

RE: SOURCE

Slutrapport för projekt

Utökad användning av slagg genom online övervakning av slaggprocesser - fas två (SlaggLIBS-2)

Projektperiod: 08-2018 och till 06-2022
Projektnummer: 44320-2

Med stöd från

VINNOVA
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

FORMAS 

Strategiska
innovations-
program

Utökad användning av slagg genom online övervakning av slaggprocesser - fas två

Enhanced use of slags by on-line monitoring of slag processes - phase two

Titel på projektet – svenska Utökad användning av slagg genom online övervakning av slaggprocesser - fas två
Titel på projektet – engelska Enhanced use of slags by on-line monitoring of slag processes - phase two
Universitet/högskola/företag Swerim AB
Adress Isafjordsgatan 28A
Namn på projektledare Jonas Petersson
Namn på ev övriga projektdeltagare Arne Bengtsson (Swerim), Méline Gilbert-Gatty (Swerim), Björn Haase (Höganäs Sweden AB), Mikael Svensson (Uddeholms AB), Jesper Janis (Outokumpu Stainless AB), Pontus Lindberg (Owenscorning), Huiping Liu (Gränges AB)
Nyckelord: 5-7 st Slagg, LIBS, restprodukter, ståltillverkning, energieffektivisering

Förord

Projektet finansieras av Energimyndigheten, Vinnova och Formas genom det strategiska innovationsprogrammet RE:Source och genom insatser av projektparter: Gränges Sweden AB, Höganäs Sweden AB, Outokumpu Stainless AB, Owenscorning (tidigare Paroc AB), Swerim AB (tidigare Swerea KIMAB) och Uddeholms AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	3
Inledning och bakgrund	5
Genomförande	5
Resultat och diskussion.....	6
Instrumentell utveckling	6
Temperaturvariationer av slagg	7
Utvärdering vid slaggräna.....	8
Utvärdering för aluminiumindustrin	10
Utvärdering för stålindustrin.....	11
Omvärldsanalys	13
Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg	14
Hållbarhetsanalys	14
Publikationslista	15
Projektkommunikation.....	16
Referenser	16

Sammanfattning

Projektet har utvärderat och utvecklat metoder för snabb analys av slag med avsikten att den förenklade analysen skall öka möjligheterna för återanvändning av slaggen som sekundär råvara. Det är även känt att en snabbare och mer tillgänglig slaganalys kan förbättra processkontrollen vid ståltillverkning och medföra besparingar om flera kWh per smälta.

Undersökningar för analysutveckling av analysmetoder har gjorts i labbmiljö där tester gjorts i induktionsugn för att på kontrollerat sätt utvärdera temperaturens inverkan på mätresultaten. De huvudsakliga projektresultaten är att det går väl att utföra mätningar även på het slag och att analysprestandan är bibehållen jämfört med tidigare resultat på stelnad slag. Detta är positiva resultat som visar på att det finns goda möjligheter till att implementera tekniken i industri och därmed komma närmre en förståelse för inverkan av slaggens sammansättning på dess egenskaper för nya produkter.

Den utrustning som tagits fram skulle kunna kommersialiseras. För att ytterligare visa på nyttan och öka chanserna för kommersialisering skulle en långtidsstudie där slaggen s sammansättning studeras under ett flertal månader vara värdefullt.



Figur 1. LIBS-instrument installerat för kontinuerlig analys av slaggsmäta vid tappränna.

Summary

The project has evaluated and developed methods for rapid analysis of slag with the intention that the simplified analysis will increase the possibilities for reuse of the slag as a secondary raw material. It is also known that a faster and more accessible slag analysis can improve the process control in steel production and lead to savings of several kWh per melt.

Investigations for development of measurement methodology and methods for data analysis have been performed in a laboratory environment. Tests have been performed in an induction furnace to evaluate the effect of temperature on the measurement results in a controlled manner. The main project results are that it is possible to perform measurements even on hot slag and that the analysis performance is maintained compared with previous results on solidified slag. These are positive results that show that there are good opportunities to implement the technology in industry and thus come closer to an understanding of the impact of the slag composition on its properties for new products.

The equipment developed could be commercialized. To further demonstrate the benefits and increase the chances of commercialization, a long-term study where the composition of the slag would be studied for several months would be valuable.

Inledning och bakgrund

Syftet med projektet är att ta fram en snabb metod för analys av slagg. Avsikten är att detta i förlängningen skall öka möjligheterna att använda slagg som restprodukt och därigenom minska mängden avfall. Projektet tar sin utgångspunkt i den genomförda förstudien med samma namn.¹ I den studien demonstrerades potentialen att erhålla en snabb och korrekt analys av kall stelnad slagg. I det nuvarande projektet tas steget vidare mot att analysera direkt i den metallurgiska processen och en industriell implementering.

Slagg används i stålframställning både för att ge stålet dess önskade egenskaper och för att skydda det smälta stålet mot luft samt förhindra energiförluster vid smältning. När stålet har nått önskade egenskaper tappas slaggen av och efter det stelnar den och krossas och siktas till önskade fraktioner. Slaggens sammansättning varierar beroende på stålsort, men i huvudsak består den av CaO, SiO₂, MgO och ofta även FeO och Al₂O₃. Slaggen har i krossad form cementliknande egenskaper vilket gör den lämplig till flera ändamål. I dagsläget används slaggen i en mängd områden såsom, underlag vid vägbyggnad, bärlager, ridbanor, asfalt, betong, deponitäckning och gruvstabilisering. Mer läsning om slagg finns i t.ex. artikel skriven av Jernkontoret, se referens 2.

