

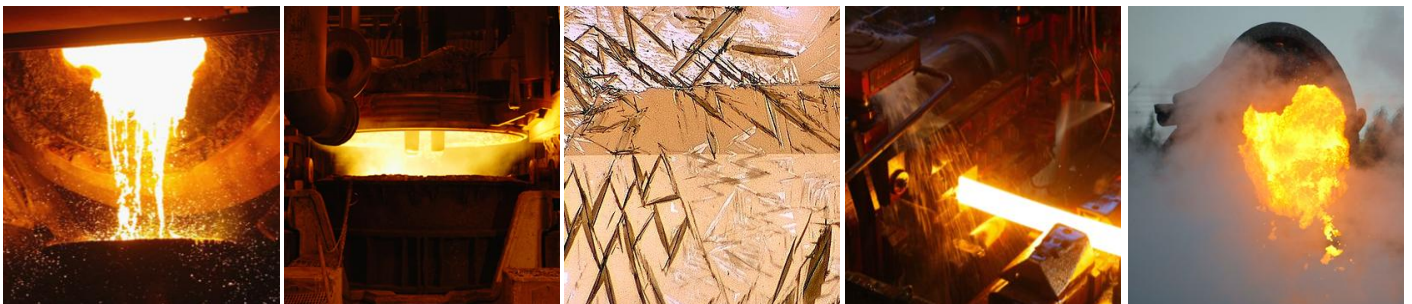
Oförstörande bestämning av mikrostruktur, härdjup och inre spänningar

Björn Sjögren, Swerea MEFOS AB

Martin Engman och Magnus Falkenström, Swerea KIMAB AB

Tadeusz Stepinski, Uppsala Universitet, Signaler och System

Slutrapport 44030, utgiven 2012-01-30



Sammanfattning

Det här projektet, inom området oförstörande provning och mätteknik, visar hur man genom användandet av nya metoder och ny teknik kan undersöka och bestämma ett materials mekaniska egenskaper och mikrostruktur. Målet har varit att online kunna bestämma ett materials egenskaper som mikrostruktur, inre spänningar, hårdhet och härddjup och därigenom kunna undvika traditionella kostsamma och tidsödande provningsförfaranden och på så sätt kunna minska kostsam skrotning och sekundaklassning.

Projektet har en hög innovativ nivå och innefattar utvärdering av det senaste inom oförstörande materialundersökning med ultraljud och elektromagnetiska metoder där avancerad signalanalys är det gemensamma området. Projektet har visat att dessa nya metoder klarar av att bestämma ett materials eller detaljs mekaniska egenskaper oförstörande och att dessa mätmetoder har en klar plats i dagens industri.

Uppsala Universitet har arbetat med Resonant Ultraljudspektroskopi, RUS som är en metod som utnyttjar ultraljudets resonanser i en väldefinierad provkropp, för att bestämma dess materialegenskaper som mikrostruktur och hårdhet.

Swerea KIMAB har använt sig av Laserinducerat Ultraljud, LUS för bestämning materialegenskaper utifrån ultraljudets beteende, bl.a. variationer i ljudhastighet och dämpning i olika material och utifrån detta försökt bestämma materialegenskaper som hårdhet och sträckgräns.

Swerea MEFOS har arbetat med elektromagnetiska mätmetoder framför allt virvelström, Barkhausenbrus och med hjälp av ett kombinationsinstrument tagit fram mikromagnetiska egenskaper för att bestämma materialegenskaper som inre spänningar, hårdhetsvariationer och sträckgräns.

Fullskaleförsök i industriell skala med Laserinducerat Ultraljud har utförts hos SSAB EMEA Borlänge.

Projektet ingår i Strategiskt stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012, finansierat av VINNOVA och Jernkontoret.

Nyckelord:

Mikrostruktur, inre spänningar, provning, hårdhet, stål, ultraljud, forskning, laser

Key words:

Micro structure, internal stress, testing, hardness, steel, ultra sonic, laser, research

Summary

This project, in the area of non destructive testing and measuring technology, shows how it is possible, by utilizing new methods and new technology, to inspect and determine the mechanical properties and micro structure of a material. The goal has been to be able to online determine the material properties like microstructure, inner stress and hardness penetration in a material and to avoid the traditional laborious and costly testing procedures and thereby limit costly scrapping and degrading.

The project has a high innovative level and includes evaluation of the latest in materials inspection using ultrasonic and electromagnetic methods, where the common area is advanced signal analysis. The project has shown that these new methods can determine the mechanical properties of a material or a machine detail, non destructively, and that these measuring techniques has a clear place in the industry of today.

The University of Uppsala has worked with Resonant Ultrasonic Spectroscopy, RUS, a method that uses the resonances of ultrasound in a well defined testing body, for determining its material properties like microstructure and hardness.

Swerea KIMAB has used Laser induced Ultrasound, LUS. This was done to determine material properties using the ultrasonic behaviour, for example the variations in sound velocity and damping, to determining the material properties like hardness and tensile strength.

Swerea MEFOS has worked with electromagnetic testing methods primarily eddy current and Barkhausen noise measurements, and by using combination instrument measuring the micro magnetic properties to determine variations in inner stress and hardness.

Full scale industrial trials regarding Laser Induced Ultrasound were made at SSAB EMEA Borlänge.

The project belongs to Strategic Steel Research Programme for Sweden 207-2012 funded by VINNOVA and Jernkontoret.

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	3
1 INLEDNING.....	5
1.1 State of the art.....	6
1.2 Nuläge.....	7
2 MÅL.....	8
2.1 Swerea KIMAB.....	8
2.2 Uppsala Universitet.....	8
2.3 Swerea MEFOS.....	8
3 METOD.....	10
3.1 Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB.....	10
3.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet.....	11
3.3 Elektromagnetiska mätmetoder, Swerea MEFOS.....	12
4 FORSKNINGRESULTAT.....	14
4.1 Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB.....	14
4.1.1 Utveckling av mjukvara och signalanalys för LUS.....	14
4.1.1.1 Programvara.....	14
4.1.1.2 Repeterbarhet för LUS-mätningar, problem med icke konsekventa resultat	15
4.1.2 Försök.....	17
4.1.3 Värmebehandlat bainitiskt stål.....	17
4.1.3.1 LUS analys.....	20
4.1.4 Undersökning av värmebehandlat martensitiskt stål.....	22
4.1.4.1 LUS analys.....	23
4.1.5 Undersökning av produktionsmaterial av bainitiskt stål.....	24
4.1.5.1 Mekanisk provning.....	24
4.1.5.2 Metallografiska undersökningar av bainitiska prover.....	26
4.1.5.3 LUS analys.....	26
4.1.6 Industriell installation.....	29
4.1.7 Onlinemätning i formatsträcka 3, SSAB EMEA Borlänge.....	31
4.1.8 Resultat och diskussion onlinemätning.....	34
4.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet.....	35
4.2.1 Hårdhet för stålringar, SKF.....	35
4.2.2 Hårdhet för Hardox stål, SSAB EMEA Oxelösund.....	36
4.2.3 σ -fas innehåll i rostfritt stål, Sandvik Materials Technology.....	38
4.2.4 Bainitinnnehåll, Ovako Hällefors.....	38
4.3 Swerea MEFOS, elektromagnetiska mätmetoder.....	39
4.3.1 Bestämning av inre spänningar för 8mm tjockt varmvalsat band.....	39
4.3.1.1 Kalibrering av MikroMach för bestämning av inre spänningar.....	39

4.3.1.2	Uppmätning av inre spänningar varmvalsat stål 700 MPa, 8 mm	41
4.3.1.3	Resultat oglödgd jämfört med glödgd plåt	41
4.3.1.4	Utvärdering av mätningar inre spänningar	43
4.3.2	Mätningar på sätthärdade stålkuleblästrade kugghjul	43
4.3.2.1	Kalibrering av MikroMach för stålkuleblästrade kugghjul	44
4.3.2.2	Mätningar och mätresultat	45
4.3.2.3	Mätresultat ytfinhet	46
4.3.2.4	Utvärdering av mätningar på stålkuleblästrade kugghjul	46
4.3.2.5	Regressionsanalys, kalibrering mot utmattningsgräns.....	46
4.3.2.6	Verifiering av regressionsanalys.....	48
4.3.2.7	Utvärdering av mätningar på stålkuleblästrade kugghjul	49
4.3.3	Ändeffekter, hållfasthetsvariation i ändar på varmvalsade coils.....	50
4.3.3.1	Kalibrering för sträckgräns och brottgräns	50
4.3.3.2	Mätningar och mätresultat	50
4.3.3.3	Utvärdering av mätningar ändeffekter	53
4.4	Industrins insatser för projekten	53
5	SLUTSATS OCH DISKUSSION	55
5.1	Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB.....	55
5.1.1	Industriell tillämpning	55
5.2	Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet.....	55
5.3	Elektromagnetiska mätmetoder MikroMach, Swerea MEFOS,.....	56
5.3.1	Kalibrering av MikroMach.....	56
5.3.2	MikroMach för bestämning av inre spänningar	57
5.3.3	MikroMach för bestämning av utmattningsgräns	57
5.3.4	MikroMach undersökning av ändeffekter varmvalsade coils	57
5.4	Sammanfattande resultat, jämförelse med satta mål	57
6	FÖRSLAG PÅ FORTSATT FORSKNINGSINSATSER OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER	59
6.1	Laserinducerat Ultraljud (LUS).....	59
6.2	Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT.....	59
6.3	Elektromagnetiska mätmetoder	60
7	REFERENSER.....	61
Bilaga 1	Projektorganisation och deltagare	
Bilaga 2	Publikationer	
Bilaga 3	Annan kunskapsöverföring	
Bilaga 4	Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012	

1 INLEDNING

Projektet ingår i VINNOVA:s och Jernkontorets Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007 – 2012.

En fungerande onlineapplikation för mätning av mikrostruktur, fasandelar och inre egenskaper har potential att användas för kvalitetskontroll och processtyrning. Möjligheten att övervaka och styra framställningsprocessen utifrån stålets aktuella mikrostruktur skulle innebära stora konkurrensfördelar och bland annat resultera i:

- Minskade kassationer och minskat behov av ombehandling och i många fall ombeställning när avvikelser upptäcks tidigt i processen och det är möjligt att vidta korrigerande åtgärder.
- Jämnare egenskaper när framställningsprocessen övervakas kontinuerligt och kan anpassas till individuella band.
- Möjligheter att utveckla nya stålsorter som kräver snäva processfönster som är svåra att åstadkomma med dagens styrsystem.
- Minskat behov av att verifiera egenskaper i slutprodukten genom traditionell provning, t.ex. dragprovning.

Ett känt problem vid riktning av plåt och grovplåt är att plåten kan riktas plan, men när kunden senare klipper eller skär i plåten så utlöses kraftiga inre spänningar så att plåten måste riktas om innan den kan användas och i vissa fall kasseras p.g.a. den kraftiga formförändringen. Vid laserskärning händer det att de inre spänningarna är så kraftiga att t.o.m. skärutrustningen skadas. Att in-line kunna mäta upp restspänningar innebär nya möjligheter att se om en plåt har riktats på ett tillfredställande sätt. Genom att i förväg mäta upp plåtens inre spänningar före riktning skulle man kunna få en möjlighet att med utgångspunkt från denna mätning kunna ställa in riktverket. Möjligheten att mäta upp spänningstillståndet hos plåt kan medföra:

- Färre omriktningar i senare led.
- Färre störningar vid laserskärning av plåt p.g.a. oplanhet.
- Förbättrade utbyten.
- Ökad förståelse för riktningsprocessen.
- Färre reklamationer/kassationer.

Att bestämma t.ex. variationer i hårdhet på en maskindel görs vanligtvis genom att hårdhetsprova detaljen på de ytor som är intressanta för applikationen. Den detalj som provats kan ej användas som en fungerande maskindel eftersom provningen mekaniskt skadar detaljen, vid viss provning måste detaljen t.o.m. kapas sönder för att kunna undersökas tillräckligt noggrant. Genom att göra stickprov, d.v.s. undersöka ett antal detaljer som behandlats på samma sätt, kan man anta att de som producerats under samma betingelser, en batch, har de uppmätta detaljernas egenskaper. Det innebär att en viss andel av de producerade detaljerna blir skrotade till följd av provningen och om man upptäcker avvikande detaljer i en batch måste man kassera alla detaljer från den batchen.

Att kunna mäta upp egenskapsvariationer på en detalj utan mekanisk påverkan kan innebära:

- I stället för stickprov kan alla detaljer testas.
- Alla provade och godkända detaljer kan användas.
- Om en detalj i en batch underkänns behöver inte hela batchen kasseras.
- Bättre utbyten.
- Bättre leveranssäkerhet.
- Enklare logistik.

Möjligheten att avgöra hårdhet och härddjup på plåt och maskindelar utan förstörande provtagning, d.v.s. att skära ut provbitar av materialet, är idag rätt så begränsade. Om man med en oförstörande mätmetod snabbt kan uttala sig om detta så skulle den förstörande provtagningen kunna inskränkas och hanteringen av härdade detaljer och plåtar avsevärt förenklas. En oförstörande mätmetod för att bestämma härddjup kan medföra:

- Snabbare återkoppling till härdningsprocessen.
- Kortare ledtider.
- Bättre utbyten.

1.1 State of the art

Kännetecknande för bestämning av inre egenskaper, fasandelar, kornstorlekar och ythårdhet, har varit och är att det krävs provuttag, provpreparering och olika mikroskopiska undersökningar där metoderna genomgående är förstörande. Detta innebär förutom att provningen är tidsödande så är proven enbart stickprov. Själva provobjektet blir dessutom alltid på ett eller annat sätt förstört för att få fram tillräcklig information om egenskaperna, med något enstaka undantag.

Några projekt som genomförts är RFCS-projektet: 7210-PR/248, ”Non-destructive evaluation (NDE) of quality characteristics of heavy plates”, och projektet JK44095/99, ”Oförstörande bedömning av materialegenskaper” inom Jernkontoret.

Dessa projekt har påvisat möjligheterna att bestämma materialegenskaper, men man har oftast endast lyckats visa att skillnader finns i mätresultaten som kan härledas till provens olika egenskaper. Trots att mätmetoderna påvisar materialens olika egenskaper har man dock försökt att dra avancerade slutsatser och koppla mätresultaten direkt till sådana parametrar som sträckgräns, brottgräns och förlängning, när man snarast skulle ha kopplat dem till, kornstorlekar, fasandelar och ev. inre spänningar.

En del grundarbete utfördes i det ovan nämnda projektet (JK44095/99) inom Jernkontorets teknikområde 44, Oförstörande provning och mätteknik, där man även kom fram till liknande resultat som i RFCS-projektet.

De tre olika delarna i det här projektet kan ses som ett sätt att både koppla samman olika mätmetoder och att gå djupare in i vilka egenskaper som är möjliga att detektera med ultraljud respektive elektromagnetiska provmetoder utan att enbart titta på t.ex. sträckgräns, brottgräns och förlängning utan i stället se på vilka egenskaper som kan identifieras med provmetoderna.

1.2 Nuläge

Bestämning av fasandelar och struktur på valsade band är en förstörande metod. Förutom att det tar tid att göra själva utvärderingen, så tar det tid för bandet att svalna innan man kan göra provutttaget. Själva provutttaget och provberedningen tar tid och slutligen blir det ändå bara ett stickprov. Man kan inte med säkerhet uttala sig om hela bandets egenskaper utifrån detta utan en viss osäkerhet finns alltid eftersom förutsättningarna vid t.ex. varmvalsning varierar under bandets tillverkning och från band till band. Tiden för ett strukturprov är minst några timmar, om man hanterar bandet utanför normala rutiner, vilket gör detta nära nog irrelevant för processtyrning. Med normala svalnings- och hanteringstider så kommer inte ett strukturprov fram förrän efter några dagar. En onlinemätning kan användas för att styra egenskaperna kanske inte inom det band som man mäter på, men åtminstone för efterföljande band, plus att man direkt vet om banden uppfyller det strukturkrav som ställs på dem.

För att kvalitetssäkra hårdprocessen för ringar och rullelement i rullningslager krävs idag att man utför förstörande provning. Det innebär att man efter uttag av ett statistiskt underlag kan uttala sig om en batch ska betraktas som godkänd eller ej. Konventionell ultraljudprovning och elektromagnetisk provning var för sig kan inte ge de resultat som krävs och som kan erhållas genom förstörande provning.

I dagsläget används konventionell ultraljudprovning till framför allt detektering av inhomogeniteter såsom inneslutningar, porer och sprickor i framför allt svetsförband och basmaterial medan elektromagnetiska metoder såsom virvelström (EC) kan hitta ytliga fel/inhomogeniteter. För att bestämma hårdhet, fasandelar, kornstorlekar och inre spänning krävs olika former av mer eller mindre förstörande provning.

Vid kulbombning/blästring av detaljer finns det idag endast indirekta och förstörande metoder för verifiering av kulbombningseffekten på den faktiska detaljen. All verifiering är indirekt genom mätning av intensitet och täckning/träffbild på provplattor m.m.. Detta innebär i praktiken att kulbombningsprocessen genomförs ”i blindo”, vilket innebär att den tid det tar att få svar på effekten av kulbombning kan mätas i dagar och upp till veckor.

Generellt kan sägas att med dagens konventionella mätmetoder för bestämning av de ovan nämnda egenskaperna tar det från dagar till veckor för att få ut relevanta provresultat. Det innebär också att provdetaljerna utsätts för förstörande provning vilket medför försämrade utbyten.

Stickprov innebär generellt att om ett prov visar sig vara utanför de accepterade toleranserna så kasseras hela batcher där kanske majoriteten av detaljerna i själva verket ändå kan vara innanför toleranserna.

2 MÅL

Projektets mål har innefattat:

Att beskriva och verifiera en fungerande onlinemetod för bestämning av fasandelar/mekaniska egenskaper på varmvalsade band direkt i eller efter varmvalsverket.

Att beskriva och verifiera metoder för bestämning av materialegenskaper mätbara med ultraljudprovning.

Att beskriva en praktisk metod för verifiering av att adekvat kulblästring utförts på kugghjul finns beskriven.

Att beskriva och verifiera en praktisk mätmetod för mätning av hårdhet och härddjup för härdad grovplåt.

Att beskriva och verifiera metoder för kartläggning av inre spänningar på tjock formatplåt och grovplåt.

2.1 Swerea KIMAB

Swerea KIMAB AB:s del av projektet, som behandlar användandet av laserinducerat ultraljud, har avsett att utreda möjligheten att i första hand bestämma materialegenskaper såsom sträckgräns, men även försöka kvantifiera fasandelar online under varmvalsning, i efterföljande processer och ev. under glödgning av kallvalsade band. Programmet omfattar material med intresse för projektets industriintressenter och inkluderar bl.a. kolstål med komplexa strukturblandningar av ferrit, bainit och martensit.

Laboratieförsök skulle utföras med syfta att fastställa relationer mellan ultraljudspektrets direkta dämpning, ljudutbredningshastighet och förekommande strukturbeståndsdelar, så att strukturen/egenskaperna i aktuella stål kan kvantifieras utgående från ultraljudsignalen med tillfredsställande noggrannhet och reproducerbarhet.

Onlineförsök skulle genomföras för att verifiera framtagna samband och för att utreda hur resultaten påverkas av den industriella miljön.

2.2 Uppsala Universitet

Uppsala Universitets del av projektet som arbetar med laboratieförsök har syftat till att fastställa relationer mellan ultraljudspektra och förekommande strukturbeståndsdelar och egenskaper, ex variationer i hårdhet och förekomsten av små fasandelar, så att strukturen i aktuella stål kan kvantifieras från ett uppmätt ultraljudspektrum med tillfredsställande noggrannhet och reproducerbarhet.

Industriella försök skulle genomföras för att verifiera framtagna samband och för att utreda hur resultaten påverkas av den industriella miljön och för att avgöra möjligheten att skapa en permanent utrustning för kontinuerlig mätning in-line.

2.3 Swerea MEFOS

Swerea MEFOS skulle i projektet undersöka möjligheterna att kvantifiera variationer i ythårdhet på maskindelar, genom att använda ett helt nytt elektromagnetiskt mätinstrument

från QNET, ett dotterbolag till Fraunhoferinstitutet i Tyskland, som heter Mobiler Magnetischer Mikrogefügeprüfer, kallat 3M eller MikroMach. I detta fall skulle kugghjul som sätthårdats och behandlats med s.k. shot-peening undersökas.

För att kvantifiera hårdhets- och spänningsvariationer på plåt, skulle laboratorieförsök hos Swerea MEFOS utföras. I dessa ingick att undersöka huruvida det är möjligt att med Barkhausen-brus-teknik och med MikroMach utrustningen att avgöra hårdhetsskillnader över ytan och spänningsskillnader både över ytan på tunnplåt och grovplåt. Försök för att mäta variationer i inre spänningar skulle utföras på prover som spänns in och utsätts för varierande tryck och dragspänningar.

Försök på plåt som grovriktats och sedan avspänningsglödats skulle utföras för verifiering av laboratorieresultaten.

Den effekt som detta projekt kan tänkas ha på arbetsmiljö och yttre miljö kan endast vara positiv. Genom automatiserad kontaktlös mätning av materialegenskaper kan manuella provuttag minskas avsevärt och därigenom minskas tung hanteringen av material och därigenom även tunga lyft vid hantering av tunga materialprover. Tidskrävande och kostsamma materialundersökningar kan undvikas om man med oförstörande provmetoder kan bestämma ett materials egenskaper. Detta betyder att projektet både i sina respektive delprojekt såväl i sin helhet även bidrar till minskade kassationer, ombeställningar och sekundaklassningar vilket i sin tur medför såväl ökad produktivitet, ökade utbyten som minskad energiåtgång inom svensk stålindustri.

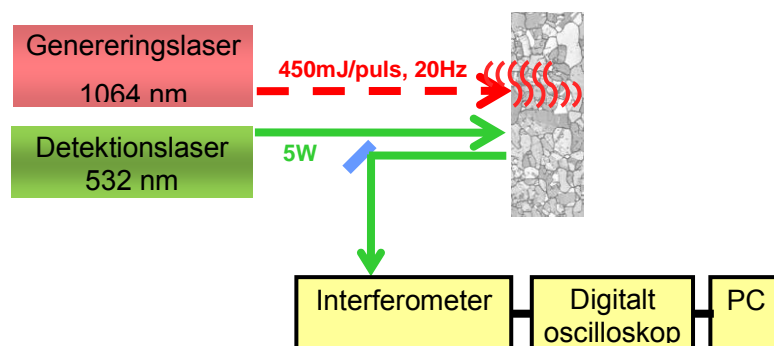
Detta projekt innebär förutom de tydliga fördelarna för de företag och processer som behandlas, även fördelar för de samarbetande utförarna, Swerea KIMAB, Swerea MEFOS och Uppsala Universitet. Arbete med den senaste och nyaste tekniken medför dessutom att projektet ger ökad förståelse och spridning av kunskap om avancerad signalanalys och om de i projektet använda mät och provmetoderna, såväl elektromagnetisk som ultraljudprovning. De mätmetoder som används är, även om elektromagnetiska och ultraljudmätmetoder kan anses som välkända, relativt nya inom respektive område. Det är därför värdefullt med ingående undersökningar av dessa metoders möjligheter.

3 METOD

3.1 Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB

Genomförda undersökningar har beskrivits utförligare i den tekniska rapporten TO44-30 (Bilaga 2).

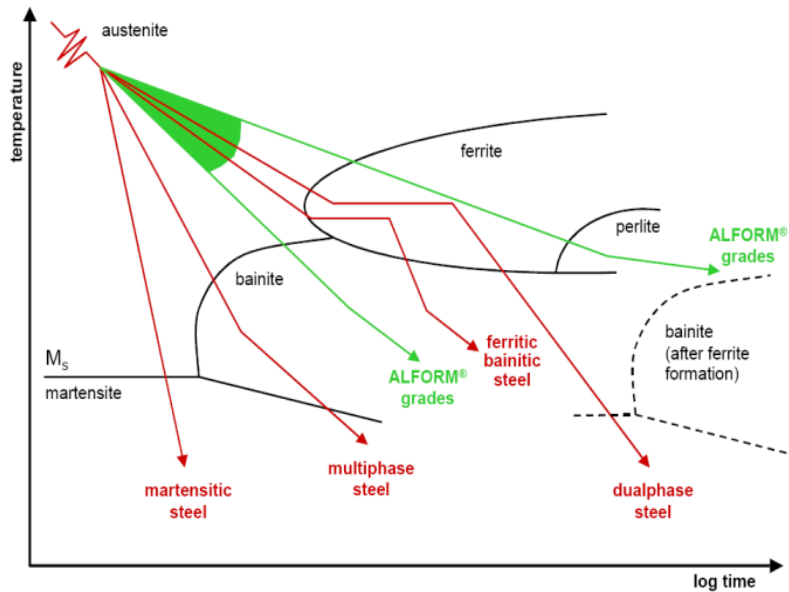
Swerea KIMAB fokuserade på sitt system för Laserultraljud (LUS), Figur 1. Det är en teknik för mikrostrukturkaraktärisering som är möjlig att tillämpa i onlineapplikationer. Swerea KIMAB investerade redan 2001 i en egen utrustning och har sedan dess byggt upp kompetens inom detta område. Tekniken är baserad på ultraljud som genereras och detekteras med laser vilket tillåter kontaktlös och snabba mätning vid höga temperaturer och på rörliga ytor.



