

# JERNKONTORETS FORSKNING

---

**D 797**

## Stålindustrins värmnings-, bearbetnings- och materialpaket 1999–2003

# JERNKONTORETS FORSKNING

## Stålindustrins värmnings-, bearbetnings- och materialpaket 1999–2003

Referat av slutrapporter, 2003-10-17  
Rapport D 797

ISSN 0280-249X

| Innehållsförteckning – forskningsuppgift                                       | Ordf/Sekr.                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 31036 Förbättrad valsmörjning vid kallvalsning                                 | Fredrik Sandberg, AB Sandvik Materials Technology/<br>Andreas Johnsson, MEFOS VB          |
| 31038 Förbättrad arbetsvalsslitagemodellering vid varmvalsning                 | Jonas Lagergren, Jernkontoret/<br>Mohammed Tahir, KTH                                     |
| 31040 Förbättrad planhet och inre spänningar vid kallvalsning av spaltband     | Lars Carlborg, AB Sandvik Materials Technology/<br>Torbjörn Hansén, MEFOS VB              |
| 31041 Prediktering av slutegenskaper efter varmbandvalsning                    | Juuka Kömi, Rautaruukki Steel/<br>Mats Karlberg, MEFOS VB                                 |
| 31042 Termomekanisk bearbetning av grovplåt                                    | Bertil Ahlblom, SSAB Oxelösund AB/<br>Tadeusz Siwecki, IM                                 |
| 31043 Höghållfasta stål för bilindustrin                                       | Tony Nilsson, SSAB Tunnpå AB/<br>Peter Segle, IM                                          |
| 31044 Materialegenskaper vid bandgjutning                                      | Hans Sandberg, Jernkontoret/<br>Bevis Hutchinson, IM                                      |
| 32071 Förbättring av temperaturjämnheten längs med ämnen under värmning        | Ulf Wuopio, Fundia Special Bar AB/<br>Anders Rensgard, MEFOS VB                           |
| 32072 Förbättrade dimensionstoleranser vid valsning av grov stång och profiler | Roterande inom kommittén/<br>Jan-Olov Perä, MEFOS VB                                      |
| 33010 Smörjmedelsammansättningens inverkan på tråddragningsprocessen           | Fredrik Hägg, Avesta Welding AB/<br>Ulrik Palmqvist, IM                                   |
| 33011 FEM vid tråddragning                                                     | Fredrik Sandberg, AB Sandvik Materials Technology/<br>Henrik Överstam, Örebro universitet |
| 33012 Valstrådspreparering – alternativ till betning                           | Ulf Gällstedt, Fundia Hjulbro AB/<br>Peter Gillström, Örebro universitet                  |
| 33013 Alternativ till bly vid värmebehandling av tråd                          | Johan Bohlin, Springwire Sweden AB/<br>Tomas Berntsson, Örebro universitet                |
| 43021 Rostfritt stål för ökad prestanda i kraftvärmeverk                       | Kenneth Göransson, AB Sandvik Materials Technology/<br>Rachel Pettersson, IM              |
| 43026 RF-stål för ökat energiutbyte vid sopförbränning                         | Sofia Åkesson, AB Sandvik Materials Technology/<br>Rachel Pettersson, IM                  |
| 43022 Styrning av rostfria ståls oxid och betning                              | Malin Snis, AvestaPolarit AB/<br>Magnus Nordling, Korrosionsinstitutet                    |
| 43023 Rostfria stål för våt rökgasrening vid avfallsförbränning                | Claes Ericsson, AvestaPolarit AB/<br>Tomas Forsman, IM                                    |
| 43024 Höghållfasta rostfria stål i förband                                     | Guocai Chai, AB Sandvik Materials Technology/<br>Sten Wessman, IM                         |
| 43025 Duplexa rostfria stål i konstruktioner                                   |                                                                                           |
| 44095 Oförstörande bedömning av materialegenskaper                             | Göran Engberg, SSAB Tunnpå AB/<br>Jan Levén, MEFOS VB                                     |
| 51044 Effektivare energianvändning i ämnesugnar genom förbättrad styrning.     | Nils-Eric Wessberg, SSAB Oxelösund AB/<br>Bo Leden, MEFOS VB                              |
| 51045 Intelligent larmhantering för ugnar                                      | Björn Jönsson, AvestaPolarit AB/<br>Lennart Klarnäs, SSAB Tunnpå AB                       |
| 51046, 51047 Högtemperaturförbränning                                          | Jonas Engdahl, SSAB Tunnpå AB/<br>Lennart Klarnäs, SSAB Tunnpå AB                         |
| 51048 Matematisk modellering av HPAC-förbränning                               | Jonas Engdahl, SSAB Tunnpå AB/<br>Lennart Klarnäs, SSAB Tunnpå AB                         |
| 51049 Automatisk syreöverskottsstyrning av värmningsugnar                      | Björn Jönsson, AvestaPolarit AB/<br>John Niska, MEFOS VB                                  |
| 51050 Värmeåtervinning från svalbäddar                                         | Jan Nilsson, Hofors Energi AB/<br>Birgitta Lindblad, Jernkontoret                         |
| 51051 Temperaturmätning i valsverkens ugnar                                    | Håkan Svensson, AB Sandvik Materials Technology/<br>John Niska, MEFOS VB                  |