Slaggprover analyseras i dagsläget främst för att övervaka stålframställningen, men då nya användningsområden av slaggen utforskas är det även där viktigt att ha bra karaktärisering av slaggen då det kan påverka vilka användningsområden som är möjliga. Vissa framsteg har gjorts på senare år med en mer automatiserad provtagning för slagganalys. Det lämpar sig dock inte för alla slaggtyper. I dagsläget utförs slagganalysen i huvudsak som en efterkontroll efter att slaggen tappats av, men med en snabb metod som inte kräver provberedning är det möjligt att använda slagganalysen för styrning av processen för stålframställningen. Det är rimligt att tiden för stålproduktionen då kan kortas ner med någon minut vilket skulle medföra en energibesparing på ca 5-10 kWh per ton stål. Ytterligare fördelar med en förenklad metod för slagganalys är en förbättrad arbetsmiljö som minskar problem med buller och damm vid provberedning.

För att uppnå en slagganalys utan provberedning användes LIBS-tekniken (LIBS; *eng.* laser induced breakdown spectroscopy). Principen för LIBS är beskriven i den tidigare rapporten (se referens 1) och i detta projekt är metoden vidareutvecklad för att möjliggöra snabb analys direkt i, eller i direkt anslutning till, slagg-processen. Ett viktigt steg i detta är att förstå hur LIBS-signalen påverkas av att slaggen är smält (och het) jämfört med stelnad (och kall).

Genomförande

Projektet är uppdelat i 6 aktiviteter för att uppnå projektets mål.

Aktivitet 1: LIBS-system anpassades för att möjliggöra mätning i mycket heta miljöer. Både kommersiellt tillgängligt instrument (GalvaLIBS från Tecnar) samt egentillverkad utrustning har använts.

Aktivitet 2: Metoder för datautvärdering har utvecklats för kvantifiering av slaggsammansättningen, med fokus på utveckling av särskild metodik för mätning på het slagg.

Aktivitet 3: Analysmodeller har anpassats och integrerats i LIBS – systemen.

Aktivitet 4: Laborieförsök för funktionstester av LIBS-systemet och utvärderingsmodellen har genomförts genom att smälta slagg i induktionsugn på Swerim. Detta har gett tekniskt underlag för genomförande av industriförsök.

Aktivitet 5: Industriförsök med LIBS-systemet har genomförts på Paroc, Gränges samt Uddeholms. Detta har gett insikt i möjligheter och begränsningar av de olika LIBS-systemen.

Aktivitet 6: Projektmöten har genomfört, resultat har publicerats i vetenskaplig tidskrift (se referens 3), hållbarhetsanalys av projektet har genomförts.

Swerim är huvudsaklig forskningsutförare och industriparter ansvarar för materialinsamling, referensanalys, förberedande av industritester samt utvärdering av projektresultat. Swerim är delaktig i samtliga aktiviteter, och industriparter är i huvudsak involverade i aktiviteter 2 samt 4–6.

Resultat och diskussion

Projektets huvudsakliga mål var:

1. Teknik för att kunna utföra snabb, kemisk analys av slagg och liknande produkter i industriell miljö nära processen
2. Tekniskt underlag för industriellt införande av tekniken

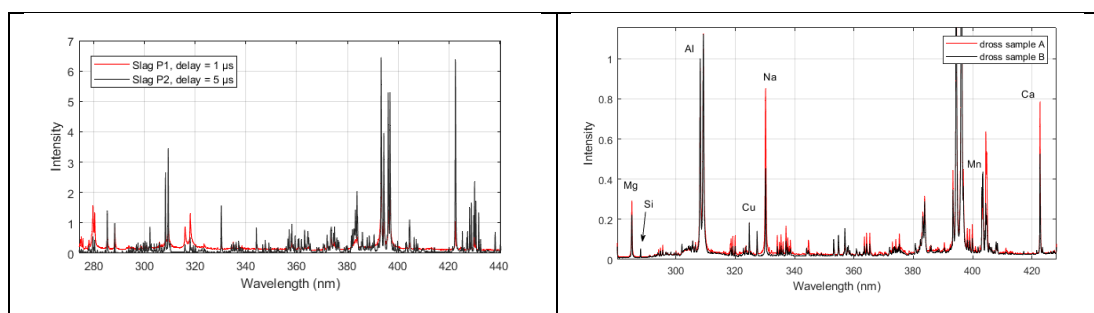
För att uppnå detta har det dels utvärderats möjligheterna att använda tillgänglig kommersiell utrustning samt även gjorts metodutveckling av utrustning som tagits fram parallellt inom annat projekt (beskrivs mer utförligt nedan). Båda metoderna har testats i relevanta miljöer hos deltagande industriparter.