Figur 1. Schematisk bild över LUS-systemet som finns hos Swerea KIMAB. Bilden visar systemet i reflektionsmod vilket innebär att generering och detektering sker på samma sida om provet

Detta ger möjligheter att göra kontinuerliga mätningar längs hela band och tekniken har således potential att användas för kvalitetskontroll och processtyrning online under industriella förhållanden, t.ex. vid valsning eller glödning. En ultraljudsvåg kan penetrera flera cm i metaller och dess utbredning och dämpning är relaterad till olika materialegenskaper såsom kornstorlek, rekristallisation, textur och fassammansättning. Genom att kontinuerligt kvantifiera hur ultraljudsvågor fortplantas i ett band under dess tillverkning, är det således möjligt att i realtid få information om stålets aktuella tillstånd.

Stålets egenskaper i sluttillstånd beror på dess mikrostruktur, som i sin tur utvecklas genom hela framställningsprocessen. För t.ex. höghållfasta stål med komplexa strukturblandningar av ferrit, bainit och martensit är temperaturförloppet under kylning efter varmvalsning eller efter glödning av kallvalsade band avgörande för vilken struktur och således vilka egenskaper stålet ska få. Figur 2 visar schematiskt hur olika kylförlopp kan resultera i olika strukturer för ett och samma stål. Genom att kyla kontrollerat är det således möjligt att uppnå ett stort spektrum av egenskaper under förutsättning att det är möjligt att styra processen. Eftersträvat processfönster kan dock vara väldigt litet och påverkas dessutom av stålets aktuella kemiska sammansättning. Att kvantifiera olika fasandelar in-situ under produktion skulle ge nya möjligheter att kontrollera framställningsprocessen på ett tillförlitligt sätt.



Figur 2. Schematiskt TTT-diagram som visar struktur tillstånd efter olika kylförlopp [Spindler et al]

Genom att identifiera variationer i materialets struktur, och därmed materialets grundläggande egenskaper, så tidigt som möjligt i tillverkningsprocessen, kan man återföra detta till tidigare processteg och därigenom minska riskerna för kassationer. Man kan även minska ledtider då man slipper vänta på resultat från tidsödande och kostsamma fullskaleförsök.

Dessa undersökningar riktades främst mot SSAB EMEA, Borlänge och Oxelösund. För att kunna utföra laborieförsök hos Swerea KIMAB, har SSAB EMEA Borlänge och SSAB EMEA Oxelösund bidragit med provuttag, provtillverkning och karakteriserande förstörande provning. On-lineförsök har genomförts hos SSAB EMEA Borlänge.

3.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet

Utförligare beskrivningar finns i de tekniska rapporterna TO44-34 (RUS) och TO44-35 (EMAT) samt i publikationerna 1-3 (Bilaga 2).

Uppsala Universitet, Avdelningen för Signaler och System har arbetat med en oförstörande teknik som bygger på detektering av mekaniska resonanser i ett provobjekt inom ultraljudområdet, känt under namnet resonant ultraljudspektroskopi (RUS). I ett bredband resonansspektroskopi-test exciterar man vibrationer i provobjektet med en speciellt konstruerad ultraljudprobe (sändare) och samtidigt känner man av objektets frekvenssvar med en annan probe (mottagare). Informationen om resonansfrekvenser detekterade i ett visst frekvensband inom objektet används sedan för att uppskatta materialets egenskaper eller för att detektera defekter.

Resonansfrekvenser bestäms av olika vibrationsmoder som i sin tur definieras av materialkonstanter. I ett RUS test kan man erhålla en fullständig information om objektet, dvs. den information som kan fås vid ultraljudprovning i olika konfigurationer med olika vågtyper. Med denna teknik utför man ett globalt test, dvs. man behöver inte skanna av med probar för att samla full information om objektet, vilket är en viktig fördel med denna metod. Den globala mätningen av objektet utgör samtidigt en begränsning av tekniken i och med att

variationer i för applikationen irrelevanta parametrar, såsom t.ex. dimensioner, inverkar på frekvenssvaret.

Ett globalt RUS test har nackdelen att dess resultat också beror på ett antal för test irrelevanta parametrar, sådana som provgeometri, temperatur, m.m.. Inverkan av dessa parametrar kan man dock minimera genom att förbereda materialprover med en fixerad geometri och genom att stabilisera eller mäta temperaturen. Med hjälp av signalanalys kan man dessutom bestämma vilka signaler som beror på provets geometri e.t.c.. Dessutom finns det en speciell programvara som används för att extrahera önskad information och minska inverkan av irrelevanta parametrar.

Olika typer av testinstrument är kommersiellt tillgängliga från Magnaflux Quasar Systems i USA. En lämplig provutrustning har också utvecklats på Signaler och System vid Uppsala Universitet, för karaktärisering av kopparmaterialet för SKBs kopparkanistrar. Denna utrustning har använts inom projektet.

RUS är en indirekt teknik och den bör kalibreras med experimentella data för att bestämma korrelation mellan de uppmätta spektrala parametrarna och de för slutanvändaren relevanta materialegenskaperna. I Uppsala har man utvecklat en modell som relaterar de spektrala parametrarna till materialkonstanter. Denna modell har använts för att understödja korrelationsanalysen.

Att kunna detektera ex intermetalliska fasandelar på ett tidigt stadium i en tillverkningsprocess, skulle innebära att återkoppling kan göras till tillverkningsprocessen, den kan styras bättre och att kostsam hantering av avvikande material undviks.

Uppsala Universitet har även arbetat med en annan ultraljudsmätmetod, EMAT, en elektromagnetisk akustisk transducer för att försöka mäta hur hårdhetsförändringar påverkar ljudhastigheten i det undersökta härdade materialet. Det är känt att ultraljudshastighet är ett värdefullt verktyg för undersökningar av de fysikaliska egenskaperna hos olika material. I detta projekt användes piezoelektriska sökare för att mäta hastigheter av longitudinella vågor och en EMAT för att mäta hastigheter av transversella vågor. EMAT användes huvudsakligen eftersom det är svårt att alstra transversella vågor normala mot ytan med hjälp av konventionella piezoelektriska sökare. Dessutom tillhör EMAT gruppen kontaktlösa givare, d.v.s. den fordrar inte akustisk kontakt med provobjektet.

Försöken med RUS hos Uppsala Universitet riktades mot främst SKF som tillhandahållit lagringar för undersökningar av mikrostruktur, Sandvik Material Technology och OVAKO Hälsjö som försett Uppsala Universitet med prover för undersökning av fasandelar. SSAB EMEA Oxelösund har tillhandahållit härdade och värmebehandlade prov från grovplåt för EMAT-undersökning av hårdhet. Alla prover har karaktäriserats noggrant med avseende på egenskaper.

3.3 Elektromagnetiska mätmetoder, Swerea MEFOS

Utförligare beskrivningar ges i de tekniska rapporterna TO44-31 (Inre spänningar), TO44-32 (Stålkuleblästrade kugghjul) och TO44-33 (Variationer i hållfasthet i bandändar), se Bilaga 2.

Swerea MEFOS har fokuserat på elektromagnetiska mätmetoder med hjälp av ett mycket flexibelt mätsystem som heter MikroMach. Mätarens styrka är att den använder fyra olika kompletterande metoder för detektering av ett materials olika magnetiska egenskaper. Utifrån de kalibrerande mätningarna kan man skapa en multivariatmodell med de parametrar som bäst speglar den variation man vill mäta.

De fyra mätteknikerna är:

1. Harmonisk analys av det tangentiella spänningsfältet.
2. Barkhausenbrus.
3. Multifrekvent virvelströmsanalys (eddy current).
4. Inkrementell permeabilitet.

Varje mätteknik mäter ett antal magnetiska parametrar i materialet. Utifrån dessa kan man med hjälp av regressionsanalys skapa en modell med de starkaste parametrarna.

Försöken hos Swerea MEFOS riktades främst mot Scania CV som tillhandahållit prover för undersökning av egenskaper hos sätthärdade stålkuleblästrade kugghjul. För detta krävs tillräckligt många, väl karakteriserade prover för att bilda ett gott statistiskt underlag.

SSAB EMEA Borlänge försåg Swerea MEFOS med material för undersökning av egenskapsvariationer i bandändar och material för bestämning av inre spänningar på tjock formatplåt.

Försök att bestämma härddjup på grovplåt planerades att genomföras i samarbete med SSAB EMEA Oxelösund, men dessa kunde ej genomföras eftersom härddjupet visat sig överskrida mätutrustningens mätområde.

4 FORSKNINGRESULTAT

4.1 Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB

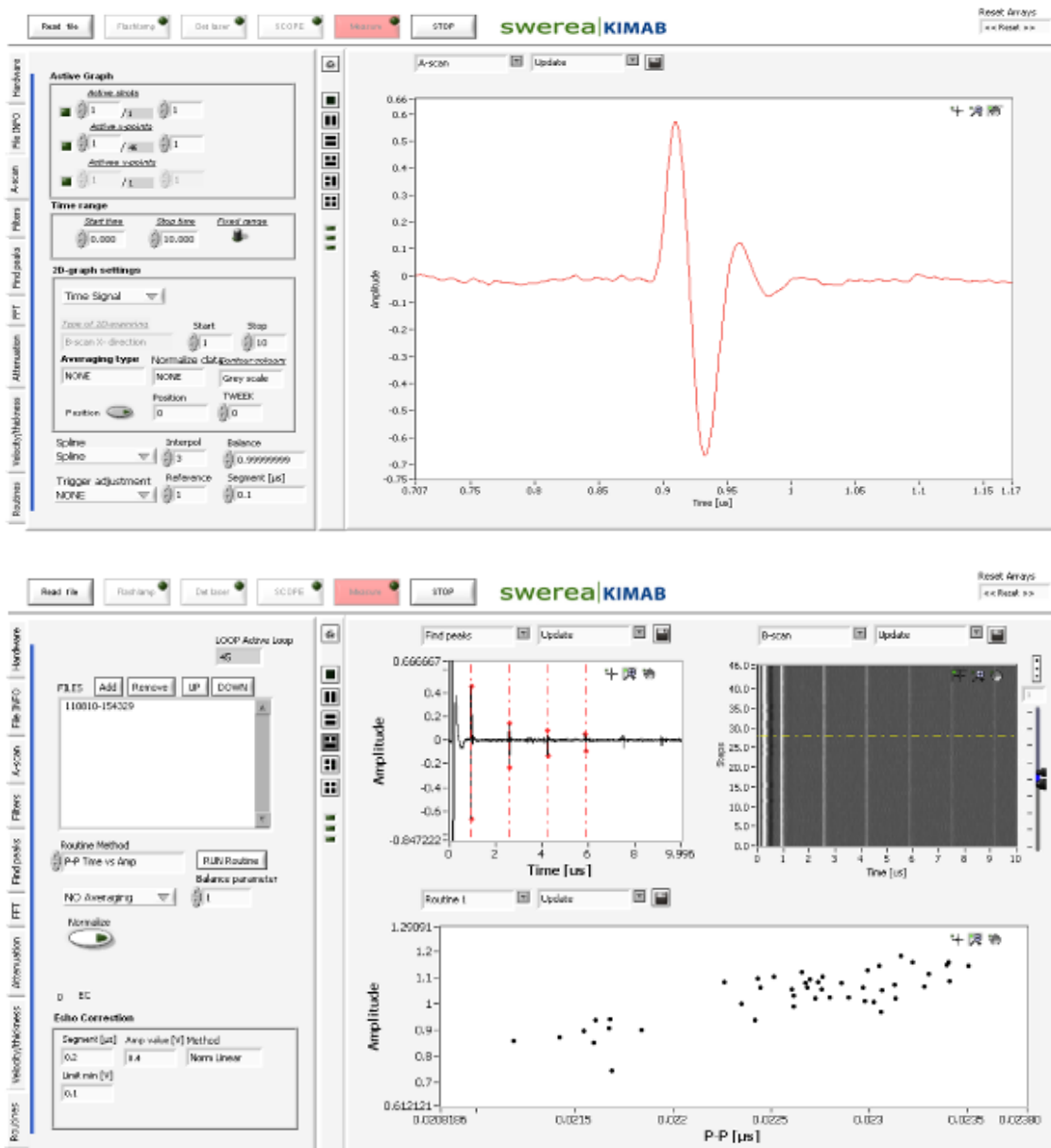
Utförligare beskrivning ges i den tekniska rapporten TO44-30 (Bilaga 2).

4.1.1 Utveckling av mjukvara och signalanalys för LUS

4.1.1.1 Programvara

Swerea KIMAB har utvecklat programvara för styrning av hårdvara såsom lasrar, oscilloskop och stegmotorer, uppsamling av data samt analys, antingen i realtid under mätningarna eller i efterhand. Allt från hastighetsberäkning, hastighetsanalys, uppmätning av Poissons tal, frekvensinnehåll, till filtrering av hög- eller lågfrekvent innehåll i signalerna, kan i princip göras helautomatiskt med programmet.

En mycket stor del av det arbete som utförts på Swerea KIMAB i detta projekt är filtrering och analys av signaler från mätningarna. Eftersom tekniken laserultraljud är så pass ny finns det inget färdigt framtaget protokoll för hur en mätning skall utföras och hur informationen kan extraheras från signaldata. Eftersom en stor mängd information fås vid varje mätning är det nödvändigt att utnyttja någon typ av datorbaserad processmetod för att analysera resultatet. All programmering som utförts har gjorts på Swerea KIMAB. Initialt har ett Labviewbaserat program för uppsamling av data och ett Matlabbaserat program för analysen använts. Senare översattes dock alla delarna till ett gemensamt Labviewprogram. Utvecklingen av detta program fortskrider kontinuerligt allteftersom nya idéer och metoder behöver implementeras. Figur 3 visar gränssnittet för den senaste versionen av programmet. Den vänstra delen av programmet är ett fliksystem där olika flikar innehåller inställningsmöjligheter för olika funktionaliteter i programmet. Den högra delen av programmet illustrerar resultaten och detta görs genom olika typer av grafer. Det finns möjlighet att visa 1,2,3 eller 4 grafer samtidigt.



Figur 3. Gränssnitt för programvara för uppsamling av data och signalanalys för laserinducerat ultraljud

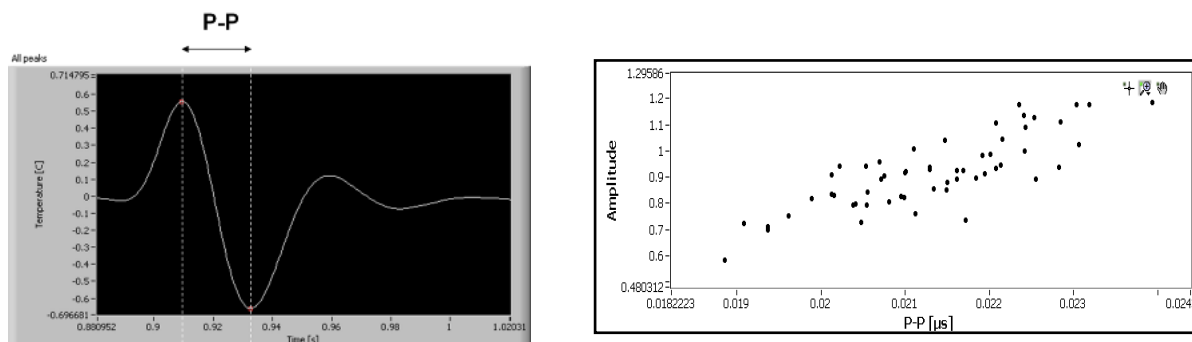
4.1.1.2 Repeterbarhet för LUS-mätningar, problem med icke konsekventa resultat

En svårighet med LUS-tekniken är att signalerna som erhålls kan vara inkonsekventa och varierande vid mätning på samma material/prov. Detta beror på att många faktorer påverkar den slutliga signalens karaktär. Vid mätning av frekvensberoende dämpning i materialet visar det sig att resultaten kan variera upp till 10-15 %. Detta beror på att vågens karaktär påverkas dels av materialet den färdas genom, dels av de reflekterande gränssyftorna och dels på själva ablationen där ultraljudvågen först skapas.

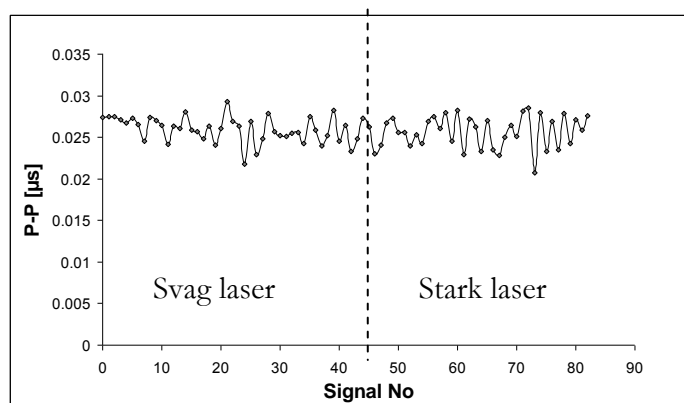
Figur 4 visar relationen mellan en vågs breddning och dess amplitud för samma prov där mätningar har gjorts i samma punkt. Amplituden på ekot kan dels bero på det tillbakareflekterade ljuset eller på styrkan på ultraljudvågen, vilket i huvudsak beror på ablationen. Det har visat sig att det tillbakareflekterade ljuset kan elimineras som en faktor för

breddningen. En verifiering av detta kan demonstreras med Figur 5, som visar en serie mätningar på samma prov och samma punkt där detektionsljuset fördubblas efter 45 signaler. Det finns ingen indikation på att signalerna breddas mer efter 45 signalerna, däremot ökade förstas amplituden för de senare 40 signalerna med det dubbla. Ifall de första 45 signalerna eller de sista 40 signalerna analyseras var för sig syns samma typ av trend som i

Figur 4. Ablationen kan variera från mätning till mätning även ifall mätning görs i samma punkt just eftersom ytan förändras för varje ablation både genom oxidation och genom ablation av material. Hypotesen är så länge är att breddningen är direkt relaterad till styrkan av ablationen, d.v.s. den energi som initialt skapar ultraljudvågen.



Figur 4. Relation mellan ett ekos amplitud och dess breddning

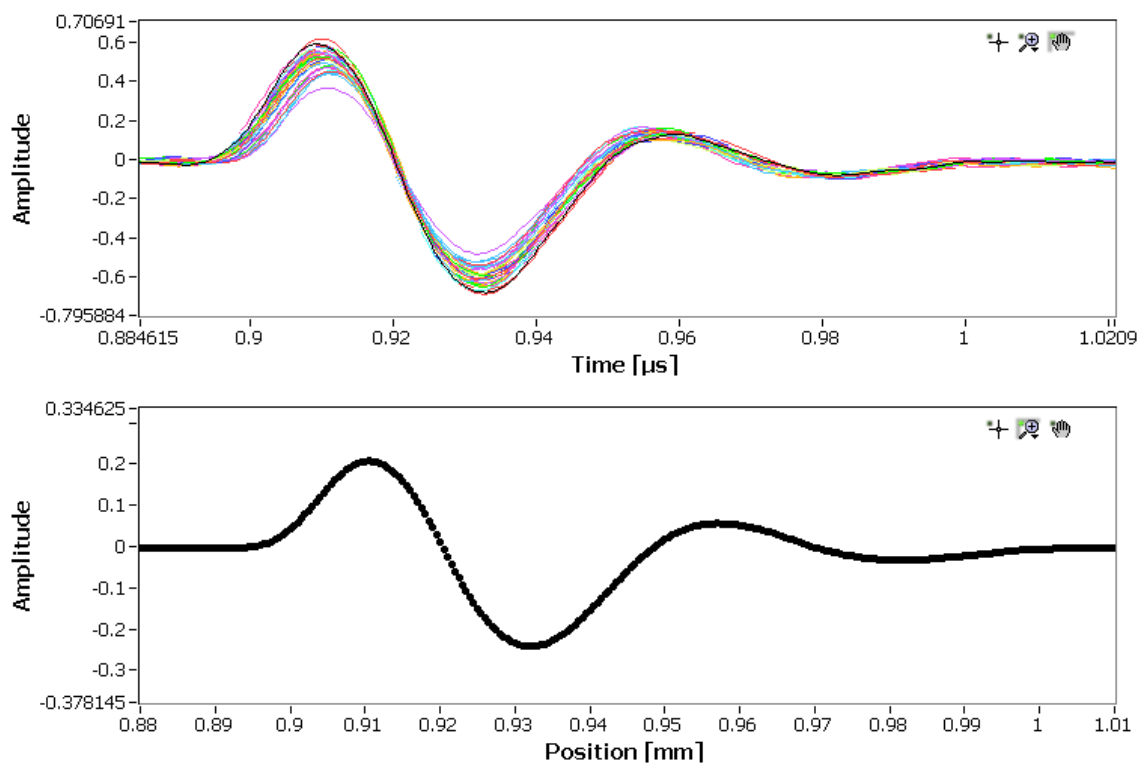


Figur 5. En serie av laserultraljudmätningar där detektionsljuset ökade kraftigt till det dubbla värdet, efter 45 mätningar, utan någon påverkan på detekterad amplitud på ultraljudsekona.

Att ta hänsyn till sådana effekter är inte triviale och mycket arbete har gjorts för att åstadkomma detta men mycket arbete återstår. Ett sätt att eliminera det tillbaka-reflekterade ljusets effekt på amplituden är att mäta upp dess intensitet kontinuerligt och normalisera signalen mot denna. På så sätt kommer variationen av amplituden till större del bero på ablationen och genom att normalisera med exempelvis amplituden av första ekot kan möjligtvis variationen av mätresultaten minskas. En sådan typ av signalkorrigering har till viss del utarbetats och implementerats i programvaran. Programmet har en funktion som kallas "Echo Correction". Den tar en mängd uppmätta data och ser på relationen mellan ekonas amplitud och dess form. På detta sätt skapas en avancerad typ av medelvärdesbildat eko, Figur 6. Det som inte finns med i metoden är normaliseringen med det tillbaka-reflekterade ljusets intensitet eftersom denna intensitet, i detta skede, inte mäts upp. För de

resultat som kommer att presenteras har detta lösts genom att preparera proverna så att de har en till synes likartad yta, både för generering och detektion.

Det kan nämnas att vid de olika typerna av hastighetsanalys sker inte denna typ av variation av mätresultat eftersom breddningen av ett eko inte påverkar resultaten.



Figur 6. Övre: Första ekot från en serie av laserultraljudmätningar. Undre: den resulterande signalen från funktionen "Echo Correction" baserad på signalerna i den övre grafen.

4.1.2 Försök

Swerea KIMAB utförde ett antal laborietest på material som värmebehandlats för att ge olika mekaniska egenskaper. Dessa försök utfördes framför allt för kartläggning av variationer i ultraljudets beteende beroende av materialet olika mekaniska egenskaper och för vidareutveckling av signalanalysprogram.

4.1.3 Värmebehandlat bainitiskt stål

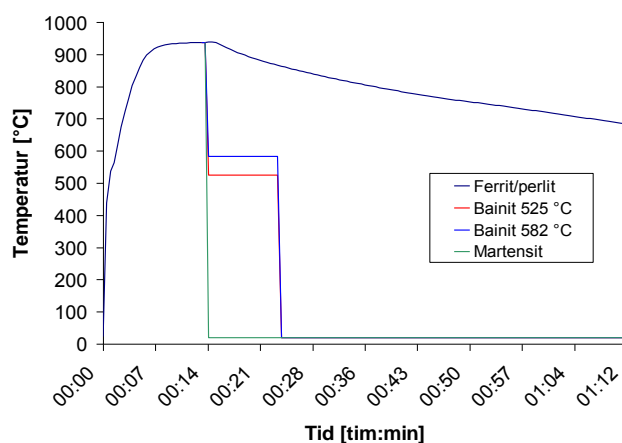
Ett lågkolhaltigt bainitiskt stål värmebehandlades för att försöka skapa fyra olika typer av mikrostrukturer från samma kemiska sammansättning. Materialets kemiska sammansättning presenteras i Tabell 1. Värmecyklerna ses i Figur 7 och eftersom den maximala temperaturen är högre än austenitiseringstemperaturen så förlorar materialet sin ursprungliga struktur vid värmebehandlingen och påverkas endast av kylningsförloppet. Målet med värmebehandlingen var att ta fram ett 100% ferritiskt material, ett 100% martensitiskt material och två bainitiska material, övre respektive undre bainit. Dessa två material kommer att benämnas "bainit #1" och bainit #2" framöver. De två cyklerna för att skapa de två bainitiska strukturerna framtogs genom att använda ett TTT- diagram för denna typ av stål. Figur 8 visar mikroskopbilder

framtagna med svepelektronmikroskop på de fyra värmebehandlade materialen. Från mikrostrukturbilderna kan tydligt den ferritiska strukturen utskiljas i den första bilden med vissa inslag av perlit, den andra bilden visar en tydlig martensitisk struktur. Bild tre och fyra visar på en tvåfasig struktur och det ser ut som om den övergripande kornstorleken är något större än det ferritiska materialet för "bainit #1".