|                                                                                                                                                                  |                                                             |                                                                                                                                                      |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                                           |                                                             | <b>Projekt</b><br>31036, Förbättrad smörjning vid kallvalsning<br><br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>11 282 688 SEK                                                                                                                                  | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-06-20 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                      |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>AB Sandvik Materials Technology<br>AvestaPolarit AB<br>Erasteel Kloster AB<br>SSAB Tunnpå AB<br>Uddeholm Strip Steel AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                |  |
| Adress<br>MEFOS, Box 812, 971 25 Luleå                                                                                                                           |                                                             |                                                                                                                                                      |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Andreas Johnsson, andreas.johnsson@mefos.se                                                  |                                                             |                                                                                                                                                      |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Valsprov vid MEFOS finvalsverk för utvärdering av smörjmedel,<br>Jernkontorets forskning, serie TO.                              |                                                             |                                                                                                                                                      |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

MEFOS finvalsverk har under ett pågående ECSC-projekt "Assessment and synthesis of the most relevant tribological tests for the characterisation of cold rolling lubricants" utrustats, kompletterats och använts som en pilotanläggning för provning av smörjmedel vid kallvalsning. I projektet förbättrad smörjning vid kallvalsning har anläggningen kompletterats och använts för direkta jämförande prover under identiska driftsbetingelser mellan olika smörjmedel. Under försöksserierna som inkluderade nya och relativt obeprövade smörjmedel såväl som beprövade, recirkulerade såväl som oanvända och raka valsoljor såväl som emulsioner visar testresultaten klara skillnader mellan smörjmedlen i form av valskrafter och valsmoment. Testanläggningen möjliggör dessutom prover av olika appliceringsmetoder på ett okomplicerat tillvägagångssätt. Detta ger en möjlighet för valsverken att öka kunskapen i framtiden gällande nya produkter.

Försöksresultaten har utmynnat i att deltagande företag har kunnat ta beslut gällande införandet av aktuella smörjmedel.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Pilotvalsverkets komplettering till testanläggning för smörjmedel har fungerat väl. I nuläget finns inga uppslag till direkta kompletteringsbehov som följd av genomförd provning då den gav goda resultat och företagen som medverkade var nöjda. Ytterligare provserier har genomförts på initiativ av enskilda företag.

## Projektpresentation

### Problemställning

Vid valsverken förekommer byten av smörjmedel med jämna mellanrum. Det är en kostsam process att fasa in ett nytt smörjmedel och kostnaderna för bara tvättningen efter provserierna är avsevärda. Att problem uppkommer i samband med införandet av ett nytt smörjmedel är inte heller ovanligt. I försöken användes rena valsoljor, industriellt beprövade emulsioner både oanvända och driftkörda samt relativt nya produkter. Försöken utförs med en utrustning framtagen för utvärdering och provning av smörjmedel, se Figur 1-3. Skiljda smörjmedel appliceras sekventiellt genom direktbyte av smörjmedelskälla under valsning på samma band under konstanta driftsbetingelser som bandhastighet, banddrag och reduktion. Smörjmedlen appliceras från separata smörjmedelssystem med både pump och tank, som försmörjning, smörjning i valsgapet eller båda samtidigt, där respektive system använder pumpdriven agitation och temperaturhållning med hjälp av temperaturgivare. Banddrag, reduktion, hastighet, valsmoment och valskrafter loggas via en mät dator och tidpunkten för respektive smörjmedelsbyte registreras, se Figur 4. Vid önskemål mäts även temperatur.