Instrumentell utveckling

Projektets utgångspunkt var den labbutrustning som togs fram i förstudien SlaggLIBS. I detta uppföljande projekt, SlaggLIBS-2, har två olika utrustningar använts. Den ena är en kommersiell utrustning GalvaLIBS från Tecnar.¹⁷ Den använder ett patenterat lanssystem avsett för att analysera inne i zinksmältor. Den är alltså inte avsedd att klara de höga temperaturer som slagg smälter vid, men det är ändå en robust och unik plattform för industriella miljöer och det är därmed intressant att se om det finns möjligheter för tillämpning mot slagganalys.

För analys av slagg inom stålindustrin har ett separat instrument utvecklats. Den tekniska utvecklingen har gjorts inom projekt CONSENSO finansierat av EIT Raw Materials.⁴ Inspiration är hämtad från den utrustning som användes i SlaggLIBS men både optik och laser är av annan modell och utformning. Avsikten är att ha ett instrument som kan placeras i direkt anslutning till stålsmältan. Metoden baseras på stickprov som kan analyseras direkt vid provtagning och därmed sparar tid och resurser för provpreparering. Detta anses vara det mest rimliga sättet för att uppnå analys av slagg vid ståltillverkningen eftersom fri sikt till slaggytan saknas, eller måste ske på mycket långt avstånd. I den nuvarande utformningen sker provtagningen manuellt, men i framtida utvecklingar finns möjligheter till automatisering.

Nya material ger bra och rimliga spektra. En tydlig skillnad med den slagg som används för stenullstillverkning är att den har betydligt högre kiselhalt och är mer glansig. Det gör att det är något svårare att få bra LIBS-signaler, men ändå inte omöjligt. Spektra syns i Figur 2.



Figur 2. Spektra från nya material.

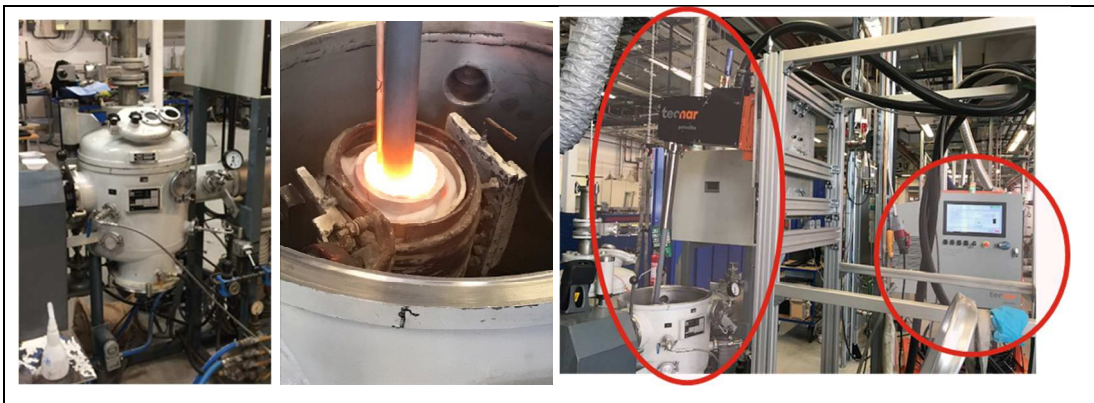
Analysen har i första hand baserats på univariat kalibrering, d.v.s. genom att välja ut lämplig våglängd i spektrumet för att läsa av intensiteten av den emissionstopp som härrör från ett specifikt element och sedan korrelera denna intensitet med den kända halten av referensmaterialet.⁵ Valet av lämplig emissionstopp beror på materialets sammansättning och konfigurationen av LIBS-uppställningen. Korrektion p.g.a. spektralt överlapp mellan olika emissionstoppar är en viktig del av modellen. Det har även observerats att den stora variationen i Mg-halt påverkar signalen på så vis att det uppstår en mättnadseffekt vid höga halter Mg.

Multivariata metoder baserade på linjär regression (MLR; multiple linear regression) och PLS (partial least squares) har utvärderats. Det fanns att i synnerhet Elastic Net, vilket är en variant av MLR där koefficienterna begränsas, kan ge bra resultat. Men förbättringen jämfört med univariat analys är endast marginell, och inte avgörande för användandet av tekniken.

Temperaturvariationer av slagg

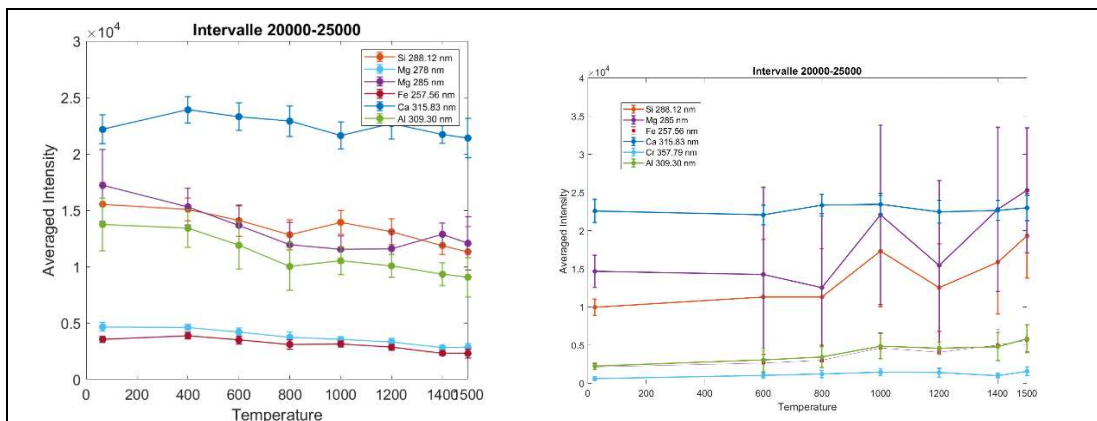
För att göra en riktig kvantitativ analys behöver utrustningen kalibreras med referensmaterial. Enklast är om detta kan göras med kalla prover, men för att avgöra det behövs temperaturberoendet studeras. För att göra detta användes en