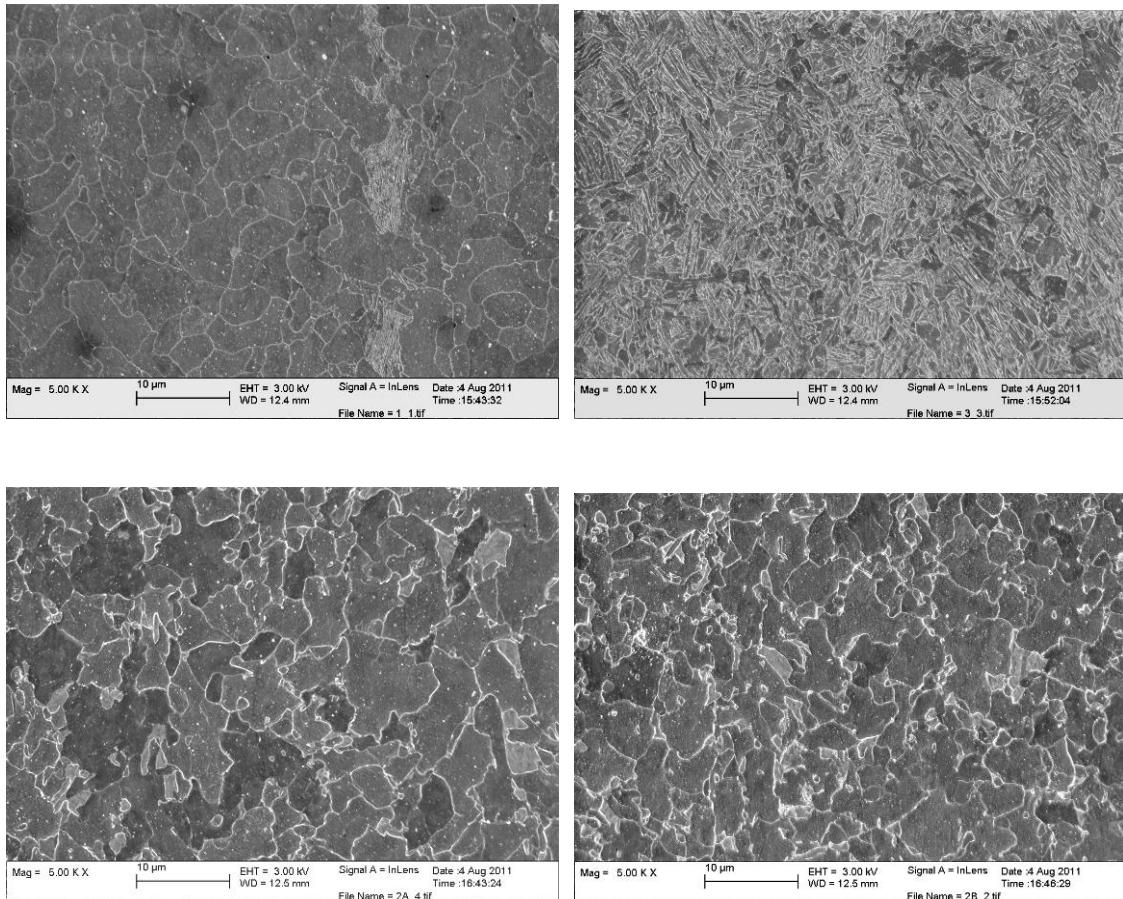
Tabell 1: Kemisk sammansättning för ett lågkolhaltigt bainitiskt stål

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Mo [%]
0.094	0.26	1.81	0.008	0.002	0.0054	0.03	0.31	0.01	0.25
Al [%]	Nb [%]	V [%]	Ti [%]	B [%]					
0.035	0.001	0.02	0.18	0.0011					

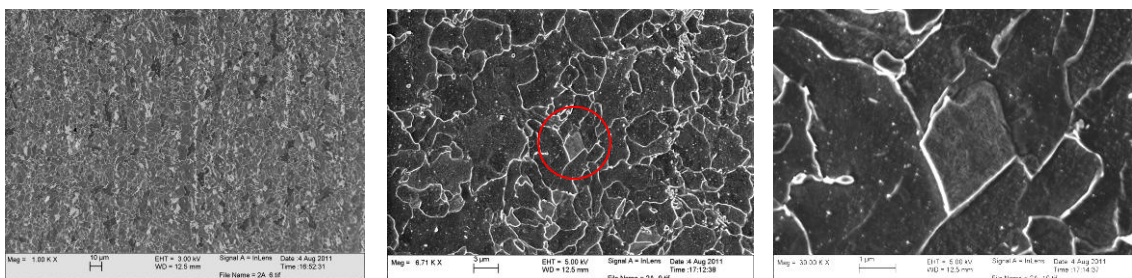
Figur 9 visar en schematisk in- zoomning på en del av den ljusare sekundära fasen och det syns tydligt att en finare inre struktur finns, som högst troligt är någon typ av M/A- fas (oanlöst martensit eller restaustenit). Kolhalten i materialet är så låg att man kan ifrågasätta om strukturen kan kallas undre och övre bainit men någon typ av bainitisk- alternativt acikulär ferritisk struktur har tagits fram vilket resulterat i att 3 helt skilda strukturer tagits fram från samma kemiska sammansättning. Skillnaden mellan de två bainitiska materialen har inte kvantitativt uppskattats men genom att granska mikrostrukturbilderna kan det konstateras att 1) "bainit #2" har en finare struktur än "bainit #1" samt att 2) "bainit #1" har en högre andel sekundärfas (M/A) än "bainit #1".



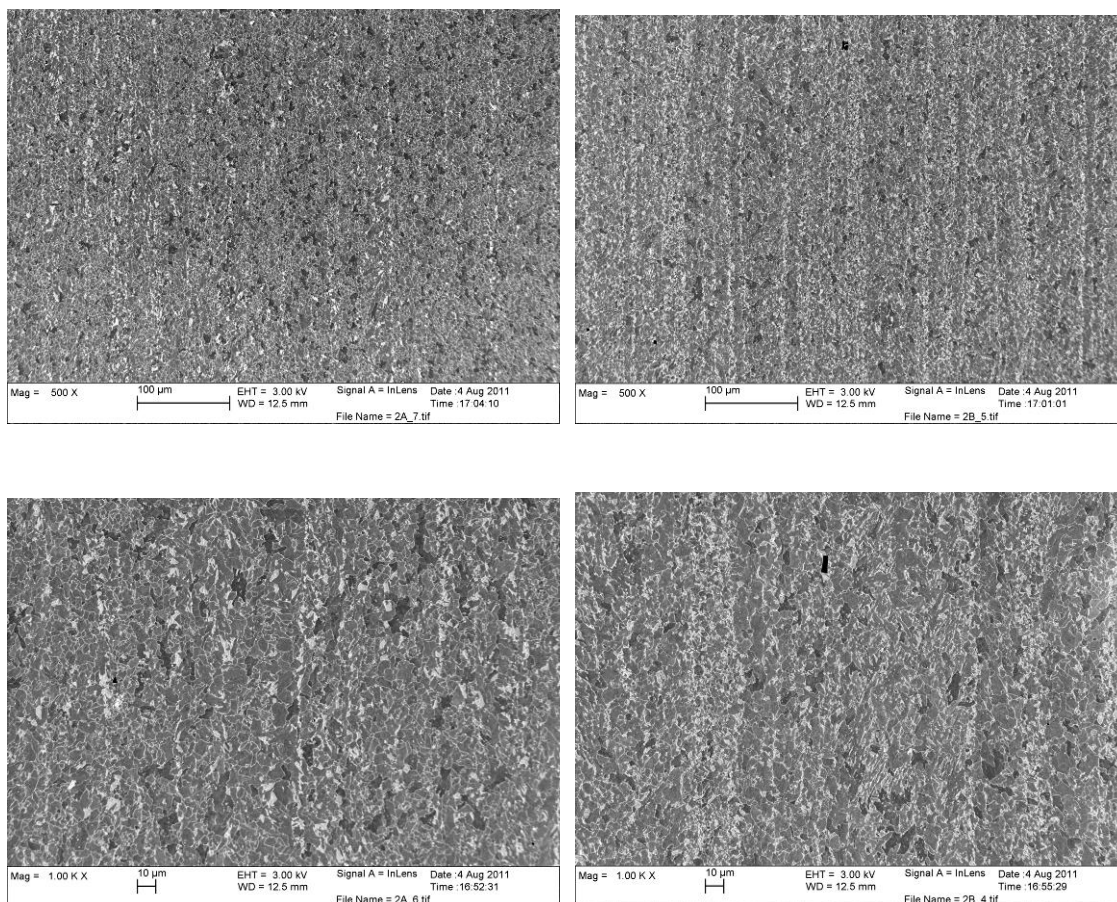
Figur 7. Temperaturcykler för värmebehandling av det lågkolhaltiga stålet för att producera fyra material med skilda strukturer



Figur 8. SEM mikrostrukturbilder på de fyra värmebehandlade stålen, uppe till vänster; "ferrit" uppe till höger; "martensit", nere till vänster; "bainit #1" nere till höger; "bainit #2".



Figur 9. SEM mikrostrukturbilder på "bainit #1" där in- zoomning gjorts på en del av den ljusare sekundärfasen



Figur 10. SEM mikrostrukturbilder på "bainit #1", vänster och "bainit #2", höger.

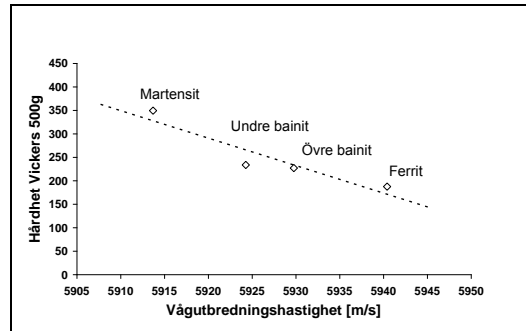
Hårdhetsmätning gjordes på dessa fyra material, resultaten presenteras i Tabell 2. Resultaten från den mekaniska testningen antyder även den att de fyra olika typer av struktur som önskats, uppnåts.

Tabell 2: Vickers hårdhet; $HV_{0,5kg}$ för fyra värmebehandlade stål

Ferrit	Bainit #1	Baint #2	Martensit
188	227	234	349

4.1.3.1 LUS analys

Figur 11 visar hastighetsanalysen för de olika proverna relaterat till dess mekaniska hårdhet. Den longitudinella vågutbredningshastigheten är uppmätt genom att tjockleken på proverna är uppmätta med mikrometer och sedan har tidsdifferensen mellan efterföljande ekon uppmätts genom korskorrelation.

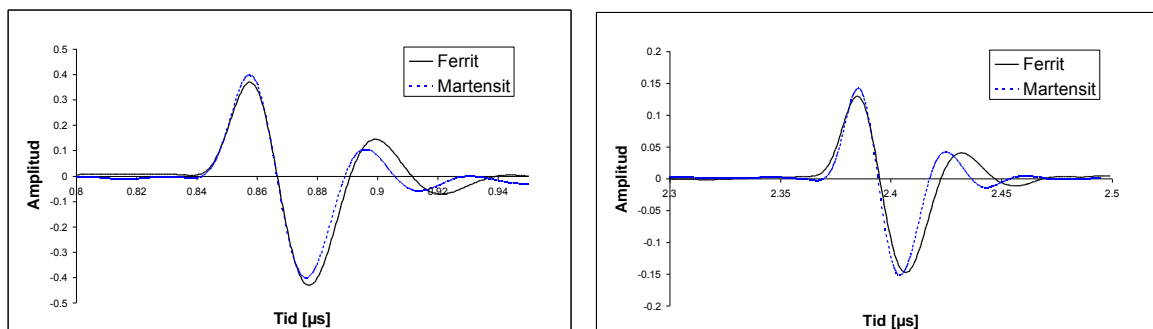


Figur 11. Longitudinell vågutbredningshastighet relaterad mot hårdhet för de värmebehandlade proverna

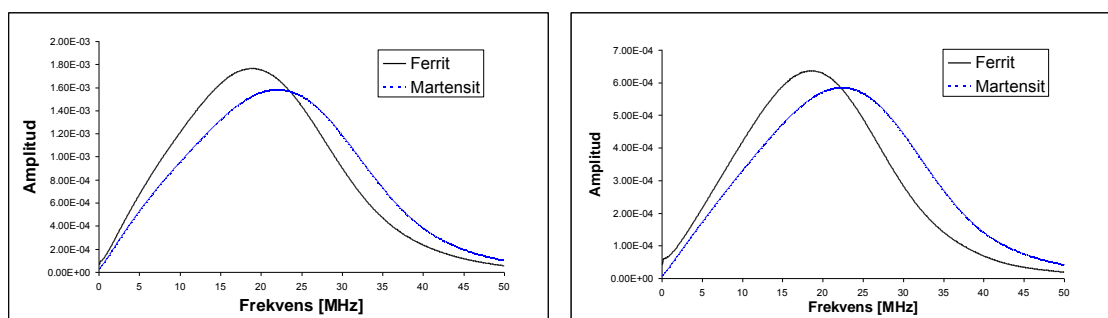
Tabell 3 visar resultaten från LUS- analysen på de värmebehandlade stålen. I tabellen visas dämpningskoefficienten för absolut dämpning utan att ta hänsyn till frekvensinnehållet (för närmare beskrivning se rapporten TO44-30). I enlighet med teorin så har det martensitiska materialet en mycket lägre dämpning än det ferritiska materialet. För de bainitiska materialen är det inte lika trivialt att tolka resultaten. Figur 12 och Figur 13 illustrerar skillnaderna i frekvensinnehåll för signaler som passerat genom ett mer grovkornigt ferritiskt material och ett mer finkornigt martensitiskt material. Genom att det grovkorniga materialet dämpar den högfrekventa delen av signalen mer än det finkorniga materialet resulterar detta i att signalen/ekot ”breddas” mer jämfört med det finkorniga materialet. Figureerna visar ekona och deras respektive FFT spektrum för det första ekot och det andra ekot.

Tabell 3: LUS analys av fyra värmebehandlade stål

	Ferrit (Std%)	Bainit #1 (Std%)	Bainit #2 (Std%)	Martensit (Std%)
Dämpningskoefficient (Absolut dBm^{-1})	92,73 (1.09)	89.22 (1.06)	92.31 (1.28)	87.79 (1.09)

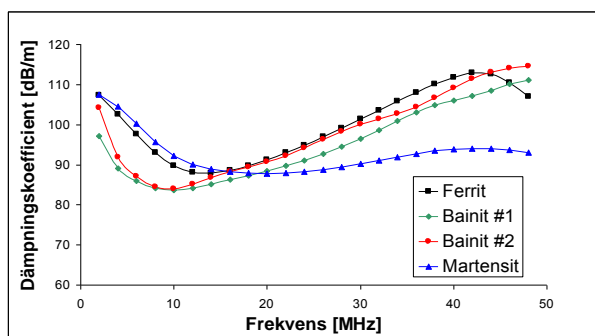


Figur 12. LUS signal som visar skillnaden mellan signalen för ett ferritiskt och ett martensitiskt material. Vänster: Första ekot (1P). Höger: Aandra ekot (3P)



Figur 13. FFT spektrum som visar frekvensinnehållet för signalerna representerade i Figur 12

Figur 14 visar hur dämpningen av olika frekvenser ser ut för ultraljudvågor som rör sig genom de fyra olika materialen. En intressant observation är att de tvåfasiga bainitiska materialen har en mycket låg dämpningskoefficient vid låga frekvenser medan de homogena ferritiska och martensitiska materialen har en desto högre dämpning vid låga frekvenser (det martensitiska materialet har till och med en högre dämpningskoefficient än ferriten vid runt 10 MHz) men helt skilda dämpningskoefficienter vid högre frekvenser.



Figur 14. Dämpningskoefficientens beroende av olika frekvenser för de fyra värmebehandlade proverna (dämpningskoefficienten är uträknad genom att titta på dämpningen av de första 5 ekona)

4.1.4 Undersökning av värmebehandlat martensitiskt stål

Tre stycken martensitiska produktionsmaterial värmebehandlades vid två olika temperaturer, 400 °C och 620 °C under 30 min. De tre olika materialen med de två olika typerna av värmebehandling tillsammans med ursprungsmaterialet beskrivs i Tabell 4 med respektive hårdhet uppmätt med Vickers HV0,5 kg. Tabell 5 visar materialens kemiska sammansättning. Mikrostrukturen studeras på alla nio prover i ljusoptiskt mikroskop, men utifrån metallografin kan inga direkta slutsatser dras för att avgöra vad det är i strukturen som orsakar förändringen i hårdhet. De förväntade effekterna efter en sådan värmebehandling är en minskning av de inre spänningarna samt utskiljning och tillväxt av karbider.

Tabell 4: Vickers hårdhet; HV0,5kg för värmebehandlade martensitiska material

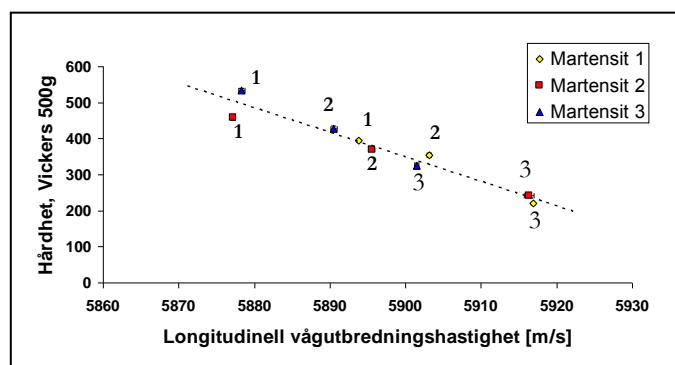
	Obehandlat (A)	400°C i 30min (B)	620°C i 30min (C)
Martensit 1	395.5	354.8	219.8
Martensit 2	459	370.3	241.6
Martensit 3	534.3	428.3	324.6

Tabell 5: Kemisk sammansättning för värmebehandlade martensitiska material

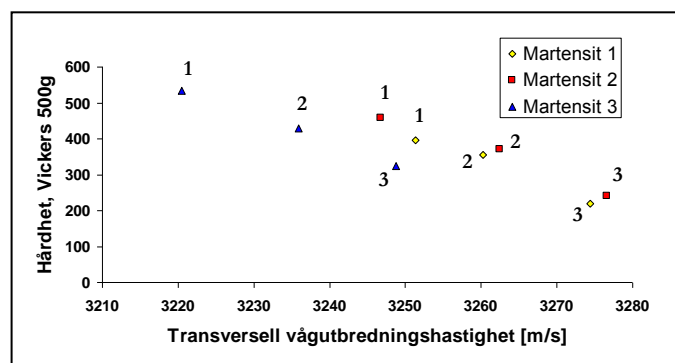
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	B [%]
Martensit 1	0.15	0.70	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004
Martensit 2	0.21	0.70	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004
Martensit 3	0.27	0.70	1.60	0.025	0.010	1.0	0.25	0.25	0.004

4.1.4.1 LUS analys

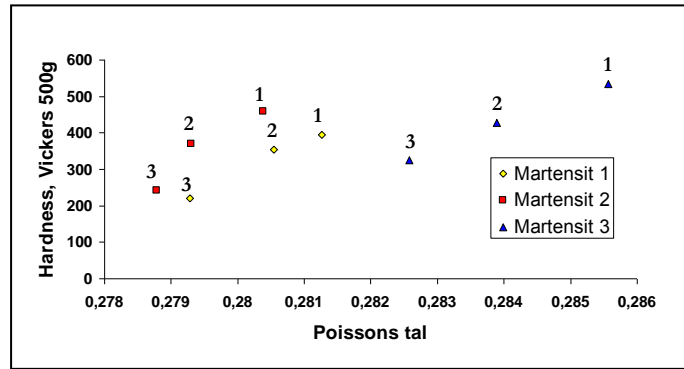
Figur 15 och Figur 16 visar hastighetsanalysen för de olika martensitiska proverna relaterad till dessas mekaniska hårdheter. Figur 15 visar en nästan helt linjär relation mellan hårdhet och longitudinell vågutbredningshastighet för varje materialgrupp och en nästan helt linjär relation för samtliga provmaterial tillsammans. Figur 16 visar en linjär relation mellan hårdhet och transversell vågutbredningshastighet för varje material men däremot en större skillnad mellan de tre olika materialgrupperna. Figur 17 visar relationen mellan Poissons tal och hårdheten för de olika martensitiska proverna och det syns tydligt att Poissons tal minskar i värde med en längre glödningstid. Utgående från dessa hastighetsanalyser skulle varje enskilt material kunna identifieras.



Figur 15. Vickers hårdhet 500g relaterat till longitudinell ultraljudshastighet för 3 olika martensitiska stål som värmebehandlats enligt Tabell 4



Figur 16. Vickers hårdhet 500g relaterat till transversell ultraljudshastighet för 3 olika martensitiska stål som värmebehandlats enligt Tabell 4

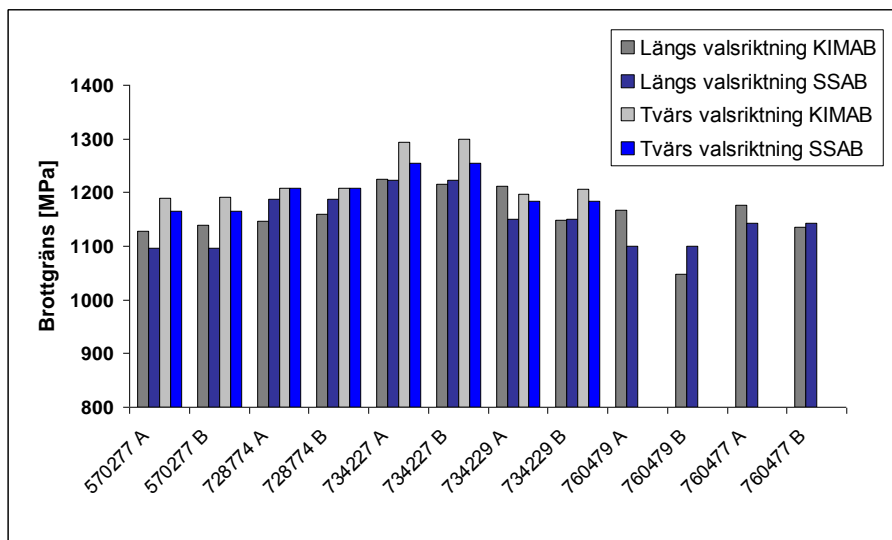


Figur 17. Vickers hårdhet 500g relaterat till Poissons tal för 3 olika martensitiska stål som värmebehandlats enligt Tabell 4

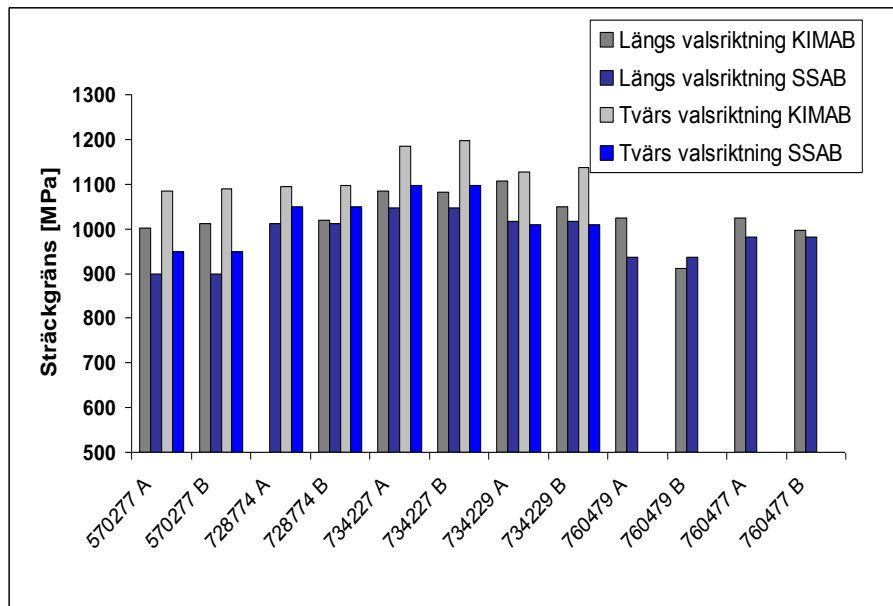
4.1.5 Undersökning av produktionsmaterial av bainitiskt stål

4.1.5.1 Mekanisk provning

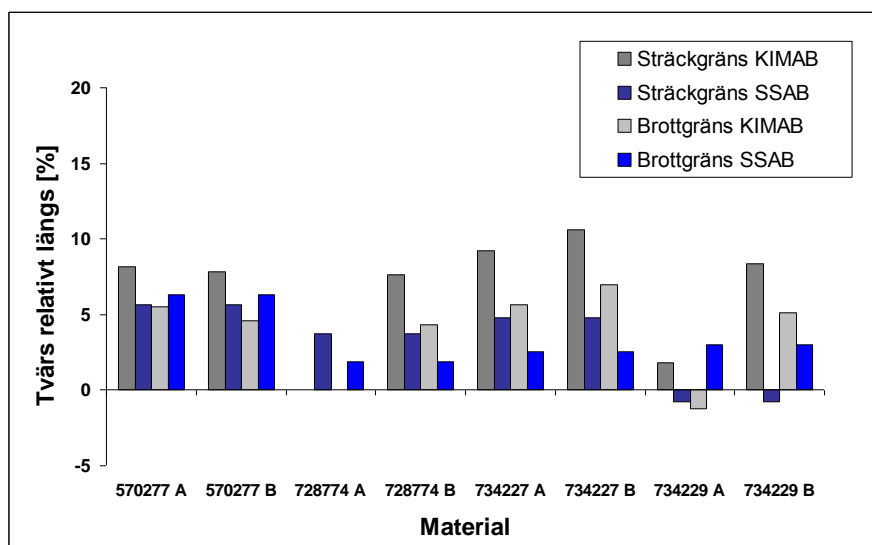
Ett flertal prover från produktionsmaterial av ett varmvalsat bainitiskt stål med något varierande mekaniska egenskaper erhöles från SSAB EMEA Borlänge. Dragprovdata erhöles i olika omgångar allteftersom materialen anlände där dragprovning utfördes både av SSAB och Swerea KIMAB. En summering av dessa data finns samlat i Figur 18 och Figur 19. Från provdata nedan kan dels slutsatsen dras att dragprovdata från Swerea KIMAB ger generellt en något högre värde i både sträckgräns och brottgräns. En annan redan väntad slutsats är att sträckgränsen tvärs valsningsriktningen var mellan 4 och 9 % högre än sträckgränsen längs valsningsriktningen och mellan 2 och 7 % högre brottgräns tvärs valsningsriktningen relativt längs valsningsriktningen, se Figur 20. Det finns ett undantag i denna serie, som syns i figuren, där de mekaniska egenskaperna har ett lägre värde tvärs relativt längs.



