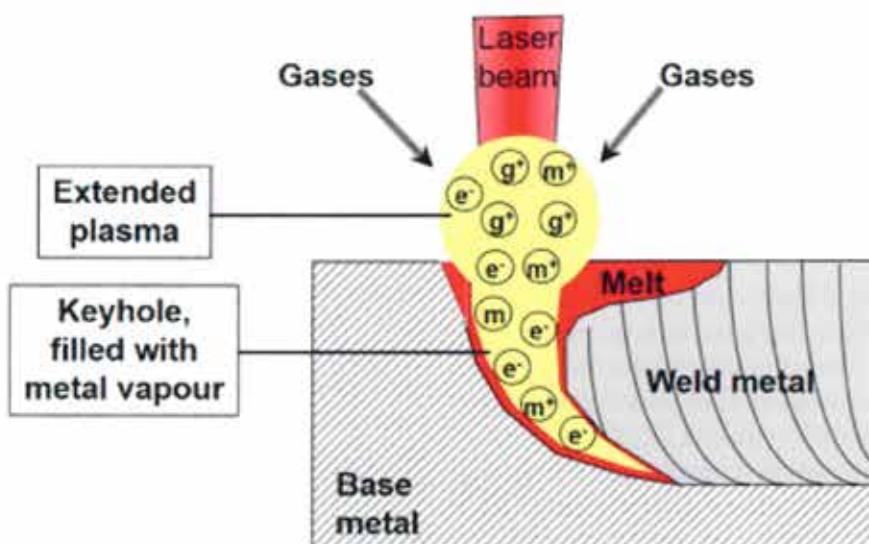
Svar

Plasmabildning är ett fenomen som har diskuterats till och från under lång tid. För att förklara det på enkelt sätt kan man säga att metallen i det svetsade materialet förångas och blandas med joniserad gas mellan svets huvudet och materialet, **fig 1**. Om mängden plasma blir för stor får man en absorption av laserstrålen i plasmat och svetsprocessen störs, vid stora mängder plasma kan man till och med få s.k. plasmaavskärmning där merparten av energin från laserstrålen absorberas i molnet. I dessa fall avstannar svetsprocessen helt och kan inte återupptas förrän molnet har minskat i omfattning.

Det märkliga är att det ändå behövs ett visst mått av plasmabildning för att underlätta för laserstrålen att "kopplas" ner i materialet. Problemet uppstår då det bildas för mycket plasma.

Vilka faktorer påverkar plasmabildningen då? Det finns flera parametrar som styr detta. En parameter är våglängden på laserljuset. Ljuset från CO₂-lasrar med 10,6 µm våglängd absorberas

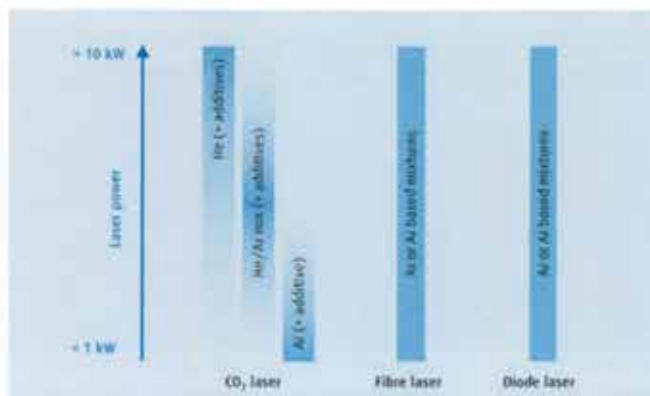
lättare än ljuset från en fiber/disklaser. Lasereffekten påverkar också plasmabildningen. Generellt gäller att ju högre lasereffekt, desto mer plasma bildas i processen. Valet av processgas har också en påverkan på plasmat. För att sammanfatta det hela kan man säga att låg molekylvikt och hög jonisationsenergi är gynnsamt för



Figur 1.
Plasmabildning vid lasersvetsning

att minska plasmabildningen. Det är av den anledning helium ofta används som processgas, framför allt vid höga lasereffekter. Vid lägre effekter fungerar ofta argon eller en argon/heliumblandning. Tumregeln är att använda mer helium

i blandningen ju högre lasereffekt som används, **fig 2**. Vid användning av mer kortvågiga lasrar fungerar argonbaserade gaser och blandningar bättre än då CO₂-lasrar används.



Figur 2.
Processgaser vid lasersvetsning



The northernmost University of Technology in Scandinavia
World-class research and education

Welcome to the 18th

NOLAMP Conference

Nordic Laser Materials Processing

New date! 18-20th January 2022 in
Luleå, Sweden

- Additive manufacturing
- Welding
- Cutting
- Surface treatment
- Laser systems
- ... and any other laser materials processing

Conference language: **English**

Presentation abstract submission: **25 October 2021**

Registration by: **27 November 2021**

Welcome!

Jan Frostevarg and Alexander Kaplan, LTU

Contact information, registration and updated details:

www.ltu.se/nolamp



LULEÅ
UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