induktionsugn för att smälta slagg under kontrollerade former, se Figur 3. Instrumentet GalvaLIBS användes för analysen.



Figur 3. Mätning i temperaturintervall 25 – 1500° C.

Resultaten av testerna med varierad temperatur gav både stigande och avtagande trender, se Figur 4. Variationerna är små i förhållande till osäkerheten i mätvärdena. I experimenten gick det inte att röra om provet eller flytta mätpunkten så det är troligt att variationerna beror mer på inhomogenitet i slaggen än ett märkbart temperaturberoende.



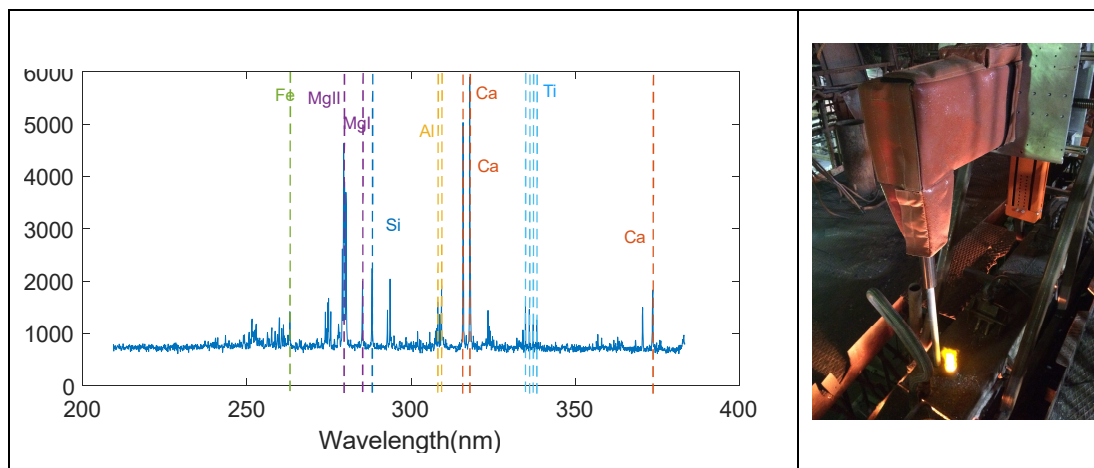
Figur 4. LIBS-signalerna vid varierad temperatur på slaggen. 2 olika slagger. Mätt med uppställning i Figur 3

Ett positivt resultat från testerna är dock att GalvaLIBS-instrumentet kan ge tydliga signaler från såväl stelnad som smält slagg. I lämplig applikation kan det alltså vara ett passande instrument att använda, vilket är avsikten med den installation som beskrivs i följande avsnitt.

Utvärdering vid slaggränna

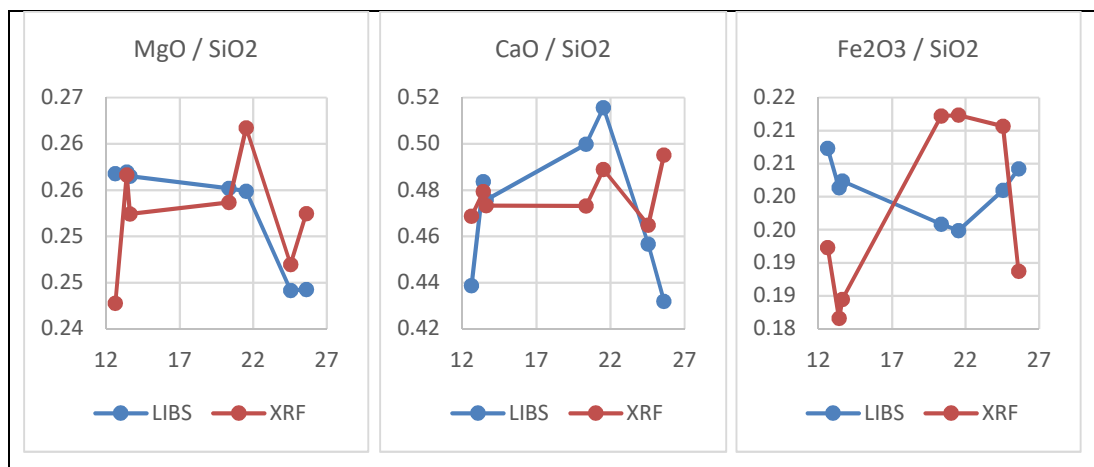
En av tillämpningarna som utvärderades i projektet är övervakning av material för tillverkning av stennull. Detta är ett slagglignande material där slagg från stålindustrin är en av de ingående komponenterna. Tillverkningen är en kontinuerlig process där

smältan rinner i en ränna och ullen spinns sedan på trummor i slutet av rännan. Instrumentet GalvaLIBS installerades vid en av rännorna



Figur 5. Analys av slagg i tappränna. Tydliga signaler från ingående beståndsdelar syns i spektrum (vänster). Utrustningen var installerad för att kunna sänkas ned i hål i rännan (höger).