Figur 18. Brottgräns för bainitiskt produktionsmaterial erhållen från dragprovning, längs valsningsriktningen, tvärs valsningsriktningen, utförda både hos SSAB och Swerea KIMAB



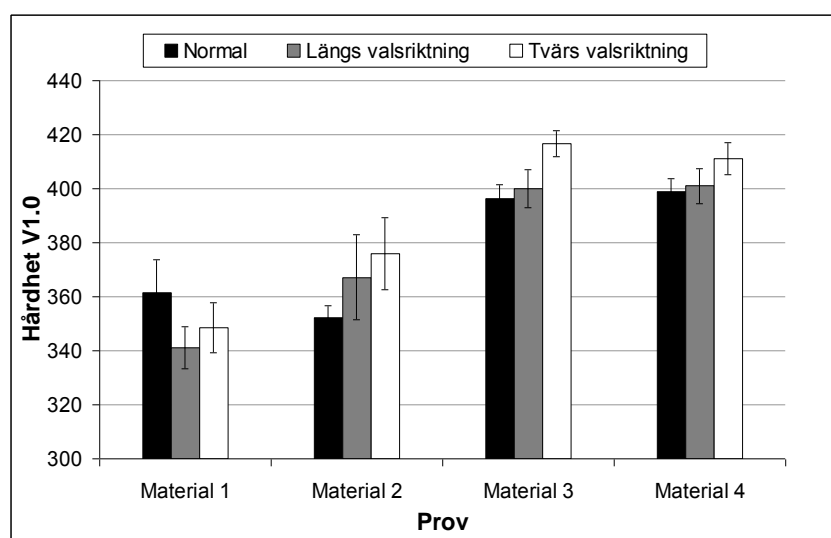
Figur 19. Sträckgräns för bainitiskt produktionsmaterial erhållen från dragprovning, längs valsningsriktningen, tvärs valsningsriktningen, utförda både hos SSAB och Swerea KIMAB



Figur 20. Procentuell jämförelse mellan mekaniska egenskaper tvärs valsningsriktningen relativt längs valsningsriktningen.

En ytterligare analys på dessa bainitiska materials anisotropi gjordes genom hårdhetsmätning i alla tre riktningar; längs valsningsriktningen, tvärs valsningsriktningen samt normalriktningen till plåtens yta, se Figur 21. Med undantag av ”Material 1” visar resultaten att det lägsta värdet på hårdheten är i normalriktningen och det högsta i tvärsriktningen i enlighet med ovanstående resultat. Hårdhetsmätningarna gjordes på 1/4 djup för att undvika yteffekter samt segringseffekter från mittlinjen, dock kan en viss felmarginal finnas för detta

1/4 djup i synnerhet för mätningen i normalriktningen eftersom dessa prov krävde en viss förbearbetning genom nedslipning.



Figur 21. Hårdhetsmätning i olika riktningar för fyra olika bainitiska produktionsmaterial utfört hos Swerea KIMAB

4.1.5.2 Metallografiska undersökningar av bainitiska prover

Mikrostrukturen studerades på alla bainitiska prover i ljusoptiskt mikroskop. Materialen uppvisar en starkt anisotrop struktur. Om man betraktar provet med valsriktningen i det horisontella planet kan en tydlig ”pannkaksstruktur” uttydas. En bainit/martensitisk struktur var tydligt urskiljbar men andelarna av dessa faser går inte att uppskatta enbart ljusoptiskt, inte heller går det att identifiera vad som ger orsak till en högre mekanisk styrka i materialen.

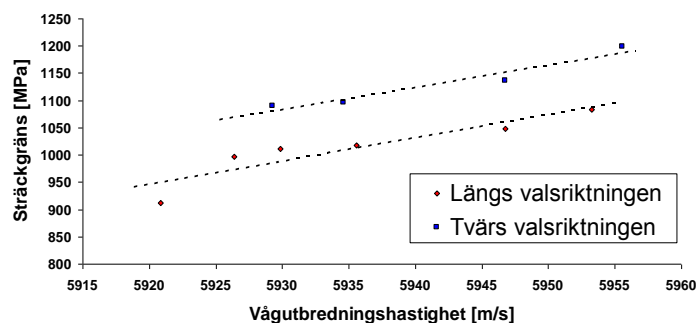
4.1.5.3 LUS analys

I detta avsnitt sammanfattas resultaten av LUS-mätningarna. I den tekniska rapporten TO44-30 finns utförligare beskrivning.

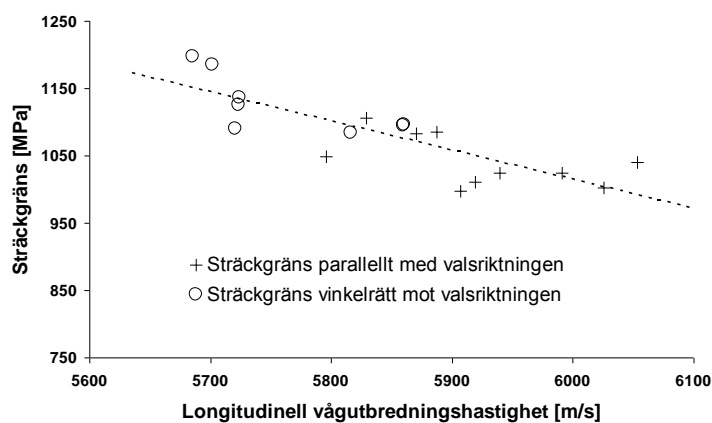
Hastighetsanalys på ett antal produktionsmaterial gjordes genom att på samma sätt som tidigare analyser mäta vågutbredningshastigheten genom plåten. Figur 22 visar relationen mellan den longitudinella vågutbredningshastigheten i riktning normalt till plåten och sträckgränsen längs valsriktningen samt tvärs valsriktningen. En motsatt relation jämfört med tidigare observation erhålls. Figur 23 visar relationen mellan sträckgränsen längs samt tvärs valsriktningen och dess respektive longitudinella vågutbredningshastighet uppmätt med hastighetsmetoden. Tekniken kan tydligt påvisa en skillnad mellan egenskaperna längs och tvärs valsriktningen. R-värdet för dessa mätdata beräknades till -0,826.

Figur 24 visar en större uppsättning data som visar relationen mellan sträckgränsen och vågutbredningshastigheten enbart längs valsriktningen, uppmätt med hastighetsmetoden. En begränsning med denna metod är att noggrannheten vid mätning är relativt låg eftersom metoden kräver mycket noggrann mätning av tidsdifferenser i mätdata. R-värdet för relationen mellan sträckgränsen och den longitudinella vågutbredningshastigheten beräknades till -0,529. Standardavvikelsen ifrån den linjära trendlinjen uppmäts således till 128 m/s vilket

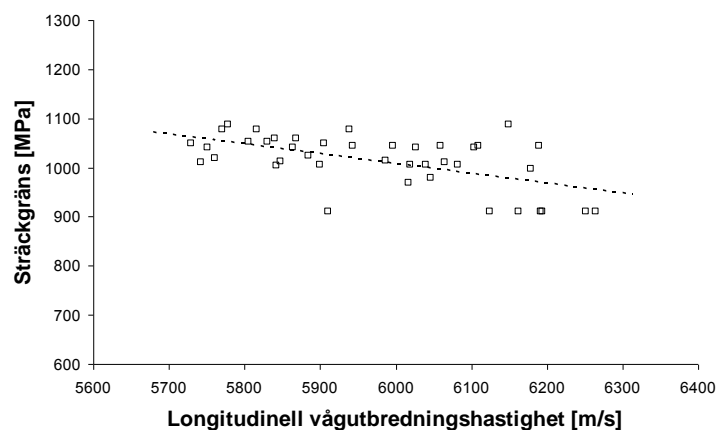
är procentuellt mycket litet men eftersom hastighetsskillnaderna är så pass små för de olika hållfastheterna så kan denna avvikelse översättas till en standardavvikelse i sträckgräns på 45 MPa.



Figur 22. Longitudinell ultraljudshastighet i riktningen normalt till plåten relaterat till sträckgränsen längs samt tvärs valsriktningen för ett antal av de bainitiska produktionsmaterialen

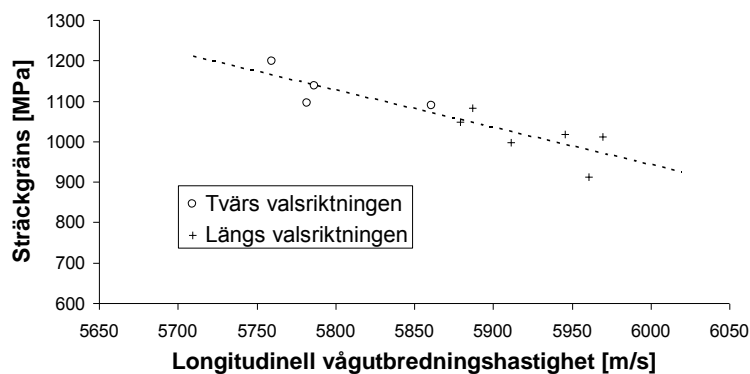


Figur 23. Longitudinell ultraljudshastighet i riktningen längs med samt tvärs valsriktningen relaterat till sträckgränsen längs respektive tvärs valsriktningen för ett antal av de bainitiska produktionsmaterialen



Figur 24. Longitudinell ultraljudshastighet i riktningen längs med valsningsriktningen relaterat till sträckgränsen längs valsningsriktningen för ett antal av de bainitiska produktionsmaterialen.

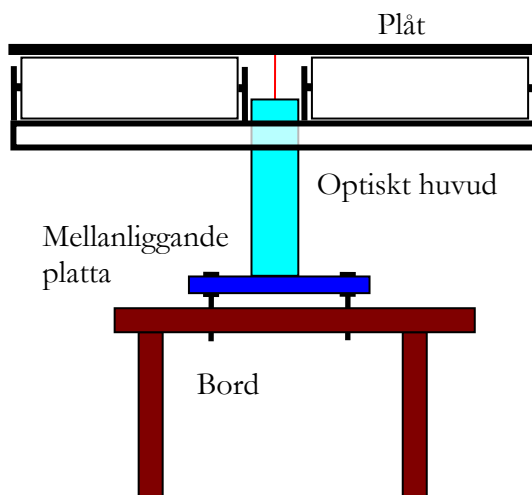
Mätningar med den modifierade hastighetsmetoden, där generering sker i två punkter samtidigt, gjordes i laboratoriet med en tillfällig och inte helt pålitlig uppställning. Resultaten visade dock tydligt att variationen för mätning på varje enskilt prov var ytterst reducerad, standardavvikelsen för mätning gjorda på ett enskilt prov mättes upp till c:a 5 m/s vilket endast är 0,08%. Dock betyder inte detta att avvikelsen från en linjär relation mellan sträckgräns och vågutbredningshastighet var lika reducerad. Figur 25 visar relationen mellan sträckgräns och longitudinell vågutbredningshastighet både längs respektive tvärs valsningsriktning. R- värdet uppgår till -0,915 och standardavvikelsen från den linjära trendlinjen till 35 MPa.



Figur 25. Longitudinell ultraljudshastighet i riktningen längs med valsningsriktningen relaterat till sträckgränsen längs valsningsriktningen för ett antal av de bainitiska produktionsmaterialen. Hastigheten är här mätt med den modifierade hastighetsmetoden.

4.1.6 Industriell installation

En industriell installation av laserultraljudutrustningen gjordes hos SSAB EMEA Borlänge i formatsträcka 3 för varmvalsat höghållfast stål, Figur 27. Mätningar gjordes vid två olika tillfällen under perioden april - juni 2010, vecka 17 och 18 första tillfället, och det andra tillfället v25. Installationen förbereddes genom konstruktion av ett stabilt bord i stål för integrering av laserultraljudinstrumentet, se Figur 26, samt planering så att de specifika stålsorterna kunde köras under mättillfället.



Figur 26. Illustration av hela installations- konstruktionen inklusive det optiska huvudet, den mellanliggande plattan och bordet



Figur 27. Industriell installation av laserultraljud. Vänster: Fiberkopplat optiska huvudet installerat i formatlinjen. Höger: Spänningsaggregat till lasrar samt insamlingselektronik och datorer.

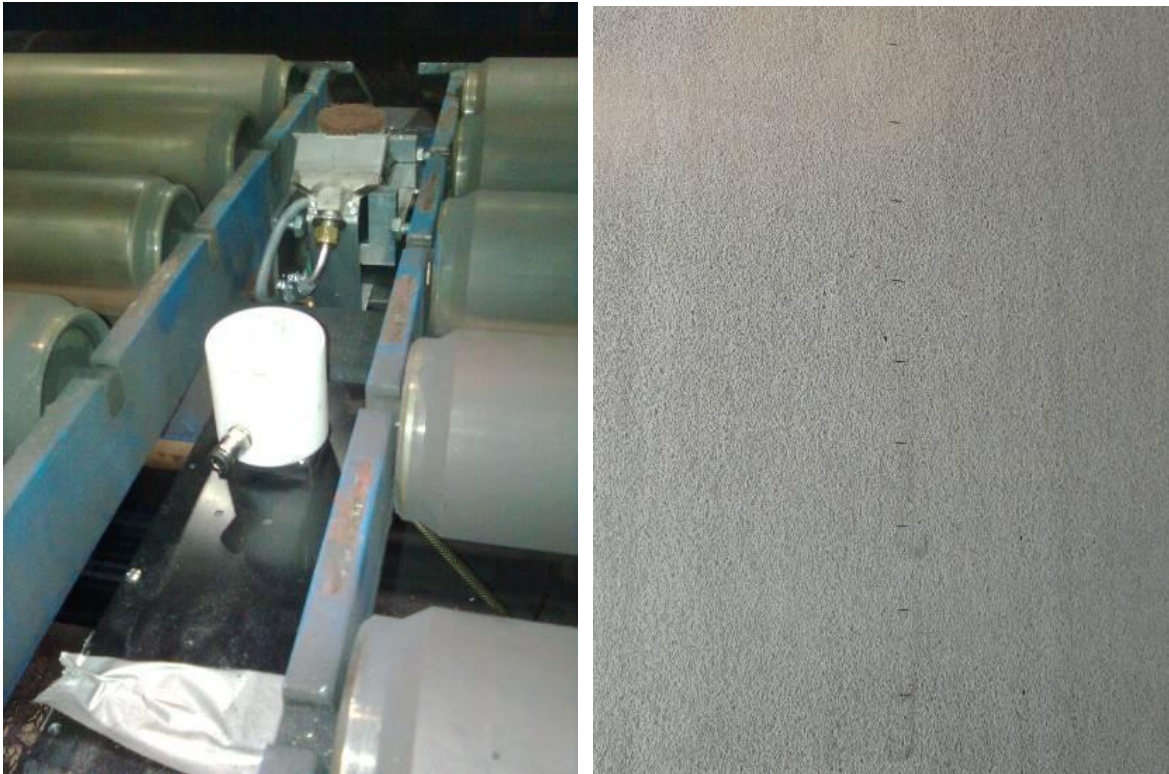
Fokus för installationen var att mäta på de baintiska stålen som undersökts i laboratoriet och försöka reproducera resultaten online. En hel del problem uppstod längs vägen och dessa kan i huvudsakligen delas upp i två kategorier; utrustningens icke helt industriella karaktär samt

en högre grad av lös oxid på ytorna på de bainitiska proverna än väntat. I stort kan det sammanfattas att det inte gick att utföra de mätningar som var planerade på de specifika höghållfasta bainitiska stålen p.g.a. lös oxid på ytorna men däremot gick det att utföra laserultraljudmätningar på de övriga stålsorter som passerade formatsträckan under tiden vi var där. (Se Tabell 6 och Tabell 7 samt Figur 32) Detta gällde både betad och icke betad plåt.



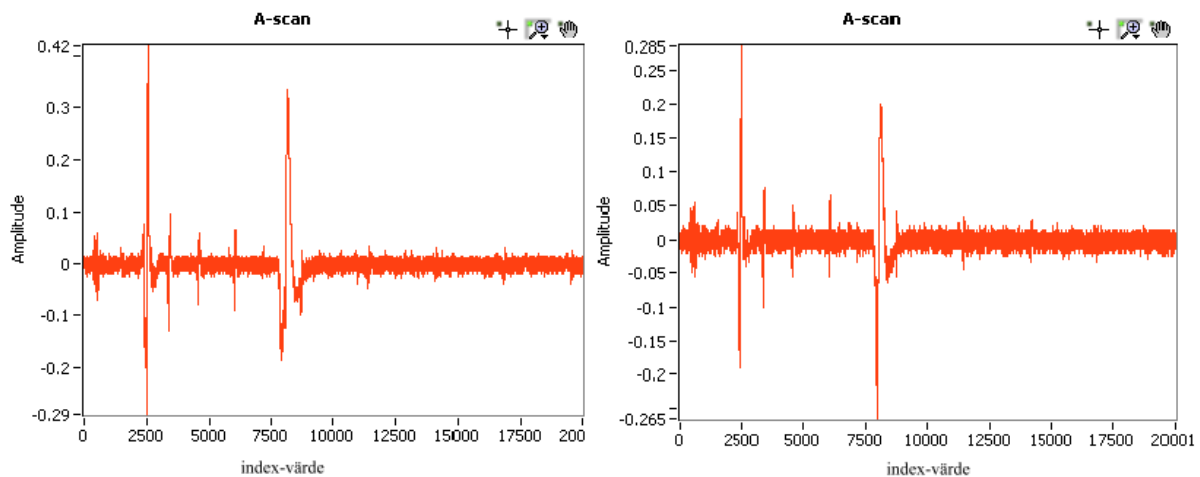
Figur 28. Borstmekanism som användes för att ta bort den lösa oxiden från plåten vid online mätningarna

Inför det andra tillfället konstruerades en borstmekanism avsedd att ta bort den lösa oxiden från bandet, se Figur 28. Figur 29 visar hur laserultraljudhuvudet såg ut tillsammans med borstmekanismen. Borstmekanismen fungerade men mätdata kunde fortfarande inte upptas med laserultraljudsystemet för den specifika stålsorten som var av intresse, antingen p.g.a. att ytan behövde göras ren ytterligare, möjligen att ytan på motsatta sida även behövde göras ren eftersom oxiden möjligen hade en dämpande effekt när ultraljudvågen reflekteras på den ytan eller att ultraljudutrustningen inte fungerade optimalt vid det tillfället. Mätningarna vid den andra installationen fick på sista dagen avbrytas eftersom en av de optiska fibrerna gick sönder. Under vecka 25 upptogs inga specifika mätdata eftersom målet var att överkomma problematiken med det tjocka lösa oxidlagret vilket misslyckades.



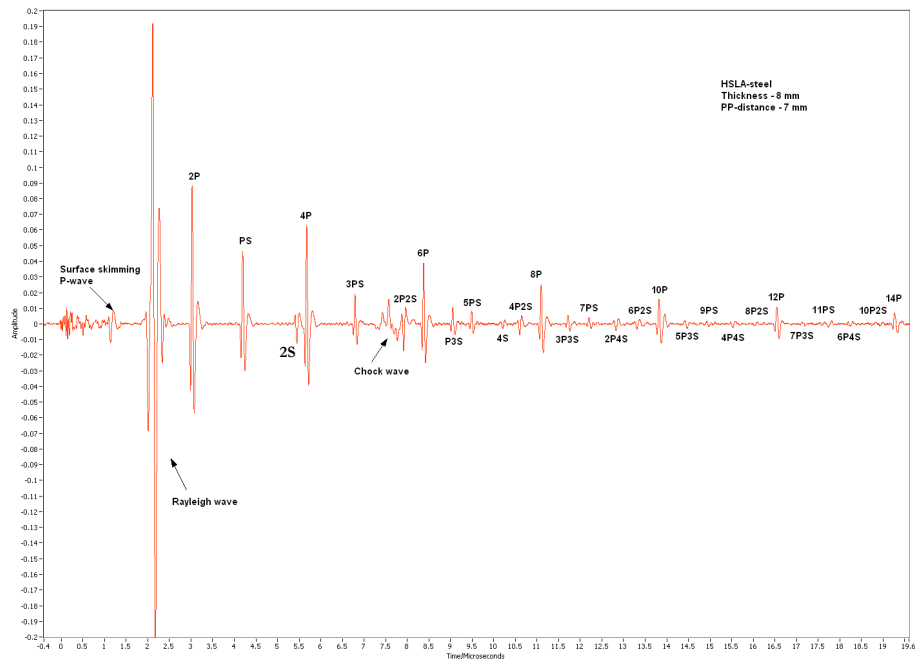
Figur 29. Vänster: Industriell installation av laserultraljudshuvudet tillsammans med borstmekanismen. Höger: Märken från online mätning på produktionsmaterial (Ett av de stål med lägre hållfasthet som inte hade det tjocka lösa oxid-lagret).

4.1.7 Onlinemätning i formatsträcka 3, SSAB EMEA Borlänge



Figur 30. Exempel på två stycken enkelskott från mätning på stål utan lös oxid

Figur 30 visar två stycken enkelskott från online mätningen på en av de stålsorterna som inte hade det tjocka oxidlagret. Figur 31 visar en medelvärdesignal av 50 skott från samma typ av mätning. Dessa två figurer visar att signal-till-brus förhållandet i mätdata är relativt högt och att tjockleksvariationerna i valsad plåt är lokalt mycket små eftersom medelvärdesbildning kan göras på upp till 50 intilliggande skott och resultera i mycket detaljrika signaler.



Figur 31. Exempel på en laserultraljudssignal från en c:a 9mm tjock HSLA plåt där genererings- och detektionsfokus varit separerade c:a 7mm.

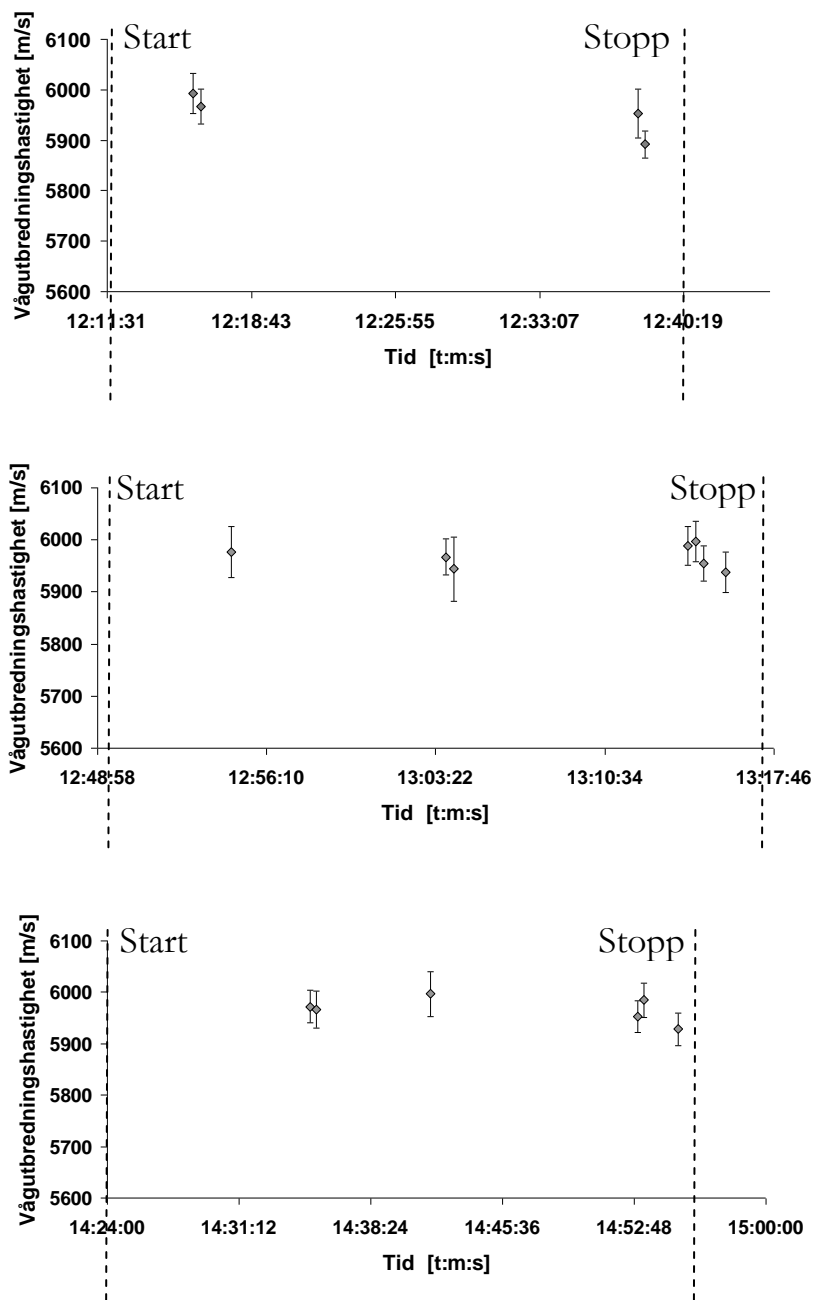
De stål som mättes på vid första tillfället finns listade i Tabell 6 och Tabell 7. Dragprovning utfördes av SSAB EMEA Borlänge på samtliga av dessa material. Figur 32 nedan, visar resultaten av hastighetsanalysen på tre stycken vavalsade plåtar, med sträckgränsen 460 MPa, uppmätta under produktion. Varje mätpunkt motsvarar ett medelvärde av 125 ultraljudssignaler. Mätningar gjordes på vissa specifika positioner längs plåten. Figurerna visar tidpunkten för mätningen vilket i de flesta fall överensstämmer proportionellt med positionsdata då plåten rör sig med konstant hastighet genom riktverket. I figurerna är även tidpunkterna för start och stop utsatta med vertikala streckade linjer. Vid jämförelse av dragprovdata och den longitudinella vågutbredningshastigheten för dessa material kunde inga direkta samband dras. En intressant observation kan dock göras, nämligen att vågutbredningshastigheten ser ut att minska precis mot slutet av bandet, vilket skulle kunna vara en indikation på att kvaliteten på stålet ändras mot slutet. För att verifiera detta skulle en kontinuerlig mätning behöva göras på hela sista delen av bandet. Dessvärre kunde detta inte göras vid detta tillfälle. En annan observation som kan göras från dessa data är att standardavvikelsen för varje mätning var relativt liten men från mätning till mätning kunde skillnaderna i värdet bli märkbar trots att mätningarna gjorts på ett kort avstånd från varandra. Detta kan vara en effekt av att materialet har ändrats mellan dessa positioner, men mer troligt skulle vara att separationen mellan generering och detektering varierats som ett resultat av att vissa vitala komponenter i det optiska huvudet inte var ämnade för en industriell installation.

Tabell 6: Online mätning 2010-05-04

Sträckgräns	ID	Betat	Tjocklek [mm]
355 MPa	169627	Nej	8
355 MPa	169815	Nej	8
355 MPa	170946	Nej	12
355 MPa	170943	Nej	12
650 MPa	166619	Nej	6

Tabell 7: Online mätning 2010-05-05

Sträckgräns	ID	Betat	Tjocklek [mm]
650 MPa	171287	Ja	8
355 MPa	169831	Ja	8
500 MPa	171252	Ja	9.5
460 MPa	171281	Ja	10
460 MPa	171282	Ja	10
460 MPa	171283	Ja	10
460 MPa	171284	Ja	10
450 MPa	170251	Ja	6.2
420 MPa	171280	Nej	15



Figur 32. Hastighetsanalys från online mätning på tre stycken varvalsade stål med sträckgränsen 460 MPa och tjocklek 10mm.

4.1.8 Resultat och diskussion onlinemätning

Vid de första online mätningarna som utfördes i formatsträcka 3 hos SSAB EMEA i Borlänge kunde konstateras:

- Löst glödskal på det material som var det primära material som skulle undersökas. (Stor skillnad mot de prover som man undersök i laboriemiljö.)
- Mätningar gjordes på material med andra sammansättningar, med tydliga signaler vid mätningen.
- Ingen direkt korrelation mellan mätsignalerna, longitudinella vågutbredningshastigheten, och de dragprovdata som erhöles från banden i fråga.

- Vågutbredningshastigheten verkar minska i slutet av banden, men det troligaste är mekanisk förändring av mätutrustningen vilket gav ett systematiskt mätfel.

Före det andra mättillfället i ovan nämnda klippsträcka konstruerades och tillverkades en utrustning för att mekaniskt avlägsna det lösa glödskalet som omöjliggjorde mätningar på det primära materialet. Vid det andra mättillfället kunde konstateras:

- Utrustningen för mekanisk rengöring av banden fungerade tillfredsställande.
- Problem med mätutrustningen gjorde att inga mätdata kunde registreras.

Diskussion on-linemätning:

- För att få stabila mätningar krävs en anordning för rengöring av banden där utrustningen ska mäta, om man ska få tillräcklig signalstyrka för tillförlitlig signalanalys.
- Själva mätutrustningen måste bättre anpassas till den krävande industrimiljö som en klippsträcka utsätter den för, om mätningarna ska kunna bli tillförlitliga och att utrustningen ska hålla.

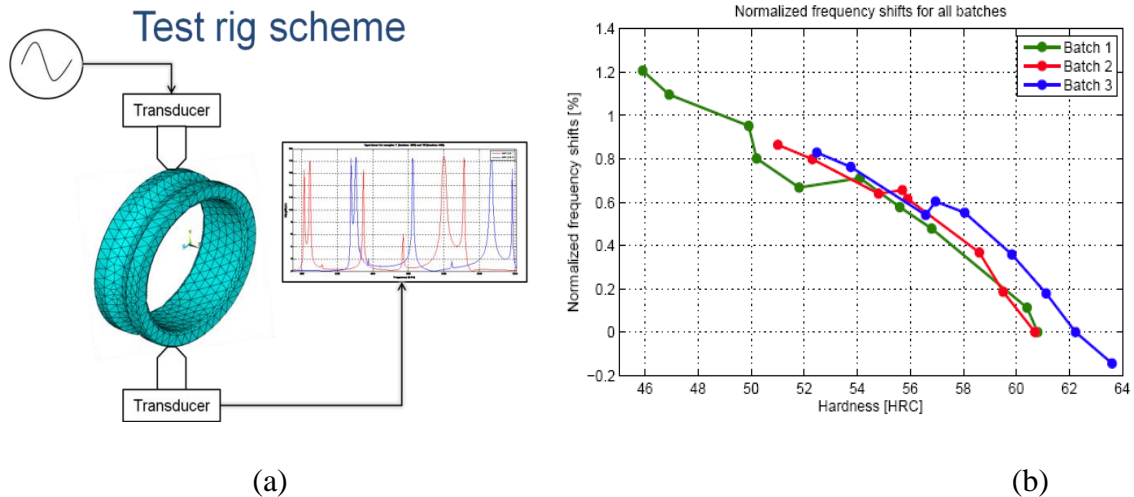
4.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet

Laboratorieförsök har genomförts med syftet att fastställa relationer mellan ultraljudspektra och förekommande strukturbeståndsdelar och egenskaper. Variationer i stålets hårdhet undersöktes i flera experimentserier genomförda i samarbetet med följande industripartners: SKF, SSAB EMEA Oxelösund, Sandvik Materials Technology och Ovako Hällefors.

Försöken finns närmare beskrivna i de tekniska rapporterna TO44-34 (RUS) och TO44-35 (EMAT), Bilaga 2.

4.2.1 Hårdhet för stålringar, SKF

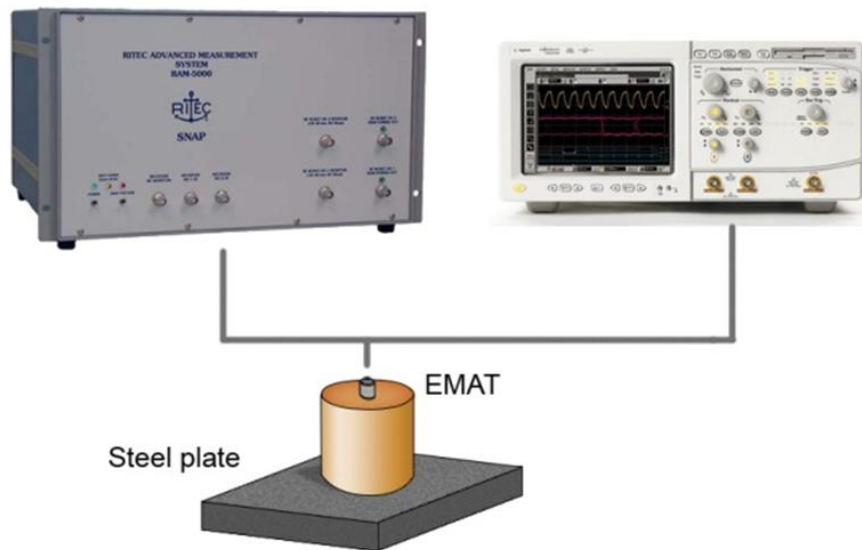
Tre olika serier av härdade stålringar från SKF undersöktes för att bestämma sambandet mellan hårdheten och resonansfrekvenserna med hjälp av resonansultraljudspektroskopi (RUS). En tydlig korrelation mellan hårdheten och normaliserade resonansfrekvenser i två frekvensband (110kHz och 150 kHz) fastställdes. Den globala trenden var att resonansfrekvenserna minskade linjärt med ökande hårdhet, Figur 33. SKF levererade flera serier av ringar med kontrollerad hårdhet samt dimensioner och deltog i planeringen av hela experimentet.



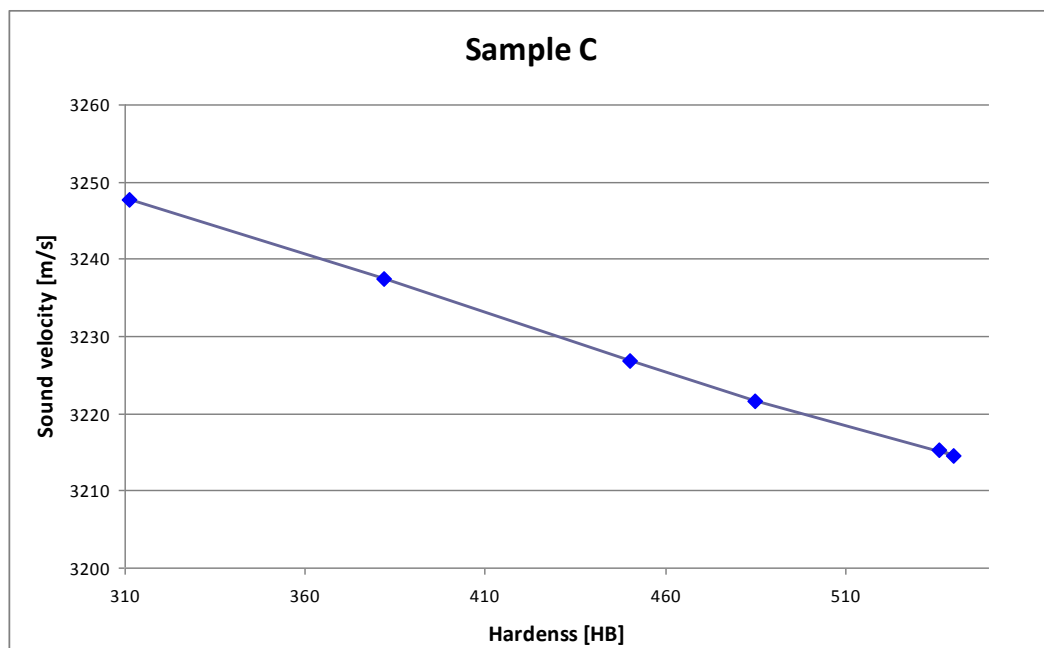
Figur 33. RUS testförfarande (a) och sambandet mellan hårdheten och RUS resultat (b).

4.2.2 Hårdhet för Hardox stål, SSAB EMEA Oxelösund

Ett antal kuponger av 13mm tjock Hardoxplåt från SSAB EMEA Oxelösund med olika avsiktligt skapade hårdhetsvariationer mellan ca 323 och 446 Brinell undersöktes med RUS. Ett antal små prover skars ut ur kupongerna och i RUS testet bestämdes frekvenserna av mekaniska resonanser i proverna. En undersökning av sambandet mellan resonansfrekvenserna och hårdheten visade tyvärr ingen tydlig korrelation. För att lösa problemet undersöktes en annan metod som bygger på mätning av hastigheter av transversell ultraljudvåg alstrad med hjälp av elektromagnetisk akustisk givare (EMAT) i ett testförfarande som visas i Figur 34. SSAB EMEA Oxelösund specialtillverkade en serie av 17 kuponger, som undersöktes med EMAT i ett flerstegsexperiment. I varje steg utförde man termisk behandling, anlöpning, av kupongerna, varefter deras HB hårdheter mättes hos SSAB och därefter bestämdes ljudhastigheterna med EMAT i Uppsala. Undersökningen visade ett tydligt linjärt samband mellan den uppmätta ljudhastigheten och stålhårdheten, se Figur 35.

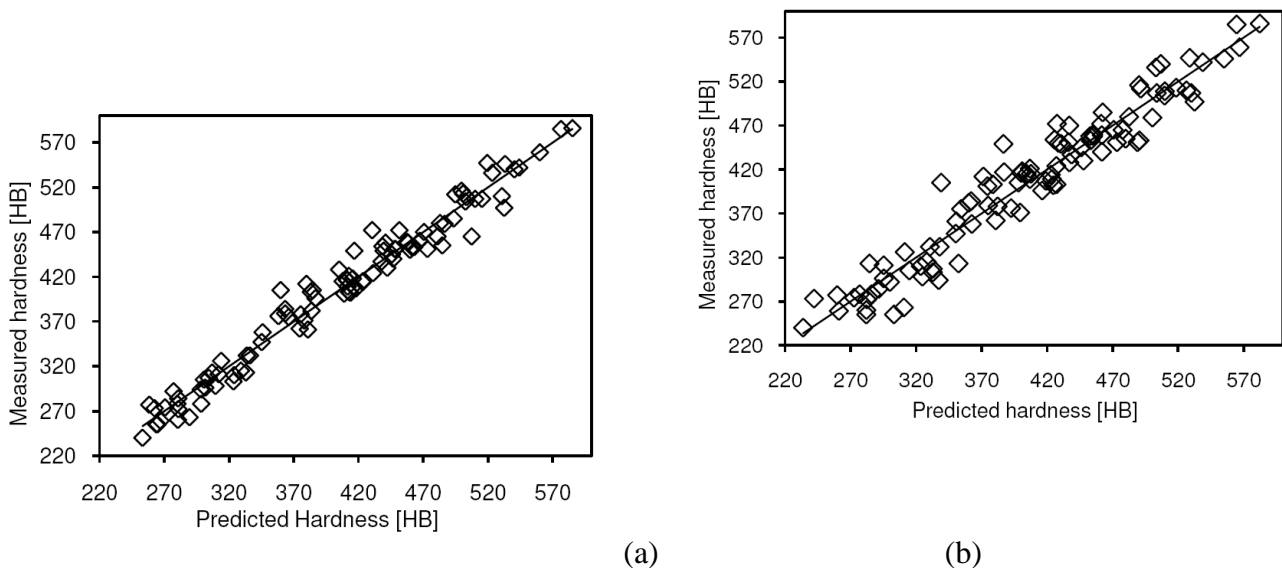


Figur 34. EMAT testförfarande



Figur 35. Sambandet mellan hårdheten och hastigheten av transversell ultraljudvåg för kupongen C

Vidareundersökning av erhållna resultat visade också att det för ett martensitiskt stål är möjligt att uppskatta hårdheten med hjälp av multivariat regression om ultraljudhastigheten och kemisk sammansättning är kända. Resultatexempel visas i Figur 36 och detaljerna kan hittas artikeln T Łukomski and T. Stepinski, “Application of resonant ultrasound spectroscopy in diagnostics of rings”) [3].



Figur 36. Hårdhetsskattning baserad på uppmätt hastighet av transversell våg; (a) när anlöpningsstemperatur och 14 grundämnen i stålsammansättningen är kända och (b) när bara 5 grundämnen är kända

Samarbetet med industripartnern SSAB EMEA Oxelösund var mycket gott. De planerade försöket på ett mycket professionellt sätt och levererade välgjorda prover. Dessa prover värmebehandlades i flera steg i SSABs laboratorium och skickades till Uppsala för ultraljudundersökningar. SSAB EMEA Oxelösund deltog aktivt i tekniska diskussioner samt behandling av erhållna resultat.

4.2.3 σ -fas innehåll i rostfritt stål, Sandvik Materials Technology

Sandvik Materials Technology levererade ett stort antal stålprover för RUS undersökningar. Dessa prover i form av parallelepipeder med noggrant kontrollerade dimensioner tillverkades med gnistmetoden för att undvika övervärmning vilken möjligen kunde uppstå vid skärande bearbetning. Flera serier av prover med olika halter av σ -fas levererades. Bestämning av σ -fas utfördes av Sandvik Materials Technology.

RUS undersökning utfördes av 30 st rostfria prover med σ -fas innehåll varierande från 0 till 4.7%. Resonansanalys gav ingen tydlig korrelation mellan resonansfrekvenserna och σ -fas mängd. Vidare undersökning tyder på att det är svårt att tillverka små provbitar med bestämd halt av σ -fas.

4.2.4 Bainitinhåll, Ovako Hällefors

Ovako Hällefors levererade en serie provbitar med varierande bainithalt.

RUS undersökning utfördes av 7 st stålprover med bainitinhåll varierande från 0 till 30%. Undersökningen gav inga tydliga resultat för dessa bainithalter som kunde levereras av Ovako.

4.3 Swerea MEFOS, elektromagnetiska mätmetoder

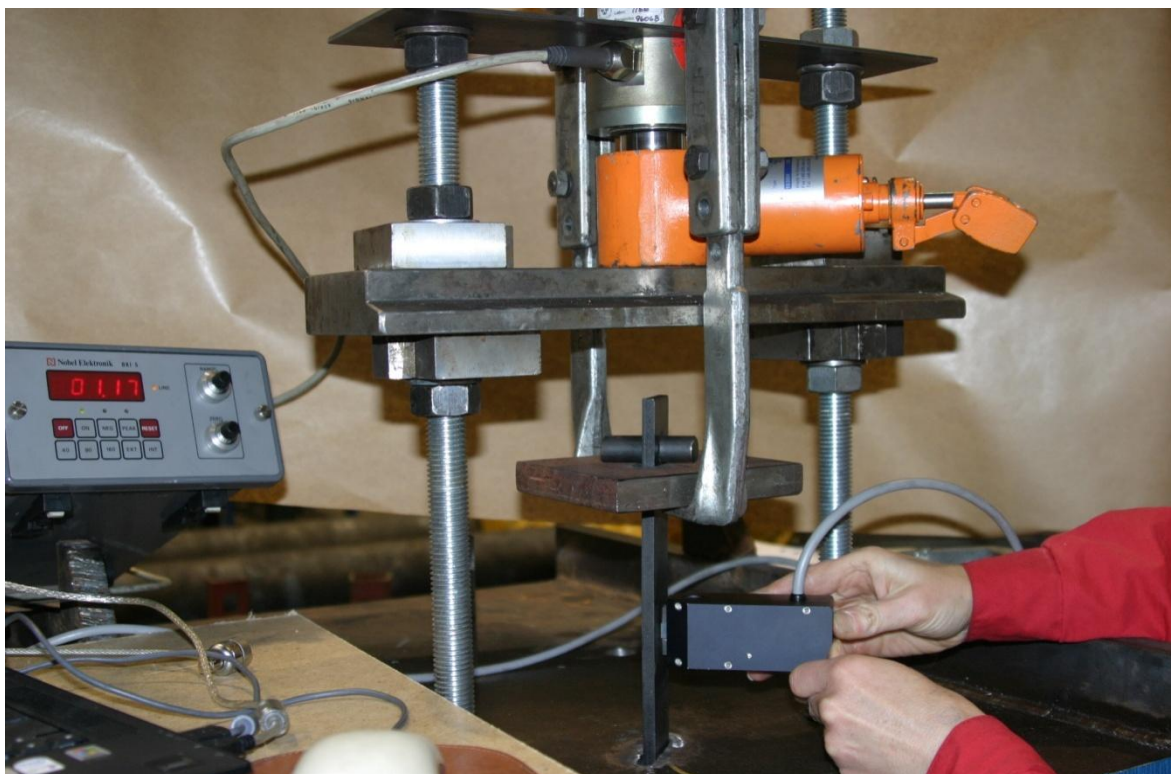
Försök har gjorts för att undersöka möjligheten att med elektromagnetiska mätmetoder bestämma ferromagnetiska materials mekaniska egenskaper såsom t ex sträck- och brottgräns samt inre spänningar. Egenskapsvariationer undersöktes på material som tillhandahållits av industriföretagen som deltagit i undersökningen. Ett stort arbete att egenskapskaraktärisera proven har gjort av industriföretagen SSAB EMEA Borlänge och Scania CV Södertälje. Vi har även fått hjälp från SKF Manufacturing Development Centre i Göteborg med hjälp att mäta med deras mikromagnetiska mätutrustning 3MA.

4.3.1 Bestämning av inre spänningar för 8mm tjockt varmvalsat band

SSAB EMEA Borlänge, levererade en varmvalsad plåt med sträckgränsen 700MPa, tjocklek 8 mm och uppgiften gick ut på att försöka kvantifiera de inre spänningarna i plåten i levererat, grovriktat tillstånd. Därefter avspänningsglödgades plåten och de inre spänningarna mättes åter upp. För att detta skulle kunna genomföras måste en noggrann kalibrering av utrustningen genomföras.

4.3.1.1 Kalibrering av MikroMach för bestämning av inre spänningar

För att kalibrera utrustningen måste ett prov med liknande egenskaper som den plåt som ska undersökas användas och ges de egenskaper som sedan ska mätas upp hos provplåten. I detta fall måste vi med andra ord ta en bit av plåten och sätta den under mätbara drag resp. tryckspänningar och då också mäta de variationer i de mikromagnetiska egenskaper som då uppträder. Kalibrering gjordes i en kalibreringsutrustning bestående av en ram med en domkraft och en lastcell där provstavar kunde belastas både i drag och tryck. Belastningar upp till ca +/- 250 MPa användes.