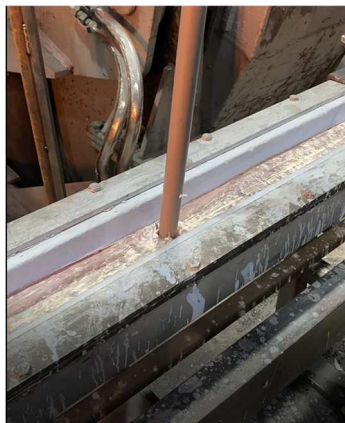
Lansmaterialet klarade inte av miljön under en längre tid, den del som var nedsänkt i smältan löstes upp. Dock så gick det ändå att erhålla tydliga signaler (se spektra i Figur 5). Jämförelsen med referensanalys syns i Figur 6. För vissa element, t.ex. MgO, erhöles god överensstämmelse men för t.ex. FeO är skillnaderna större. Större avvikelser skulle vara möjliga att detektera, såsom förväxling av material vid laddning av ugn, och resultaten visar även att utrustningen kan ge stabila mätningar under åtminstone 2 veckors drift.



Figur 6. LIBS signal jämfört med referensanalys (XRF). X-axeln anger datum (i mars månad).

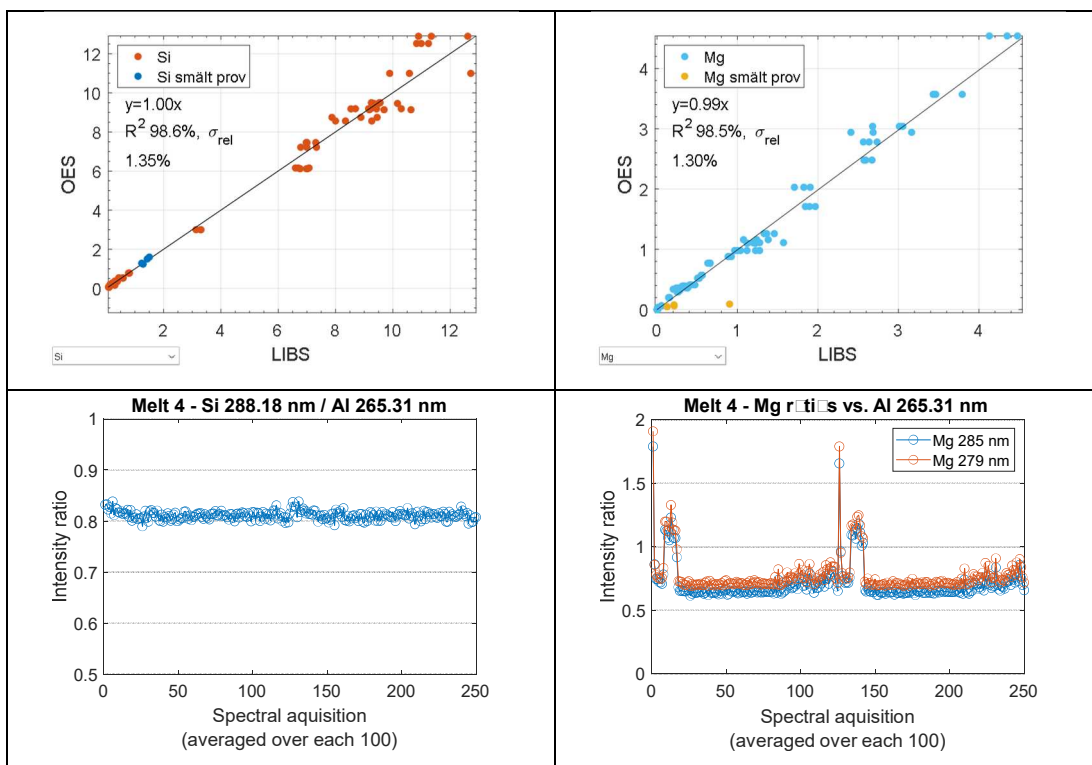
Utvärdering för aluminiumindustrin

För att utvärdera lämpligheten i utrustningen gjordes även tester vid aluminiumsmälta, som har lägre temperatur. Avsikten var att få en utvärdering av utrustningen för att jämföra med resultaten från slaggrännan (avsnittet ovan). Det är tydligt att mätningarna blir bättre, med god överensstämmelse mellan LIBS och referensanalys (spark OES). Även i detta fall installerades utrustningen vid en tappränna, se Figur 7.



Figur 7. Installation av GalvaLIBS vid tappränna för Al-gjutning.

Som syns i grafen för Mg (övre högra i Figur 8) ger dock en mätpunkt från smältan avsevärt högre värde med LIBS-analysen jämfört med referens. Om detta är ett mätfel eller en avvikelse mellan LIBS och referensanalys är för tidigt att säga med det begränsade materialet. En möjlig förklaring är att en bättre driftkorrigering behöver implementeras för att återkommande kontrollera utrustningens prestanda. Grafen för Mg signal (nedre högra i Figur 8) indikerar att det förekommer perioder med lokalt högre Mg-halt, och motsvarande variationer observerades inte för Si. Om detta kan verifieras är det ett intressant resultat som har möjlighet att förbättra slutmaterialets kvalitet.

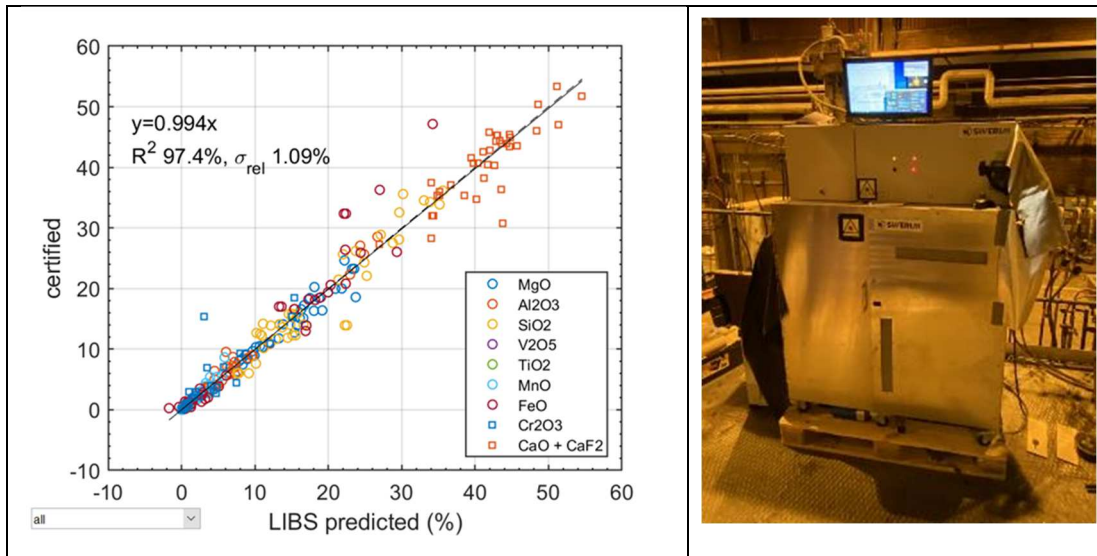


Figur 8. Övre grafer visar LIBS analys jämfört med referensanalys för referensprov och smältprov för Si och Mg. Nedre raden visar LIBS signal under hela mätperioden för smälta #4.

Utrustningen är alltså mer lämpad för de lägre temperaturerna i Al-smältor. Att analysera smältan vid smältning av skrot kan vara ett område där det finns än mer potential för energi- och materialbesparingar, och resultaten ovan visar på att det är en möjlig tillämpning.

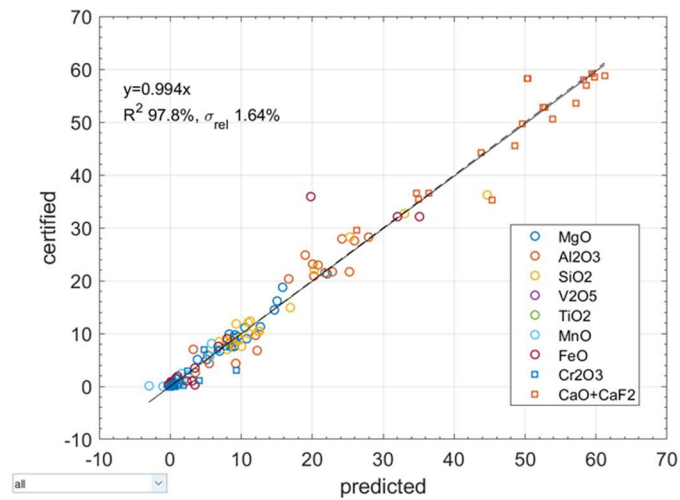
Utvärdering för stålindustrin

Liknande analytisk prestanda som vid förstudien uppnåddes med det nya instrumentet vid tester på samma referensslaggar. Korrelationsfaktor 97.4% och relativ standardavvikelse 1.1% är något bättre än tidigare resultat (97% korrelation och 1.2% relativ standardavvikelse), men inte stor nog skillnad att dra slutsatser från. Se Figur 9.



Figur 9. Analys av referensslag med LIBS-instrument framtagen för stålindustri.

Resultat från industritester på Uddeholms (Figur 10) visar att liknande prestanda går att uppnå även på heta slagger, vilket är ett nytt och mycket positivt resultat.



Figur 10. Resultat av LIBS-analys (predicted) jämfört med referensanalys (certified) för analys av heta slagger.

Det absoluta felet (skillnad mellan LIBS-analys och referens-analys) är för samtliga oxider under 3%, vilket är ett resultat som står sig väl mot standardanalys och alltså är ett användbart värde. Se Tabell 1.

Tabell 1. Mätosäkerhet för mätningar i Figur 10.