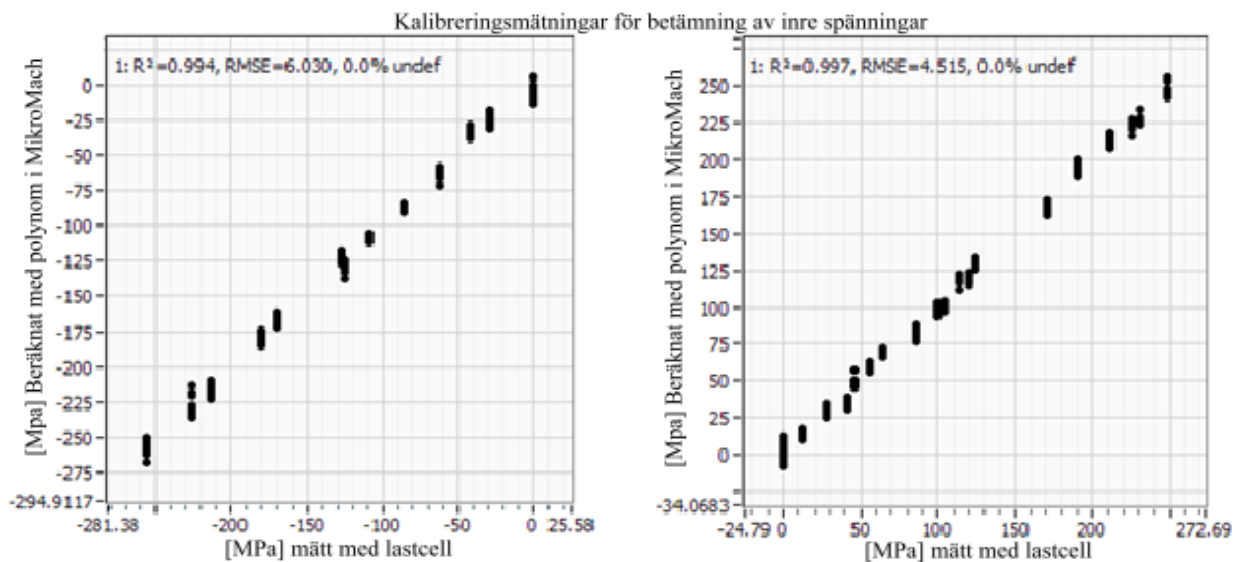
Figur 37. Mätjigg för drag och tryckspänningar, dragspänning mätta med MikroMach



Figur 38. Kalibreringsmätningar, tryck. Eftersom den relativt tunna provstaven ville knäcka ut kapades den ned till 60 millimeters längd.

mätningar på dragspänningar och mätningar på tryckspänningar så blev kalibreringen utförd i två separata delar, som därefter sattes ihop till en kalibrering.

Med hjälp av MikroMach-systemets regressionsanalys skapades ett polynom som gav god passning mot spänningstillståndet i materialet. Detta polynom användes sedan för bestämning av plåtens inre spänningar. Kalibreringens mätdata utvärderat i Figur 39.



Figur 39. Kalibreringsutfall för tryck respektive dragspänningar på prov av en varmvalsad plåt med 700 MPa sträckgräns och tjocklek 8mm

Det polynom som i detta fall erhöles innehåller värden som indirekt eller direkt är beroende av förändringar i Barkhausenbruset, och förändring av den ”harmoniska distorsionen”. Dessa parametrar har direkta fysikaliska kopplingar mot drag- och tryckspänningar i gitterstrukturen i materialet. Därutöver finns även en koppling mot förändringar i virvelströmsdelen den bakomliggande fysiken dock ännu inte undersökts.

Beträffande kalibrering se även 5.3.1 Kalibrering av MikroMach.

4.3.1.2 Uppmätning av inre spänningar varmvalsad stål 700 MPa, 8 mm

En oriktad varmvalsad plåt med sträckgräns 700 MPa och med längden 1200 mm, bredden 1500 mm och tjockleken 8 mm tillhandahölls av SSAB EMEA. Vid uppmätningen av plåten ritades ett rutnät upp och vi undvek att placera mätpunkter för nära plåtens kant. Tester visade att mätvärden mycket nära kanten inte är säkra då magnetfältet påverkas av kanten. Man bör därför undvika att mäta alltför nära kanten (< 25 mm) på alla plåtar. Vi utförde mätningar i valsningsriktningen, 0°, och även tvärs valsningsriktningen, 90° på både över och undersida, se Figur 40.



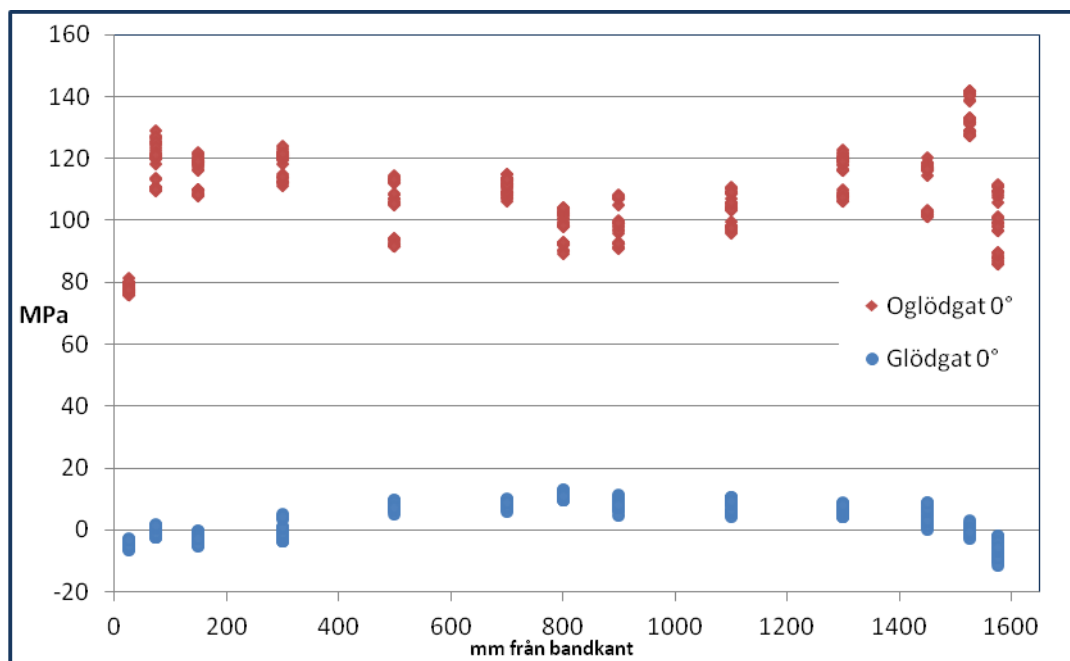
Figur 40. Varmvalsad provplåt 700 MPa oglödgd och mätprobe till MikroMach

4.3.1.3 Resultat oglödgd jämfört med glödgd plåt

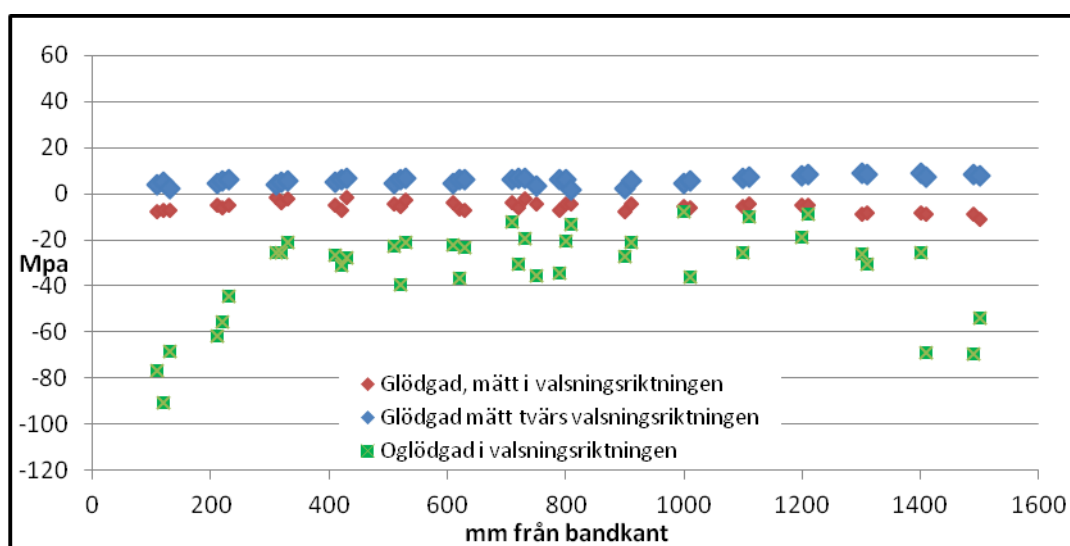
Vid uppmätningen av den oglödgade plåten hittades, inte helt oväntat, stora inre spänningar i valsningsriktningen. Ena sidan hade kraftiga tryckspänningar och den andra hade kraftiga

dragspänningar. Detta är helt enligt vad som kan förväntas när en rulle öppnas och endast grovriktas utan genomriktning, Figur 41 och Figur 42.

Dessa spänningar var i det närmaste helt borta efter glödgningen vilket inte heller kan anses som förvånande. Utrustningen hade inga problem att detektera denna skillnad och det är egentligen inte förvånande då man ser hur stora skillnader i spänningstillstånd det egentligen är. De predikerade spänningarna höll sig inom kalibreringsområdet och prediktionen för den glödgade plåten verkar realistiskt eftersom den ligger runt noll i ett jämviktstillstånd vilket överensstämmer med det förväntade beteendet.



Figur 41. Mätt spänningsfördelning i valsningsriktningen på plåtens översida, oglödgd och glödgd



Figur 42. Mätt spänningsfördelning i plåtens undersida före och efter glödning

4.3.1.4 Utvärdering av mätningar inre spänningar

Den oglödade plåten uppvisar stora skillnader i breddled och stora skillnader för över och undersida, med övervägande dragspänningar på ena sidan och lika tydliga tryckspänningar på den andra sidan. Detta bör kunna härledas till att plåten varit hasplad till rulle och endast grovriktats alltså bara rätats ut utan genomriktning. Detta torde ge upphov dessa uppvisade skillnader i inre spänningar före glödning.

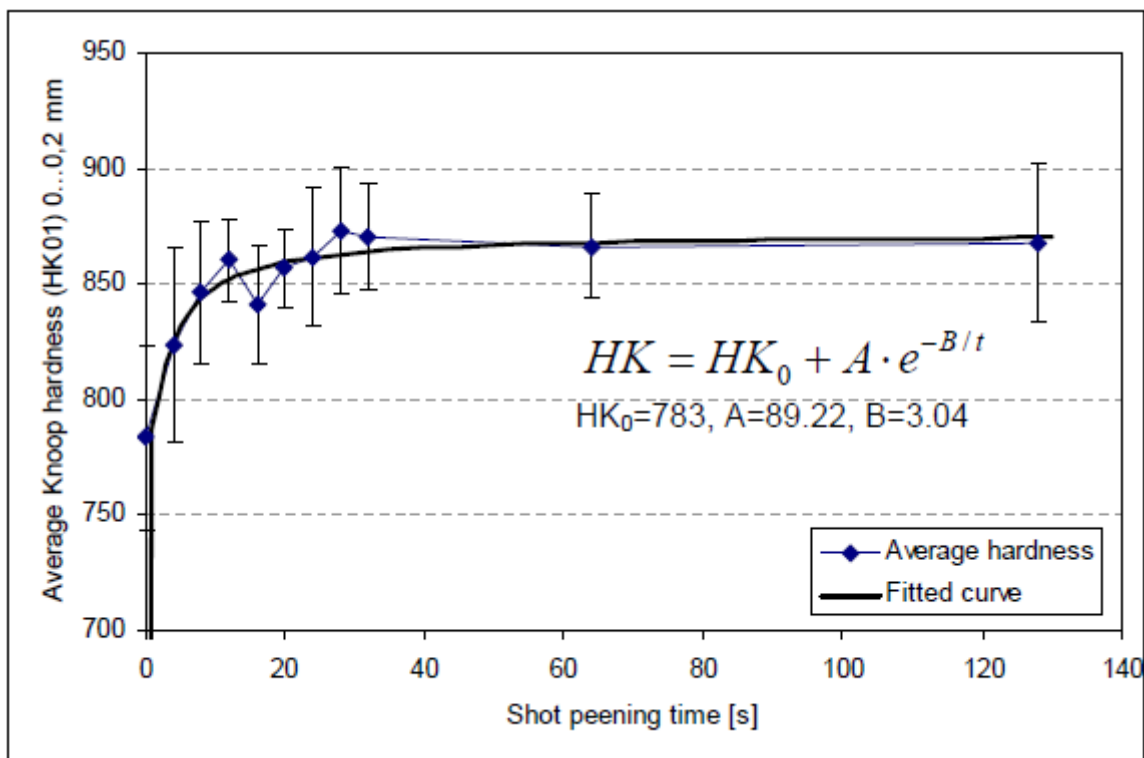
Den glödade plåten uppvisar ett jämnare mätresultat vilket inte kan ses som speciellt förvånande. Mätningarna var utan tvekan klart entydiga. Förvisso var skillnaderna i spänningstillstånd stora, och det gav också ett klart och entydigt resultat, men en av de intressantare aspekterna var att den glödade plåten verkligen fick ett uppmätt värde mycket nära 0 MPa.

4.3.2 Mätningar på sätthärdade stålkuleblästrade kugghjul

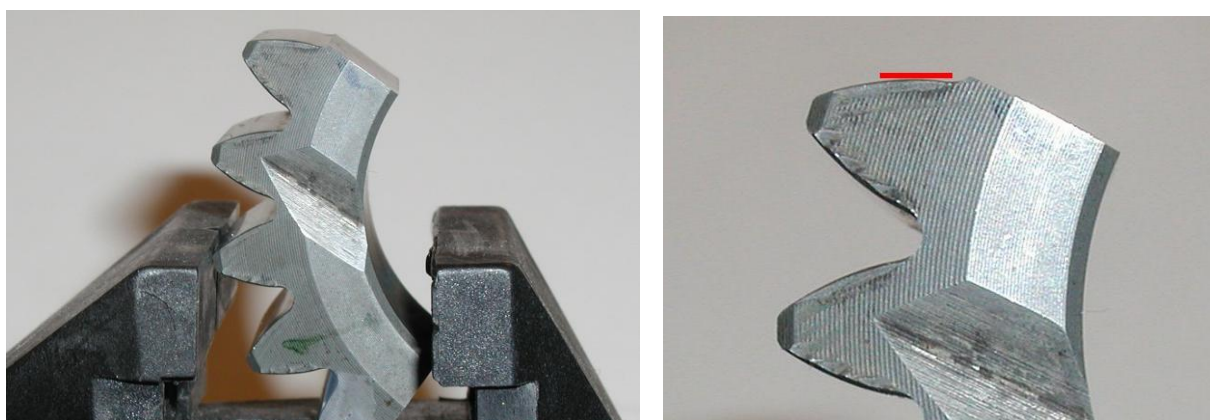
Mätningarna skulle visa om det är möjligt att med hjälp av att mäta upp de mikromagnetiska egenskaperna hos ett sätthärdat stålkuleblästrat kugghjul avgöra dess motståndskraft mot utmattningsbrott. En tillverkare av kugghjul och transmissioner tillverkade flera identiska uppsättningar ”referenskugghjul” för såväl oförstörande som förstörande provning. Dessa kugghjul hade varierande blästringstid från 0 till 128 sek. Vi erhöll en av dessa uppsättningar. För att kunna mäta på kugghjulets flank med standardmätgivaren för MikroMach så måste kugghjulen delas. De kapades med en vattenkyld provprepereringskap i tre delar vilket också gav sex mätytor per kugghjul.

Innan Swerea MEFOS hade fått sitt MikroMach-instrument utförde Jonas Hallbäck, SKF Group, Manufacturing Development Centre mätningar med deras 3MA-instrument bl.a. för att avgöra huruvida det skulle finnas någon möjlighet att hitta några magnetiska egenskaper som kunde korreleras mot kugghjulens mekaniska egenskaper. Dessa mätningar var av stor hjälp då de kunde uppvisa klara samband mellan flera magnetiska parametrar och blästringstid. Det som kunde anses en aning förbryllande var det att mätningarna visade en exponentiell ökning i Barkhausenbruset ganska lik kurvan för Knoophårdhetsmätningarna, se Figur 43. Detta låter ju som en god korrelation, men enligt teorierna kring Barkhausenbruset så borde det vara ett omvänt förhållande. Detta är definitivt något som bör undersökas/utredas.

Beträffande kalibrering se även 5.3.1 Kalibrering av MikroMach.



Figur 43. Knoopårdhet (medel) plottat mot blästringstid



Figur 44. Till vänster ett delat kuggjul. Till höger, den välvda ytan, kuggflanken som undersöks.

4.3.2.1 Kalibrering av MikroMach för stålkuleblästrade kuggjul

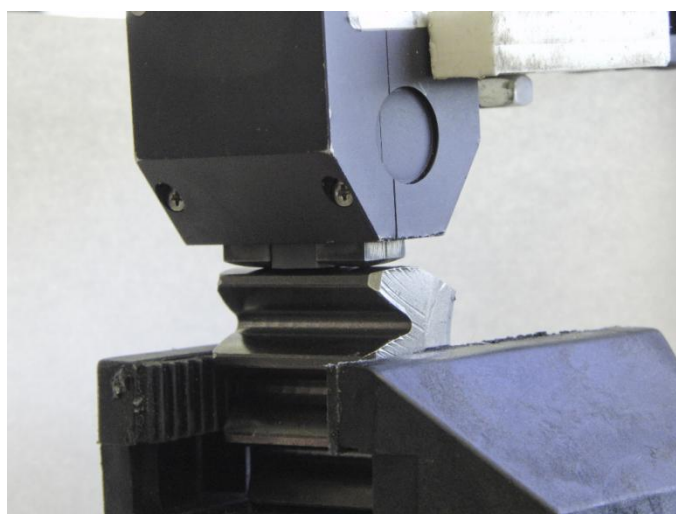
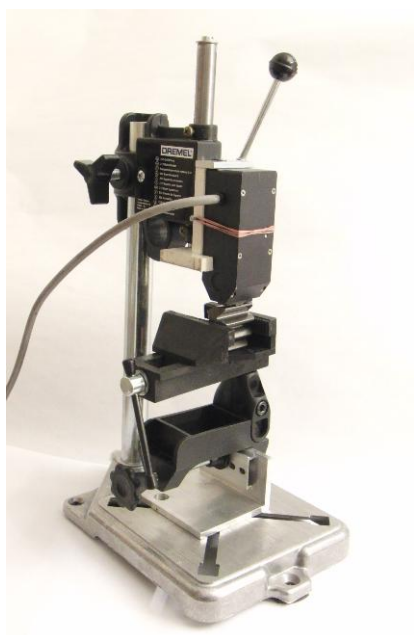
Man börjar med en serie prover med kända egenskaper och utifrån dessa kalibreras instrumentet varefter man verifierar kalibreringen på en omgång kända prover. Vi hade tillgång till en uppsättning blästrade kuggjul som kapades med en vattenkyld provprepareringskap för minsta materialpåverkan. Då själva kapytan inte skulle undersökas kan man anta att delningen gjordes utan påverkan av materialegenskaperna på kuggflanken där undersökningen skulle göras. En fjärdedel av varje kuggjul användes som kalibreringsmaterial Figur 45. Då endast frilagda kuggflanker Figur 44 kunde undersökas så fick vi därigenom två kalibreringsytor per kuggjul.



Figur 45. Kalibreringsbitarna

4.3.2.2 Mätningar och mätresultat

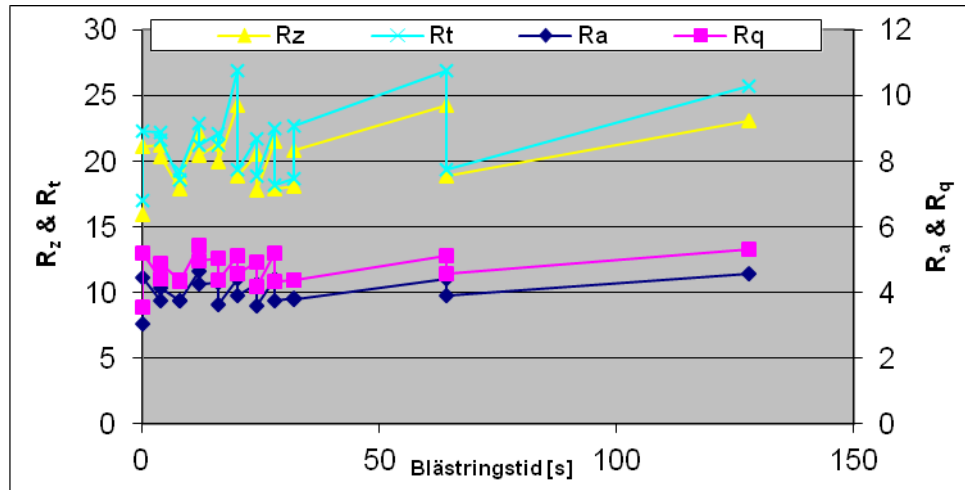
Sedan vi skaffat oss mera erfarenhet av mätningar med MikroMach har vi sett att man måste ha klart repeterbara mätförutsättningar. Speciellt i detta fall när det är frågan om en välvd yta som ska mätas på. För att få tillförlitliga mätningar krävs en bra hållare av probe och mätobjekt Figur 46. Det innebär att det är helt nödvändigt att tillverka en mätjigg så att förutsättningarna är repeterbara inför varje mätning.



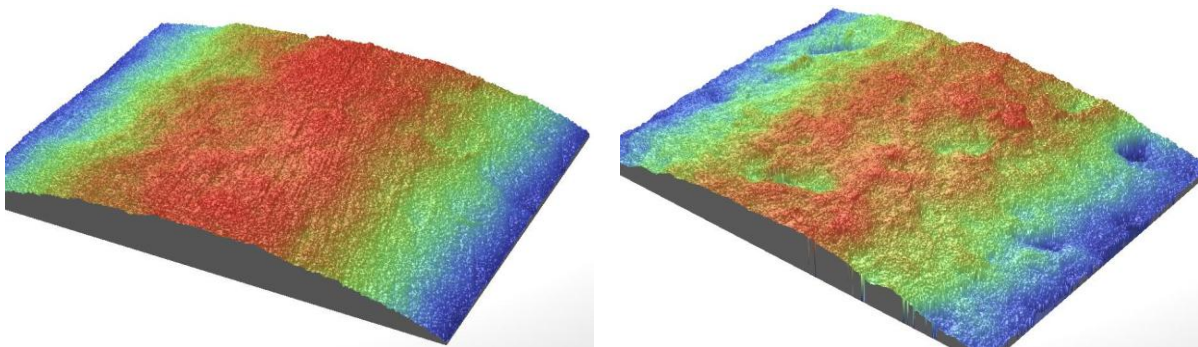
Figur 46. Mätupställning vid MikroMachmätning av kugghjul

4.3.2.3 Mätresultat ytfinhet

Eftersom bl.a. ytfinheten på provobjektet visat sig ha inverkan på mätresultatet vid mätningar med MikroMach så gjordes även mätningar av ytfinheten i det område som mättes med såväl 3MA som MikroMach. Det enda som kunde iaktas vid lång blästringstid var att det ibland sporadiskt förekom större gropar på ytan, se Figur 48 (ytan kraftigt förstörd). För övrigt verkade inte den mätbara ytfinheten förändras nämnvärt av blästringstiden (Figur 47).



Figur 47. Ytfinhetsparametrar plottade mot blästringstid



Figur 48. 4 sek blästring, resp 128 sek blästring (Bilder från Veeco Wyko, Optisk Profilmätare)

4.3.2.4 Utvärdering av mätningar på stålkuleblästrade kugghjul

Efter kalibreringen används systemets egen ”Calibration Wizard” för att utföra regressionsanalysen av de lagrade mikromagnetiska egenskaperna. Den varnar även för ev felaktigheter som kan ha inträffat under kalibreringen, t.ex. om någon parameter inte blivit registrerad eller på något annat sätt blivit korrupt.