Oxid	Medelsammansättning på prov (vikt-%)	Medelvärde av absolut avvikelse (vikt-%)
MgO	10	1
SiO ₂	14	2
Al ₂ O ₃	16	2
CaO+CaF ₂	49	3
FeO	7	2
Cr ₂ O ₃	2	1
MnO	1	0.6
TiO ₂	0.1	0.05
V ₂ O ₅	0.1	0.1

Även precisionen (avvikelsen för upprepade mätningar) är god, max 2% i absolut avvikelse. Se Tabell 2.

Tabell 2. Stabilitet, kall slagg mätt under 3 dagar

Oxid	Medelsammansättning på prov (vikt-%)	Medelvärde av absolut avvikelse (vikt-%)
MgO	17.3	1.3
SiO ₂	13.4	0.5
Al ₂ O ₃	7.4	0.6
CaO+CaF ₂	36	1
FeO	22	2
Cr ₂ O ₃	0.3	0.1
MnO	2.4	0.3
TiO ₂	1.0	0.1
V ₂ O ₅	0.11	0.01

Resultaten står sig alltså väl för att vara användbara vid processkontroll för stålframställning och där möjliggöra miljömässiga fördelar i fråga om minskad energiåtgång vid förkortad processtid samt även minskad slagganvändning då tillsatsen kan optimeras bättre. När tekniken väl är installerad finns möjligheter att bättre övervaka slaggens kemi och öka förståelsen mellan slaggens sammansättning och dess egenskaper som sekundär råvara (användning av restmaterial).

Omvärldsanalys

Översikt av industriella tillämpningar av LIBS-teknologi ges i referenser 6 och 7. Applikationer för slagg i smält form finns fortfarande inte på marknaden, och under tiden för detta projekt har endast 2 forskningsartiklar rörande smält slagg publicerats, varav den ena är vår egen publikation (referens 3).

Secopta är det företag som uttalat marknadsför sig mot analys av slagg, men dock i fast krossad form.⁹ Andra industriella tillämpningar rör smält aluminium och

zink.^{8,10,11,12} Det mest intressanta företaget att följa är kanadensiska Hatch instruments som har pågående aktiviteter för att kunna analysera bulken av en metallsmälta, vilket därmed även bör lämpa sig för smält slag.^{13,14} Dock kräver den teknologin att instrumentet befinner sig nära smältan (inom 1 m).

Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Projektet har visat att det går bra att få en kvantitativ analys av slag i såväl fast som smält tillstånd. Stegen som har tagits för att möjliggöra en implementering i industrin är dels utvärdering av tillgänglig kommersiell utrustning samt utveckling av dedikerat instrument för stålindustrin.

För analys av slag vid ståltillverkning är det i dagsläget nödvändigt att ta stickprov. Miljön runt ugnarna tillåter inte utrustning att vara närmre än ca 5 meter vilket hittills inte visats rimligt för att uppnå tillräcklig analytisk noggrannhet. För att erhålla en analys av slaggen så snabbt som möjligt har det därför tagits fram metod för utrustning som kan hantera heta slagprov.

För metallurgin finns det en tydlig vinst i att få en analys tidigt i processen med de noggrannheter som demonstrerats (några %-enheters absolut avvikelse). Korrigeringar åtgärder kan då göras tidigare och på så vis spara energianvändning. Ett exempel är processen för svavelrening vid insmältning av skrot vid ljusbågsugn.

För slag som sekundär råvara är det i nuläget oklart vad vinsten kan vara eftersom det hittills är okänt hur väl det går att styra slaggsammansättningen. Metoderna som är framtagna öppnar för möjligheter att göra studier inom området.

De effektmål som listats i förstudien (SlaggLIBS) gäller därmed fortfarande. Ett införande av tekniken i industrin ger möjlighet att uppnå följande:

- Bättre användning av slaggen tack vare möjlighet till att optimera dess egenskaper.
- Minskad mängd avfall tack vare utökad möjlighet till återanvändning av slag inom nya områden.
- Förbättrad arbetsmiljö i form av minskat damm och buller vid slaganalysen.
- Minskad energianvändning med 5-10 kWh per ton stål vid on-line implementering av analysmetoden.
- Förbättrad stålqualität tack vare ökad möjlighet till processtyrning.

För att uppnå dessa krävs dock att de metoder som demonstrerats används i produktionen under en längre tid.

Hållbarhetsanalys

I projektet har det genomförts en hållbarhetsanalys. Som jämförelseobjekt i hållbarhetsanalysen används den användning av slag som sker idag med de

tillgängliga tekniker (XRF) som finns för analys av slaggen. Detta jämförs med användningsområden för slagg som analyserats direkt i slaggflödet.

Främsta påverkan på livscykel som har identifierats är användningen med avseende på miljömässig hållbarhet. Den sammanfattas med att

- Det finns stor potential till förbättrad miljömässig hållbarhet, men det är i dagsläget oklart hur mycket den förbättrade analysen kan bidra till ökad användning av slagg som sekundär råvara
- En fallgrop att undvika är att inte en ny användning av slaggen medför ökad energianvändning vid t.ex. transporter som överstiger nyttan.