4.3.2.5 Regressionsanalys, kalibrering mot utmattningsgräns

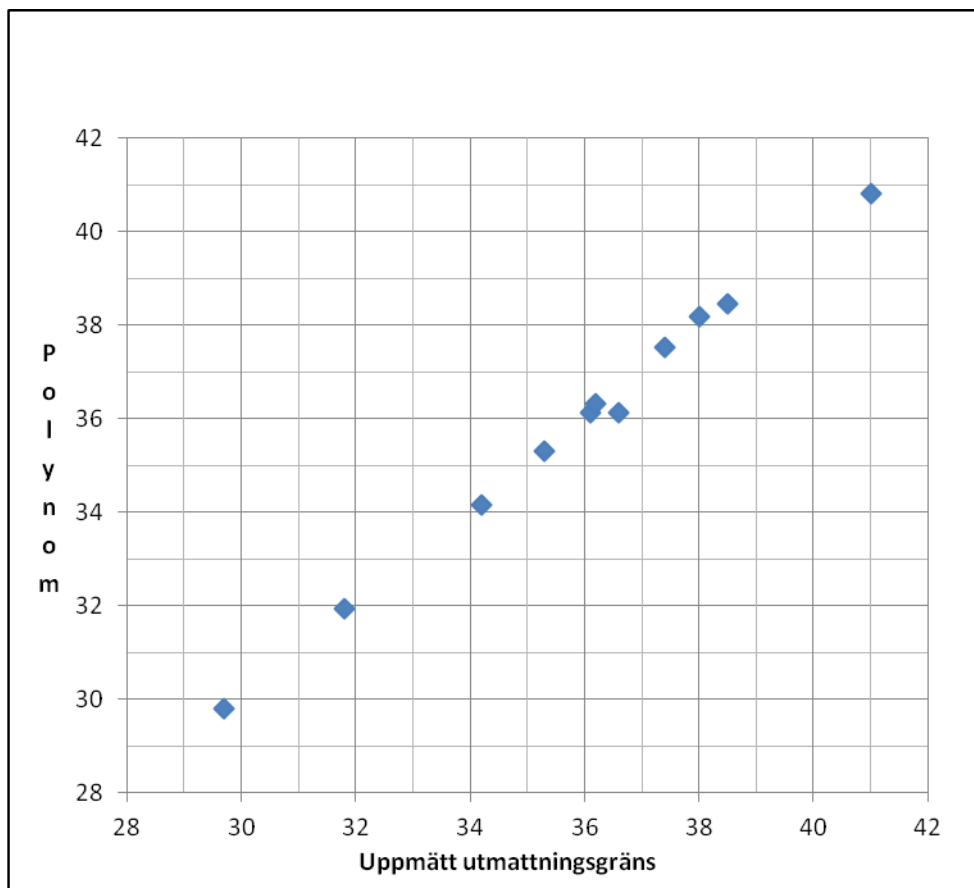
Kalibrering mot en uppsättning kugghjul, där alla kugghjul mättes två gånger på var sida med fem mätcykler, totalt 220 mätvärden. En regressionsanpassning gjordes med MikroMachsystemet mot de kända uppmätta utmattningsgränsvärden som Scania CV tagit fram. Med hjälp av regressionsanalysen skapades ett polynom som gav följande statistiska anpassningsresultat $R^2=0.997$, $RMSE=0.177$ se Figur 49. När vi betraktar enskilda

mätpunkter i Figur 49 kan vi se att vi har en god passning mot uppmätta värden. Vi ser att polynomets standardavvikelse ligger i nivå med eller lägre än de resultat man har fått från de gjorda utmattningsproven.

Beträffande kalibrering se även 5.3.1 Kalibrering av MikroMach.

Tabell 8 Uppmätt utmattningsgräns och polynomanpassning från MikroMach

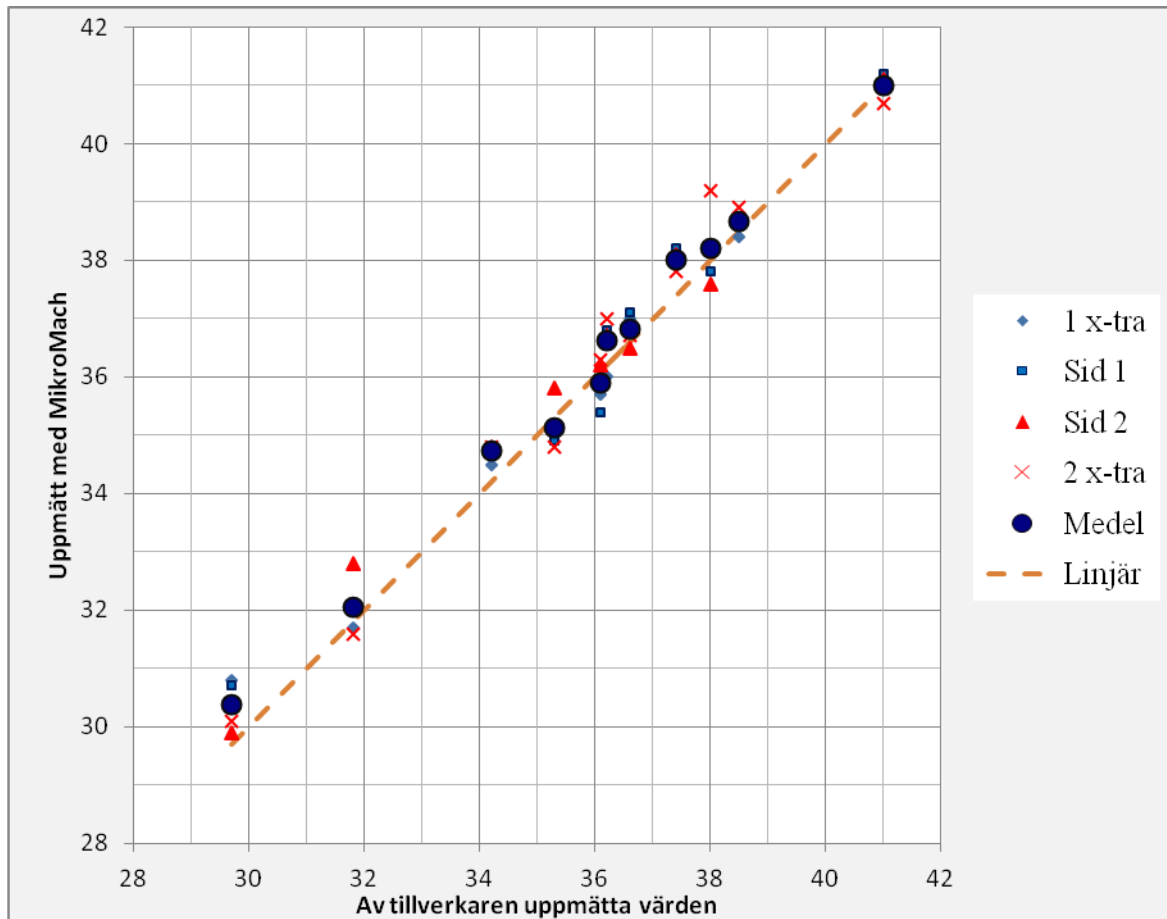
Tillverkare Uppmätt utmattningsgräns [kN]	Stdev uppmätt	Antal kugghjul i utmattnings- prov	”Uppmätt” MikroMach- Polynom	MikroMach- Polynom Stdev	Antal mätningar och antal mätcykler (1 kugghjul)
29.7	0.745	15	29.80	0.47	4 x 5 = 20
31.8	1.006	21	31.93	0.38	4 x 5 = 20
34.2	1.433	17	34.16	0.47	4 x 5 = 20
35.3	0.752	12	35.32	0.33	4 x 5 = 20
36.1	0.669	13	36.14	0.40	4 x 5 = 20
36.2	0.412	3	36.33	0.20	4 x 5 = 20
36.6	0.737	14	36.14	0.32	4 x 5 = 20
37.4	0.443	13	37.52	0.29	4 x 5 = 20
38.0	0.383	9	38.18	0.23	4 x 5 = 20
38.5	0.627	8	38.46	0.20	4 x 5 = 20
41.0	0.484	9	40.83	0.50	4 x 5 = 20



Figur 49. Uppmätt utmattningsgräns och polynompassning från MikroMach

4.3.2.6 Verifiering av regressionsanalys

Efter att ha erhållit regressionspolynomet sattes det in i MikroMach och ytterligare en uppsättning prover mättes upp enligt samma rutiner som vid kalibreringen av mätaren. Det innebar att varje prov mättes med värde från fem mätcykler vid varje mätpunkt. Varje prov mättes 2 gånger på varje sida med lyftning och återplacering av mätproben mellan mätningarna. Detta innebär att det blev 4 medelvärden som i sin tur bildar ett medelvärde, på varje provbit, Figur 50.



Figur 50. MicroMach-mätningar på referensprover från samma uppsättning kugghjul, (ej kalibreringsbitarna).

4.3.2.7 Utvärdering av mätningar på stålkuleblästrade kugghjul

Man bör, trots mätresultaten i Barkhausenbruset (BN), kunna anse att det är möjligt att använda sig av mätning av mikromagnetiska egenskaper med dessa mätinstrument, MikroMach eller 3MA utvecklade av Fraunhoferinstitutet, för att bestämma egenskapsförändringar hos sätthärdade stålkuleblästrade kugghjul. De viktigare faktorerna är förutom BN den harmoniska analysens olika delfaktorer, vilka kan tolkas som en ökande ythårdhet på materialet. De mätningar som gjordes på referensmaterialet visade att det gick att få tillförlitliga mätvärden trots den svåra mätsituationen. Det är emellertid viktigt att göra noggranna stabila mätuppställningar som förebygger att man inför störningar i kalibreringen. Om man hade en dedikerad mätprobe för just dessa kugghjul och kuggflanker så skulle man utan tvekan få mätförhållanden för både kalibrering och mätning som skulle bli stabilare. Slutsatsen måste bli att det är klart möjligt att ”mäta” utmattningshållfasthet via de mikromagnetiska egenskaperna, men att det krävs en specialtillverkad mätgivare för att garantera stabila mätningar.

4.3.3 Ändeffekter, hållfasthetsvariation i ändar på varmvalsade coils

Målsättningen med mätningarna är att se huruvida det är möjligt att använda utrustningen till att avgöra var materialets egenskaper börjar bli jämna i änden av bandet och för att se var materialet håller godkända egenskaper. Vi ska även försöka visa hur stor spridning som blir på mätningarna beroende på variationer i andra egenskaper i materialet som vi kan förvänta oss, t.ex. inre spänningar.

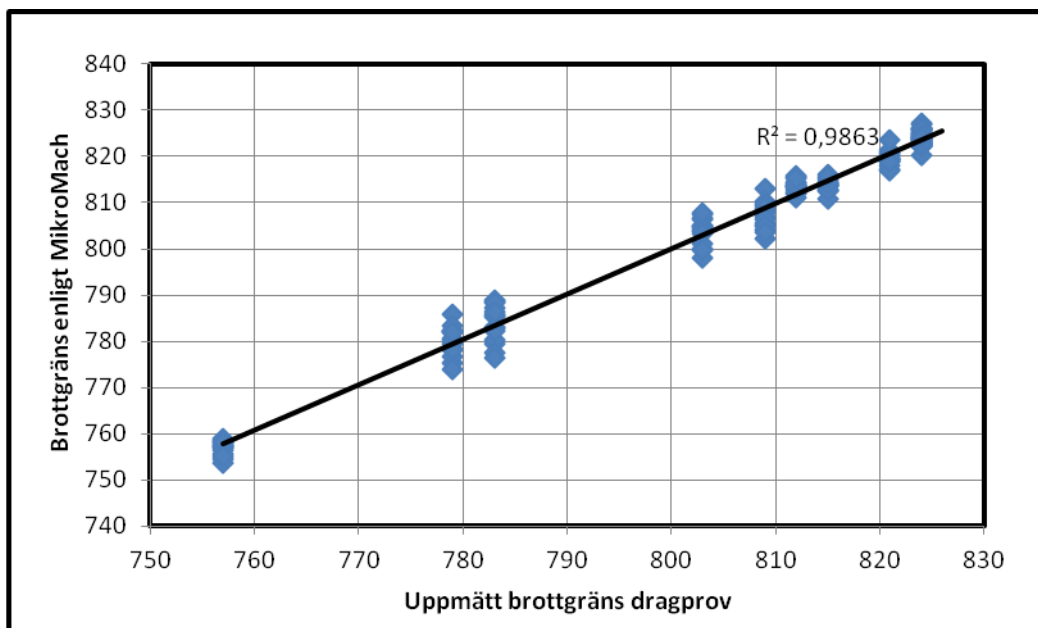
4.3.3.1 Kalibrering för sträckgräns och brottgräns

I detta fall fanns endast ett fåtal provbitar att tillgå vilket medför att mätningarna i sig också fungerar som bas för kalibreringen. Först utfördes mätningarna med tio mätningar med fem mätcykler vid varje mätning. Utifrån dessa mätningar gjordes en kurvanpassning/kalibrering med systemets regressionsanalys mot brottgräns för proverna på 10 mm. 3mm-proverna kalibrerades mot sträck och brottgräns.

4.3.3.2 Mätningar och mätresultat

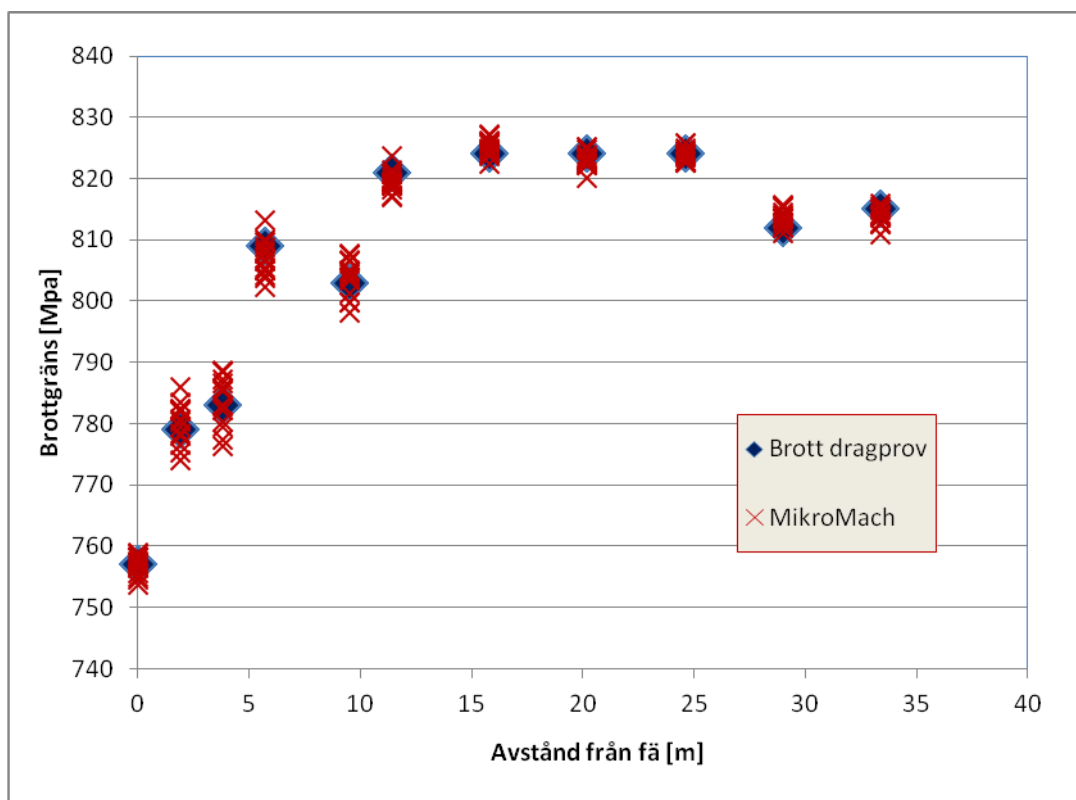
4.3.3.2.1 Varmvalsat stål 700 MPa, 10mm

Efter kalibrering mot materialet och polynom Anpassning av de magnetiska egenskaperna mot de för proverna uppmätta brottgränserna kunde vi börja mäta utfall från mätaren. Detta blir emellertid lite vanskligt då det blir samma bitar som vi kalibrerat mot som vi även mäter på för verifiering. Vi ville då visa hur stor spridning mätningarna fått genom att göra nya och mera omfattande mätningar. Med de 11 provbitar vi hade på detta material utförde vi 15 mätningar per provbit för att se hur mycket mätningarna sprider. Vid varje mätning gör utrustningen tio mätcykler som medelvärdesbildas. Därefter har mätproben lyfts, återplacerats i samma punkt och ytterligare en mätning med tio mätcykler. Detta upprepades 15 gånger för varje prov. Resultatet av de uppmätta brottgränserna på proven från bandänden jämfördes sedan med dragproven se Figur 51.



Figur 51. Repeterbarhet mot uppmätt brottgräns hos dragprov.

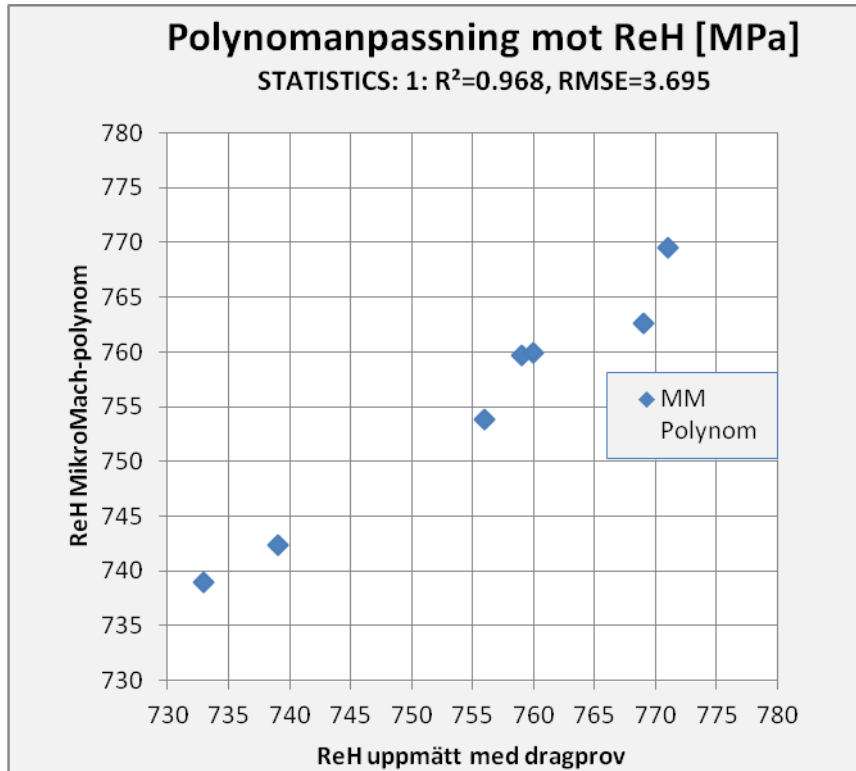
Spridningen på de med MikroMach mätta proverna är i storleksordningen +/-10MPa eller mindre och jämförbar med spridningen för dragprover utförda i dragprovmaskin. När utfallet plottas mot avstånd från förstaände gav det resultat enligt Figur 52



Figur 52. Uppmätta förstaändesprover 10mm varmvalsat stål 700 MPa

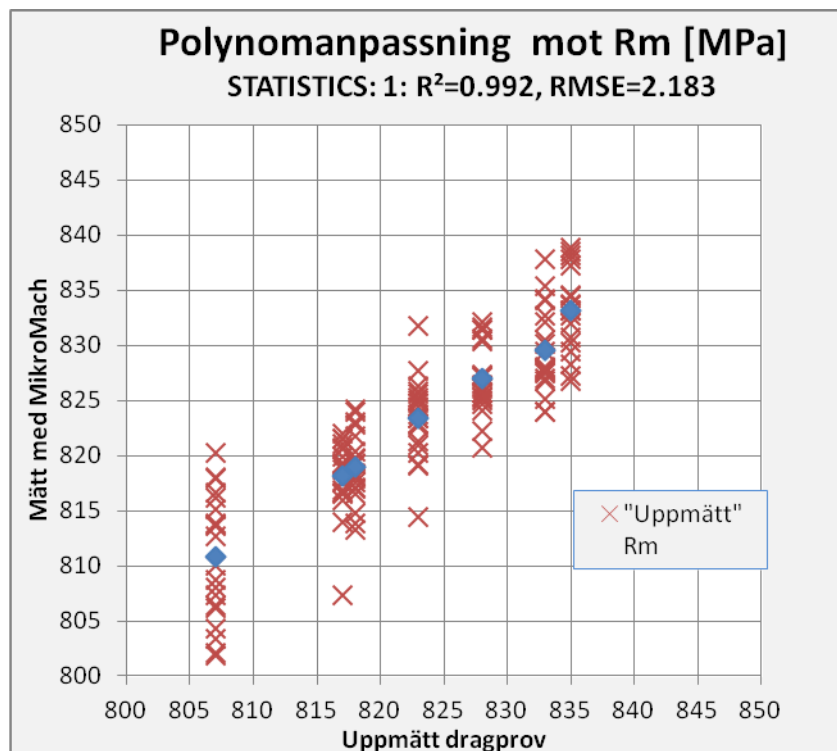
4.3.3.2.2 Varmvalsat stål 700 MPa, 3mm

Mätningarna som gjordes på 3 mm materialet försökte efterlikna de förutsättningar och den spridning som normalt finns i ett material. Vi hade konstaterat att om man mätte på olika ställen på samma provbit så kunde man få varierande värden. Därför utfördes mätningarna på 3mm:s materialet något annorlunda än de tidigare utförda. Nu mättes på fyra olika ställen på provbitarna. På ca 20%, 40%, 60% och 80% av provets längd. En annan skillnad var att i detta fall användes en mätjigg som ger konstant anliggningsstryck och alltid vinkelrätt mot materialet. Polynommanpassning av mätningen av de mikromagnetiska egenskaperna mot sträckgränsen ReH gav följande resultat, se Figur 53.



Figur 53. Polynomianpassning mot sträckgräns, ReH

Som vi ser så får vi inte en lika bra passning som vi hade på brottgräns på 10mm:s material, men samtidigt så vet vi att uppmätt sträckgräns lika väl som brottgräns har en viss spridning.



Figur 54. Polynomianpassning och mätvärden mot brottgräns, Rm 700 MPa, 3mm

När vi sedan går vidare med Rm Figur 54, brottgränsen på DX 700 MC 3mm, så finner vi att polynom Anpassningen ser bättre ut.

Om vi tittar på mätningarna och spridning kan vi se att spridningen understiger ± 10 MPa, detta trots att mätningarna är avsiktligt utspridda på hela provbitarna. Det stabila mätresultatet får till viss del tillskrivas användandet av en ny provjigg som tidigare nämnts.

4.3.3.3 Utvärdering av mätningar ändeffekter

De mätningar som gjorts utgör naturligtvis inte något stort statistiskt underlag, men man kan ändå anse mätresultatet som bra. När man studerar träff mot uppmätta brottgränser för respektive prov kan man se att spridningen är mindre än ± 10 MPa, vilket är av samma storleksordning som den spridning man har på brottgränsen vid dragprov. Anpassningen på kalibreringskurvan för 10 mm:s proverna får anses som god med $R^2 = 0,968$. Anpassningen för 3 mm:s proverna är något bättre med $R^2 = 0,992$ vilket kan anses som ett mycket bra utfall. Detta gäller alltså för de medelvärdesbildade mätningarna, som får anses som den normala mätmetoden för detta instrument.

De parametrar som kom med i polynomet är direkt eller indirekt beroende av Barkhausenbrus och parametrar som kommer från den harmoniska analysen, vilka båda har direkta kopplingar mot hållfasthet/hårdhet.

Beträffande kalibrering se även 5.3.1 Kalibrering av MikroMach.

4.4 Industrins insatser för projekten

En noggrann utvärdering/karakterisering av materialproverna är själva grunden till de forskningsresultat som kommit fram i detta projekt. Karakteriseringen av prover är ett tidskrävande arbete som kräver systematik och noggrannhet. Det goda samarbetet med det mycket omfattande arbetet med provuttag, karakterisering och preparering av materialprover som industriföretagen utfört har varit till ovärderlig hjälp för forskningsutförarna.

SSAB EMEA Borlänge gjorde ett stort antal provuttag speciellt anpassade för Swerea MEFOS försök med MikroMach, och för Swerea KIMABs försök med Laserinducerat Ultraljud. För att installera det utrustningen i formatsträcka 3 krävdes att klippsträckan stängdes för att underhållspersonal skulle kunna installera det speciella mätbord som behövdes för mätutrustningen, Figur 26. Det gjordes även extra provuttag på det material som man mätte på med laserinducerat ultraljud.

SSAB EMEA Oxelösund tillverkade ett stort antal preparerade prover till alla tre forskningsutförarna. Till Uppsala Universitet hanterades, behandlades och mättes många prover för försöken med hårdhetsbestämning med EMAT.

Scania CV Utförde ett stort antal utmattningsprov för bestämning av utmattningsgräns och gjorde även avancerade hårdhets och egenskapsmätningar. Detta utfördes på ett stort antal provserier för att erhålla ett bra statistiskt underlag för Swerea MEFOSs utvärdering av stålkuleblästrade kugghjul med MikroMach.

Sandvik Materials Technology, gjorde provuttag med tidskrävande gnistbearbetning till Uppsala Universitet. Även karakterisering av alla uttagna prover, bl.a. med avseende på olika fasandelar, utfördes.

Ovako Hällefors gjorde provuttag som karakteriserades med avseende på fasandelar för försök hos Uppsala Universitet.