En ytterligare synpunkt avseende användning av restmaterial för nya ändamål är de tillståndsprövningar som krävs kan vara hinder för nyttjandet av slaggen. Där finns möjlighet att en kontinuerlig analys kan bidra till att säkerställa att materialet uppfyller de krav som ställs.

Hanteringen av hållbarhetsaspekter sammanfattas i tabell nedan.

	Hållbarhetsaspekt	Beskrivning av hur projektet ska hantera hållbarhetsaspekten
Positiva hållbarhetsaspekter	Styrning av slagg-sammansättningen	Se till att styrningen inte enbart minimerar mängden tillsatsmedel vid metallframställningen utan även möjliggör användningen av slaggen
	Förenklad hantering	Följer av byte av mätteknik, behöver ej beaktas ur hållbarhetsperspektiv
	Möjlighet till återanvändning	Ta kontakt med användare av slagg för att säkerställa att styrningen av slaggsammansättning medför de egenskaper som krävs
Risker	Transporter	Sekundär användning av slagg bör ske på en plats så pass nära uppkomsten av slaggen att transportutsläpp inte överskuggar miljönyttan i användningen
	Energianvändning	Sekundär användning av slagg bör ske på ett sådant sätt att energianvändningen för att bearbeta slaggen till det nya användningsområdet inte överskuggar miljönyttan i användningen

Publikationslista

Projektresultat har publicerats i vetenskaplig publikation, referens 3. Fokus för publikationen var att visa på möjligheterna av analys av stelnad slagg

Projektkommunikation

Projektresultat har spridits via flera kanaler. Den viktigaste är Jernkontoret där projektet presenteras inom (TO 23 Metallurgi, TO 45 Analytisk Kemi, TO 55 Restprodukter).

Presentation av projektresultat har även framförts på följande konferenser:

CETAS (21/5 – 23/5 2019, Düsseldorf, Tyskland), muntlig presentation: *On-line analysis of molten slag using laser-induced breakdown spectroscopy*

EMS LIBS (8/9 – 13/9 2019, Brno, Tjeckien), poster presentation: *On-line analysis of molten slag using Laserinduced breakdown spectroscopy*

ESTAD (30/8 – 2/9 2021, Stockholm, Sverige), muntlig presentation: *Rapid chemical analysis of molten slag and metal at the production*

Referenser

1. J. Petersson, A. Bengtsson, B. Haase, G. Ruist, A. Norberg. Projektrapport inom innovationsprogrammet RE:Source, Utökad användning av slagg genom online övervakning av slaggprocesser, Projektnummer 44320-1, 2018, <https://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=25591>
2. Stålindustrin gör mer än stål - Handbok för restprodukter, Jernkontoret, Juni 2018, ISBN 978-91-982397-1-3, <https://www.jernkontoret.se/globalassets/publicerat/handbocker/handbok-for-restprodukter-2018.pdf> Se även Jernkontorets websida (hämtad 2022-06-15): Slagg, en mycket användbar restprodukt <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/restprodukter/slagg/>
3. J. Petersson, M. Gilbert-Gatty, A. Bengtson, Rapid chemical analysis of steel slag by laser-induced breakdown spectroscopy for near-the-line applications, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2020**, 35, 1848-1858
4. <https://eitrawmaterials.eu/project/consenso/>, <https://www.swerim.se/en/consenso>
5. A. Bengtsson, Laser Induced Breakdown Spectroscopy compared with conventional plasma optical emission techniques for the analysis of metals – A review of applications and analytical performance, *Spectrochimica Acta Part B* **2017**, 134, 123–132
6. A. K. Myakalwar, C. Sandoval, M. Velásquez, D. Sbarbaro, B. Sepúlveda, J. Yáñez, LIBS as a Spectral Sensor for Monitoring Metallic Molten Phase in Metallurgical Applications—A Review, *Minerals* **2021**, 11, 1073

7. J. D. Pedarnig, S. Trautner, S. Grünberger, N. Giannakaris, S. Eschlböck-Fuchs, J. Hofstadler, Review of Element Analysis of Industrial Materials by In-Line Laser—Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) *Appl. Sci.* **2021**, 11, 9274
8. Energy Research Company - LIBS for Melt Diagnostics, <https://er-co.com/libs-melt.html> (hämtad 2022-06-17)
9. Secopta – Analysis of Solid Slag Samples, <https://www.secopta.com/applications/solid-slag-samples> (hämtad 2022-06-17)
10. Tecnar – GalvaLIBS, <https://galvalibs.tecnar.com/the-product/> (hämtad 2022-06-17)
11. DTE – LP-LIBS, <https://dte.ai/our-technology/> (hämtad 2022-06-17)
12. S. H. Gudmundsson, J. Matthiasson, B. M. Björnsson, H. Gudmundsson, K. Leosson, Quantitative in-situ analysis of impurity elements in primary aluminum processing using laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part B* **2019**, 158, 105646
13. Hatch – PyroLIBS, <https://www.hatch.com/Expertise/Services-and-Technologies/Steelmaking-Technologies> (hämtad 2022-06-17)
14. B. Shahriari, S. Ge, M. Sukhram, A. Moreau, T. Vaillancourt, Development of the PyroLIBS sensor: direct and real-time measurement of molten material composition, Conference paper ESTAD **2021**, <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=e06202dd-3a51-4e8a-b315-8a1bef0e6dec>