SKF levererade stålringar i olika anlöpta tillstånd till Uppsala Universitet för hårdhetsutvärdering med RUS. De utförde även ingående materialundersökningar vad gäller hårdhet och struktur på dessa ringar.

SKF utförde även mätningar med mätutrustningen 3MA som ett första test för undersökning om möjligheterna till karakterisering av stålkuleblästrade kugghjul med hjälp av magnetiska egenskaper.

5 SLUTSATS OCH DISKUSSION

5.1 Laserinducerat ultraljud (LUS), Swerea KIMAB

Laserultraljud visar stor potential för materialkaraktisering både vad gäller uppskattning av mikrostruktur samt mekaniska egenskaper. Projektet har visat att mekaniska egenskaper kan direkt korreleras till både longitudinella och transversella utbredningshastigheter av ultraljudet. Forskningen är dock långt ifrån en komplett förståelse för den teoretiska härledningen mellan dessa observationer men en viktig grund är lagd genom att statistiskt fastställa relationen mellan vågutbredningshastighet och materialets mekaniska egenskaper. Resultaten visar att det finns ett stort behov av en metod som kan mäta upp mycket små hastighetsskillnader med en avvikelse som inte överskrider mycket mer än 10m/s. Ifall traditionell hastighetsberäkning med en extern tjockleksmätning skulle göras skulle inte tjockleksvariationer på över 16µm tolereras för en 10mm tjock plåt och ännu mindre för tunnare plåt. Swerea KIMAB har till stor del i projektet fokuserat på att utveckla metodik för mätning av vågutbredningshastighet för att möjliggöra hastighetsuppskattning i en industriell miljö.

Denna studie har även visat att skillnader i mikrostruktur kan härledas till ultraljudets frekvensinnehåll samt dämpning av efterföljande ekon. Det har dock visat sig att viss problematik vid noggrann uppmätning av dessa storheter finns. Det kan kommenteras att det finns installationer i industriell miljö som utnyttjat relationen mellan frekvensberoende dämpning och mikrostruktur för att uppskatta kornstorlek vilket innebär att den ovanstående problematiken går att komma förbi.

5.1.1 Industriell tillämpning

Detta projekt har visat att en industriell installation av ett laserultraljudsystem i en klippsträcka för varmvalsade band är möjlig. Laserultraljudmätningar som utfördes på betat material och även på vissa stålsorter med vidhäftande glödskaal visade att det fungerade på dessa. Mätningarna lyckades och signalerna som erhöles innehöll tillräckligt hög signalstyrka för att viss relevant information skulle kunna extraheras från dem. Installationen visade dock att för material med ett tjockt löst oxidlager var mätningarna avsevärt mer problematiska. För dessa stålsorter krävs det någon form av lösning, antingen genom ytterligare rengöring av ytan eller genom installation av utrustningen i en position i linjen där detta lösa oxidlager inte finns på bandet. På grund av detta lyckades inte heller några mätningar på de specifika höghållfasta bairitiska stålen som var målet med installationen.

Försöken visade att den använda laserultraljudutrustningen måste modifieras ytterligare och göras mera robust för en industriell installation.

Försöken visade att den använda laserultraljudutrustningen måste modifieras ytterligare och göras mera robust för en industriell installation.

5.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT, Uppsala Universitet

Projektmålet uppfylldes såtillvida att relationerna mellan ultraljudspektra i RUS undersökning och förekommande struktur och egenskaper i form av variationer i hårdhet blev fastställda. Sammanfattningsvis kan vi säga att RUS har visat sig vara en genomförbar metod för att mäta hårdhetsvariationer i stålringar baserad på skift i resonansfrekvenser. RUS kan tillämpas för kvalitetskontroll genom övervakning av en resonansstopp inom ett relevant frekvensband. Inom detta projekt har inte påverkan av normalt förekommande dimensionsvariationer på RUS kunnat utvärderas fullt ut. Den mest önskvärda placeringen av hårdhetskontroll är direkt efter härdning vilket innebär betydligt större dimensionstoleranser på ringarna än efter slipning.

En ny metod verifierades för detta ändamål i form av ultraljudshastighetsmätningar med EMAT-givare. EMAT är liksom LUS en kontaktlös ultraljudsteknik som lämpar sig för industriella tillämpningar. Båda metoder kan generera med tillfredsställande noggrannhet och reproducerbarhet en kvantitativ information om stålhårdheten. Delmålet som bestod i kvantitativ bestämning av förekomsten av små fasandelar, tex. σ -fas eller bainit blev inte uppfyllt.

5.3 Elektromagnetiska mätmetoder MikroMach, Swerea MEFOS,

Om vi fokuserar på utrustningens beteende under de olika mätbetingelser som dessa försök medfört kan vi konstatera att utrustningen visar en viss känslighet för olika ytstruktur då vi sett att kalibrering och mätning bör ske på material med liknande ytfinhet. Vid mätningar av inre spänningar medförde olika ytfinhet en offset. Vi kunde konstatera att det förvisso blev en offset, men variationer i inre spänningar kunde trots detta detekteras på plåten. Det är också viktigt att påpeka att man bör använda sig av någon form av jigg eller annat stöd för mätgivaren så att förutsättningarna är repeterbara vid all mätningar med MikroMach. Ett annat fenomen som inte var speciellt förvånande var, att utrustningen är känslig för mätningar som görs i närheten av materialets kant. Det är helt naturligt, men om alla mätningar utförs med repeterbara förutsättningar så kan även mindre prover undersökas.

5.3.1 Kalibrering av MikroMach

Som alltid med automatisk kalibrering måste man vara försiktig med de resultat som faller ut ur "automatiken". När det gäller inställningar av utrustningen så krävs eftertanke och kunskap om elektromagnetiskt beteende hos olika ferromagnetiska material för att man ska få bra mät- och kalibreringsresultat. Det finns emellertid ett antal grundläggande saker att beakta när man arbetar med statistiska verktyg över huvud taget.

För det första måste man se till att man har ett bra statistiskt underlag som är väl utspritt över det förväntade mätområdet och att man även har med "ändvärden" som man absolut inte får över- eller underskrida i de mätningar man senare gör. För man mätvärden utanför det inlärdas intervall så är dessa definitivt inte pålitliga. Mätintervallet är helt bestämt till den mätrymd som de "inlärdas" uppgifterna spänner upp.

För det andra bör man undersöka de enskilda parametrar som systemet väljer att korrelera mot, och försäkra sig om att de speglar de fysikaliska variationer som man försöker mäta.

För det tredje undersöka att ingen parameter som används liknar "hagelskott i natten". Dessa kan och bör väljas bort från regressionsanalysen för att slippa korrelation av "nonsensparametrar".

En noggrann genomgång av de olika parametrarna, där man väljer ut någon eller några som man kan sätta in direkt i regressionsanalysen, kan hjälpa till att få en bra anpassning på polynomet. Man bör vara försiktig och inte välja för många variabler om man inte har väldigt många datapunkter, då detta kan skapa "nonsensanpassning".

Man bör alltid se till att man har tillgång till så många prover att man kan plocka bort ett antal från "inlärningen" för att senare utnyttja dessa för verifiering. Det bästa är naturligtvis om man har flera uppsättningar med liknande prover som man kan använda en helt ny uppsättning för verifiering av inlärningen.

5.3.2 MikroMach för bestämning av inre spänningar

Man får komma ihåg att i detta fall så har vi endast gjort kalibrering mot ett exakt spänningstillstånd. Med dessa förutsättningar ser mätutrustningen ut att detektera variationer i inre spänningar på ett bra sätt, under förutsättning att en korrekt kalibrering utförts. Kalibreringen måste utföras på ett material med liknande ytfinhet och analys och om tjockleken understiger ca 6mm, även samma tjocklek, som det material som ska undersökas.

5.3.3 MikroMach för bestämning av utmattningsgräns

Det kan vara intressant att höra hur materialvetare förklarar det "omvända" mätresultatet från Barhausenbruset, eller om det kanske i själva verket är helt som det ska vara. Man kan även se att man bör göra fortsatta utredningar hur variationer i ytans beskaffenhet på proven påverkar mätresultatet. Detta arbete har visat att en dedikerad mätprobe och mätjigg för varje enskilt mätproblem är nödvändig för att garantera stabila mätningar.

5.3.4 MikroMach undersökning av ändeffekter varmvalsade coils

Så här långt så anser vi möjligheten att se variationer i sträck eller brottgräns som fullt realistiska under förutsättning att man tillverkar en mätjigg som minskar påverkan från den mätande personen. Det här är förvisso bara en första inledande undersökning för att se om utrustningen kan fungera för detektering av när egenskaperna i ett varmvalsat band kan anses vara stabila och vara representativa för bandets helhet. Dessa första mätningar visar att utrustningen är kapabel att utföra den uppgiften.

5.4 Sammanfattande resultat, jämförelse med satta mål

Ett av målen var att en in-linemetod för bestämning av fasandelar/mechaniska egenskaper på varmvalsade band skulle utvecklas och beskrivas. Detta kan till viss del, rörande mekaniska egenskaper, anses som uppfyllt med de mätresultat som erhållits från såväl Laserinducerat ultraljud och även från mätningar med MikroMach. Att kunna bestämma fasandelar ser ännu så länge ut att vara svårt även om det i projekten har gjorts försök att göra detta.

Under arbetet med både laserinducerat ultraljud och resonant ultraljudspektroskopi har nya metoder för bearbetning och tolkning av ultraljudsignaler utarbetats av både Uppsala Universitet och Swerea KIMAB. Detta visar att målet att beskriva metoder för verifiering av parametrar relevanta för ultraljudprovning har nåtts.

Genom att undersöka de sätthärdade stålkuleblästrade kugghjulen med hjälp av mikromagnetiska metoder har, som ett annat av målen anger, en praktisk metod för verifiering av adekvat kulblästring kunnat beskrivas i detta projekt.

I enlighet med ett annat mål, som sattes vid projektstarten, har Uppsala Universitet beskrivit och verifierat en mätmetod för mätning av hårdhet på härdad grovplåt med EMAT (JK Teknisk rapport TO44-35).

Ett av projektmålen var att finna en metod för kartläggning av inre spänningar på tjock formatplåt och grovplåt. Genom de försök som utförts genom att mäta mikromagnetiska egenskaper med MikroMach ser det ut att vara möjligt att avgöra hur stora spänningsvariationer det är på en tjock formatplåt. Inga försök med mätning av inre spänningar på grovplåt har hunnits med i projektet, så det målet har tyvärr inte kunnat uppfyllas.

Yttrigare ett mål, som trots att det finns med i namnet på projektet, inte kunnat uppfyllas är matning av härddjup på grovplåt.

6 FÖRSLAG PÅ FORTSATTA FORSKNINGSINSATSER OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER

6.1 Laserinducerat Ultraljud (LUS)

Det krävs ytterligare arbete för att öka förståelsen för hur ultraljudet påverkas av olika materialparametrar samt ytterligare arbete för att bättre förstå hur relevant och pålitlig information kan extraheras ur mätdata och även förståelse för hur den experimentella uppställningen bör göras för optimalt resultat. Fördjupning krävs i de olika potentiella metoder som undersökts i projektet både vad gäller mätning av frekvensberoende dämpning samt mätning med olika hastighetsmetoder.

Mätning av hastigheter av olika typer av vågor har visat på mycket intressanta resultat och ytterligare arbete krävs för att förstå teknikens möjligheter och begränsningar. Undersökning av den modifierade ”KIMAB hastighetsmetoden” borde undersökas och verifieras ytterligare. Ett annat exempel är att titta på Poissons tal för de andra typer av material förutom de martensitiska för att se ifall liknande korrelationer kan göras.

Uppmätning av Poissons tal kan göras oberoende provets tjocklek, men denna typ av analys har inte undersökts vad gäller begränsning i noggrannhet. Om en sådan studie visar på positiva resultat kan Poissons tal enkelt mätas upp på en plåt i linjen. Baserat på dessa resultat skulle även longitudinell och transversell vågutbredningshastighet kunna mätas upp, oberoende provets tjocklek, genom att utnyttja och modifiera den metoden där relationen mellan longitudinell och transversell vågutbredningshastighet nyttjas, för närmare beskrivning se den tekniska rapporten TO44-30 och referens [10].

Studier har visat att mikrostruktur och kornstorlek även kan uppskattas genom hastighetsanalys vilket är någonting som bör undersökas ytterligare.

Den utrustning som använts kan anses som delvis industrianpassad, och som mätningarna visade så finns behovet av att designa ett helt industrianpassat instrument med den kringutrustning som krävs för att ge förutsättningarna för att bra mätresultat kan säkerställas.

6.2 Resonant ultraljudspektroskopi (RUS) och EMAT

Vi ser behovet av att konstruera mätinstrument anpassade till industriella behov då detta projekt har innefattat är ett antal studier i laboratoriemiljö. Det är intressant att vidare undersöka möjligheter att använda andra typer provförfaranden med EMAT som eliminerar plåttjocklek som parameter i mätningar. Detta kan åstadkommas t.ex. genom användning av plåtvågor (Lamb-vågor).

Framtida arbete bör inkludera studier av hur metoden kan hantera normalt förekommande variationer i en process. Slutligen bör nämnas att hårdhetsvariationer i en process kan ha en mängd olika orsaker. Inom detta projekt har endast hårdhetsvariationer orsakade av anlöpningsstemperatur och -tid studerats. Framtida arbete bör inkludera även analys av andra typer av härdfel som ger låg hårdhet.

6.3 Elektromagnetiska mätmetoder

När vi arbetar med dessa metoder, mikromagnetiska egenskaper, som skiljer sig något från de ”normala” mättekniker som används för materialkaraktisering, så upptäcker vi hela tiden nya problem och i vissa fall fallgropar, men med tiden så kan vi lära oss och med fler mätningar och fler försök så lär vi oss mer om mätinstrumentet.

Dessa första mätningar visar att utrustningen är kapabel att utföra de uppgifter som vi har testat här. Det återstår att se hur mycket andra parametrar påverkar resultatet, som exempelvis variation i kemisk sammansättning och olika grader av inre spänningar, då även dessa påverkar de mikromagnetiska egenskaper som ligger till grund för bestämning av t.ex. brottgräns, sträckgräns och hårdhet. Fortsatta undersökningar får visa detta, men i dessa fall så verkar de inte ha haft en allför menlig inverkan på mätresultatet. Om teorierna stämmer så kan känsligheten för variationer på andra parametrar ”kalibreras bort” om dessa variationer ingår i kalibreringen, men det krävs fler försök för att visa detta. Man måste hela tiden ta i betraktande att det är till viss del fysik och i vissa fall ”matematik” i kalibreringarna. Därför måste det alltid finnas ett gott statistiskt underlag för kalibreringarna och man måste undvika att parametrar som saknar relevans till mätningen finns med i regressionspolynomen.

Vi ser att MicroMach definitivt är ett laboratorieinstrument som tillfälligt kan användas i industrimiljö. För att MicroMach skall kunna användas helt industriellt krävs tillverkning av dedikerade mätgivare och rejäla, anpassade mätjigger för att skapa så identiska förutsättningar som möjligt vid varje mättillfälle.

7 REFERENSER

- [1] C.B. Scruby, "Some applications of laser ultrasound," *Ultrasonics*, vol. 27, 1989, pp. 195-209.
- [2] A. Blouin, D. Levesque, M. Lord, and M. Dessendre, "Laser Ultrasonics as an Alternative Inspection Method to Detect Microstructural Flaws in Aerospace Structures and Engines Manufactured by Advanced Metallic Material Processes," *Technology*, 2008.
- [3] *RFS-CR-04023 Investigation, modelling and control of the influence of the process route on steel strip technological parameters and coating appearance after hot dip galvanising (2004-2007)*.
- [4] *RFS-PR-2008-07039 Online Material Characterisation at Strip Production (2008-)*.
- [5] *BRPR-CT96 0359 On-line structure monitoring by laser ultrasonics for process control in rolling and heat treatment (1997-2000)*.
- [6] *7210-PR/294 New approaches to non-destructive characterisation of microstructure and application to on-line control of steel quality (2001-2004)*.
- [7] G. Jeskey, R.K. Ii, E. Damm, J.-p Monchalain, G. Lamouche, S.E. Kruger, and M. Choquet, "Laser ultrasonic sensor for on-line seamless steel tubing process control," 2009.
- [8] F. Stanke and G.S. Kino, "A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1984.
- [9] J.-D. Aussel and J.-P. Monchalain, "Precision laser-ultrasonic velocity measurement and elastic constant determination," *Ultrasonics*, vol. 27, 1989, pp. 165-177.
- [10] M. Okuno, H. Sato, M.B. Klein, and B.F. Pouet, "Material thickness measurement method and apparatus," , November 5, 2002.
- [11] M. Engman and M. Falkenström, "Yield Strength Correlated to Directional Dependent Wave Velocities in Hot Rolled Steel Using Laser Ultrasonics," *AIP Conference Proceedings*, 2010, pp. 1-7.

Projektorganisation och deltagare

Forskningskommitté

JK 44030

Projektperiod

2007-11-01– 2011-12-31

Ordförande

Ketil Törresvoll

Scana Steel Björneborg

Koordinator

Björn Sjögren

Swerea MEFOS

Forskningschef

Lars-Henrik Österholm

Jernkontoret

Industrimedlemmar

Rolf Högberg

Ovako Hofors, Hällefors

Jarmo Tarkka*

Ruukki Metals

Lars-Ove Skogh

Sandvik Materials Technology

Therese Brolund

Scania CV

Krister Johansson*

Scania CV

Taina Vuoristo*

Scania CV

Jonas Hallbäck

SKF Group Manufacturing Development Centre

Pekka Juuti

SKF Sverige

Anders Hedberg

SSAB EMEA Borlänge

Seppo Siekkinen*

SSAB EMEA Borlänge

Tor-Björn Larsson

SSAB EMEA Oxelösund

Adjungerade forskare

Lena Carlson*

Swerea KIMAB

Martin Engman

Swerea KIMAB

Magnus Falkenström

Swerea KIMAB

Andreas Hedin*

Swerea KIMAB

Lena Ryde

Swerea KIMAB

Björn Sjögren

Swerea MEFOS

Tadeusz Stepinski

Uppsala Universitet, Signaler och System

* Deltog ej hela projektiden

Publikationer

1. Tekniska rapporter

M. Engman, M. Falkenström, Swerea KIMAB, "*Bestämning av mekaniska egenskaper och mikrostruktur i stål med laserultraljud*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-30 (2012)

B. Sjögren, A. Nilsson, A. Rensgard, Swerea MEFOS AB, "*Oförstörande undersökning av inre spänningar i extra höghållfast varmvalsat stål med MikroMach*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-31 (2012)

B. Sjögren, Swerea MEFOS AB, "*Oförstörande bestämning av stål kuleblästrade kugghjuls materialegenskaper genom mätning av mikromagnetiska egenskaper med 3MA och MikroMach*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-32 (2012)

B. Sjögren, Swerea MEFOS AB, "*Oförstörande bestämning av variationer i hållfasthet i änden på varmvalsade coils*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-33 (2012)

T. Stepinski, T. Łukomski, M. Szwed, Uppsala Universitet, "*Oförstörande undersökning av mikrostruktur med hjälp av resonant ultraljudspektroskopi*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-34 (2012)

T. Stepinski, T. Łukomski, Uppsala Universitet, "*Oförstörande undersökning av mikrostruktur med EMAT-prob*", Jernkontoret Teknisk rapport TO44-35 (2012)

2. Vetenskapliga artiklar

1. T. Łukomski, T. Stepinski, "Application of resonant ultrasound spectroscopy in diagnostics of rings", 11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures, October 18-20, 2010 Krakow, Poland.
2. T. Łukomski and T. Stepinski, "Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements" INSIGHT, The Journal of The British Inst. of Non-Destructive Testing, Nov. 2010, pp. 592-96.
3. T. Łukomski and T. Stepinski, "Application of resonant ultrasound spectroscopy in diagnostics of rings", INSIGHT, The Journal of The British Inst. of Non-Destructive Testing, vol. 53, April 2011, pp. 192-95.
4. M. Engman and M. Falkenström, "Yield Strength Correlated to Directional Dependent Wave Velocities in Hot Rolled Steel Using Laser Ultrasonics," *AIP Conference Proceedings*, pp. 1-7, 2010.

5. M. Falkenström, M. Engman, E. Lindh-Ulmgren, and B. Hutchinson, "Laser ultrasonics for process control in the metal industry," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 26, no. 3-4, pp. 237-252, Sep. 2011.

3. Avhandlingar

T. Lukomski, "Ultrasonic nondestructive methods in testing of steel", doktorsavhandling AGH - University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Department of Process Control, Polen 2012.

Annan kunskapsöverföring

Seminarier

Avslutningsseminarium på Jernkontoret den 5 december 2011, Jernkontoret.

Lägesrapportering för styrelsen för Teknikområde 44 Oförstörande provning inom Jernkontoret, sammanlagt 8 möten under 2008-2011 samt vid 13 möten med forskningskommittén JK44030.

Programkonferens Stålforskningsprogrammet , Borlänge, 10-11 juni 2009.

Konferenser

M. Engman, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2009, Rhode Island, USA (Poster).

M. Falkenström, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2009, Rhode Island, USA (Presentation).

M. Engman, 2nd International Symposium on Laser-Ultrasonics, 2010, Bordeaux, Frankrike (Poster).

T. Łukomski, T. Stepinski, "Application of resonant ultrasound spectroscopy in diagnostics of rings", 11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures, October 18-20, 2010 Krakow, Poland. Presenterades av Tomasz Łukomski.

Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012

Svensk stålindustris marknadsledande position inom ett antal högt specialiserade nischer har sin grund i en konsekvent och långsiktig satsning på forskning. VINNOVA och Jernkontoret utarbetade 2006 på regeringens uppdrag ett gemensamt forskningsprogram, Strategiskt stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012 (Stålforskningsprogrammet), som syftar till att behålla och stärka denna position och samtidigt förbättra miljöprestationen. Programmet är ett branschforskningsprogram vars mål är att förbättra den svenska stålindustrins konkurrenskraft, vilket också är skälet till att programmet administreras av Jernkontoret.

Stålforskningsprogrammet omfattar 245 miljoner kronor varav VINNOVA finansierar hälften. Resterande medel kommer från industrin, som kontanta medel eller i form av naturainsatser, t.ex. personal, forskningsresurser och experiment i produktionsanläggningar.

Branschens inflytande över programmet utövas genom en programstyrelse bestående av representanter för stålföretagen, Jernkontoret och VINNOVA. Programstyrelsen tar beslut om vilka projekt som ska beviljas medel. Prioritering av projektförslagen och den vetenskapliga granskningen av dessa handläggs av en grupp bestående av ordförandena i Jernkontorets teknikområden och adjungerade representanter från forskningsutförarna. Dessutom görs en extern utvärdering av ansökningarna som är vägledande för beslutet. Utlysningprocessen administreras av Jernkontoret.

Sammanlagt 30 projekt har beviljats anslag inom programmet. Forskningen genomförs i nära samarbete mellan järn- och stålindustrin, stålbranschens forskningsinstitut Swerea MEFOS och Swerea KIMAB, samt universitet och högskolor med utbildning och forskning inriktad på ståltillverkning och handlar såväl om att utveckla nya produkter som att effektivisera och miljöanpassa produktionsprocesserna. I vissa projekt deltar även kunder och leverantörer till stålindustrin. Det praktiska arbetet utförs inom forskningskommittéer inom Jernkontorets gemensamma forskning. I forskningskommittéerna deltar representanter för industriföretagen och forskningsutförarna. I arbetet tillämpas Jernkontorets regler för den gemensamma forskningen.

Programmets projekt täcker fyra ämnesområden:

- **Utveckling för hållbar tillväxt**
från minskade utsläpp till högpresterande stål med minskad materialåtgång.
- **Morgondagens material och tillverkningsmetoder**
från utveckling av lättare och starkare stål till hur materialet formas och sammansätts.
- **Avancerad modellering**
från modellering på atomär nivå till studier av hur stålet beter sig i olika applikationer.
- **Förbättrad processteknik**
från förbättrade mätmetoder till effektivare processteg.

Kraven på projekten inom Stålforskningsprogrammet är en tydlig förankring i industrin, och att programmet som helhet täcker hela värdekedjan, från råvaror till produkter. Huvuddelen av forskningsmedlen är avsedd för projekt med en tydlig anknytning till konkreta industriella behov, vars resultat relativt snabbt kan implementeras i produktionen. Resterande del av forskningsmedlen kan användas för så kallade innovativa forskningsprojekt med betydligt högre risk både vetenskapligt och i fråga om de kommersiella möjligheterna för stålindustrin på kort och medellång sikt.

DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION

Organisationen grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt skatter och avgifter. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

JERNKONTORET

Box 1721, 111 87 Stockholm • Kungsträdgårdsgatan 10
Telefon 08 679 17 00 • Fax 08 611 20 89
E-post office@jernkontoret.se • www.jernkontoret.se