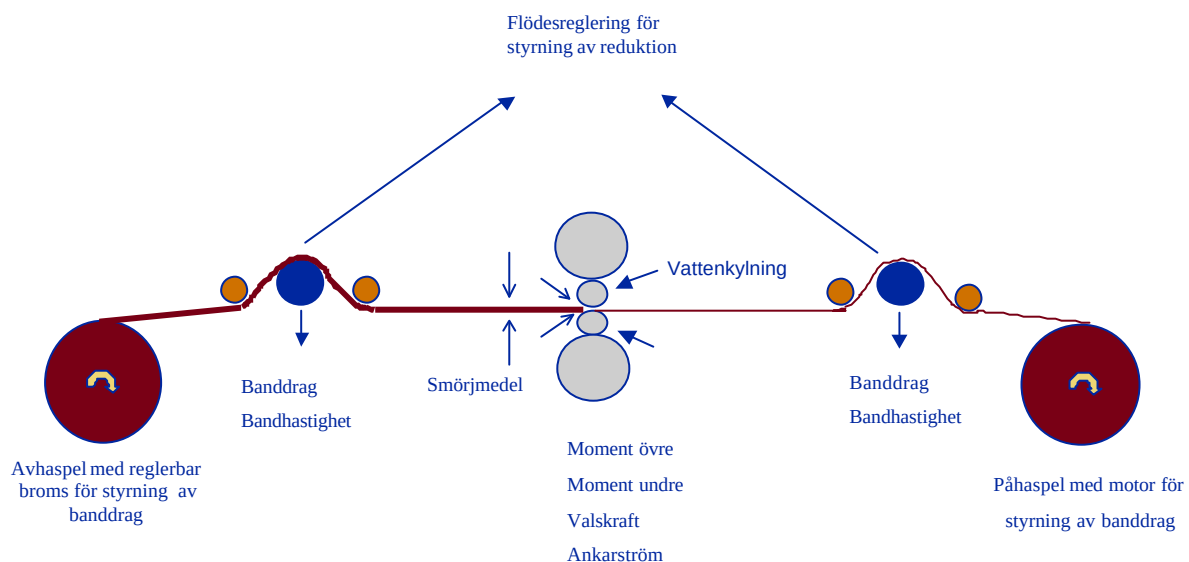


Fig 1. Valsupställningen för aktuella smörjnings försök.



Fig 2. Pumpar för olika smörjmedelssystem.



Fig 3. Dysornas placering som försmörjning och smörjning i valsgap.

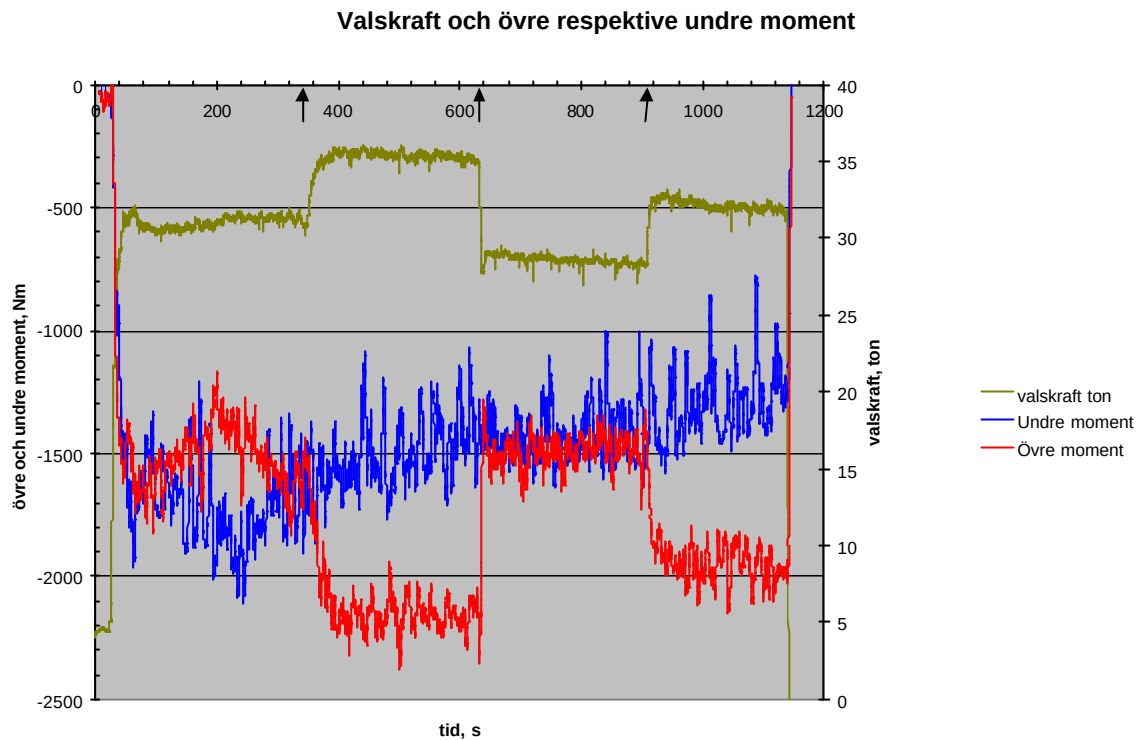


Fig 4. Mätdata från vals försök. Pilarna mot tidsaxeln indikerar tidpunkt för smörjmedelsbyte. Fyra olika smörjmedel applicerades i aktuellt försök och man får direkt utslag i valskrafter och moment.

## Syfte och mål

Målet med projektet är att:

- Förbättra urvalsprocessen vid val av smörjmedel.
- Möjliggöra provning av olika appliceringsmetoder.
- Öka kunskapen kring nya produkter.
- Introducera pilotvalsverket som en testanläggning inför industriella verksförsök.

## Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.

- En väldigt väl fungerande metod för utvärdering av oljors och emulsioners prestanda avseende smörjning vid kallvalsning har utvecklats.
- Förbättrad bandkvalitet, ökande utbyten.
- Energibesparing på 12 GWh/år genom minskad friktion och 3 GWh/år genom ökat utbyte hos de deltagande valsverken.
- Industriella försök på verken kan senareläggas då smörjmedlets prestanda har kunnat jämföras med andra produkter. I och med detta sparar man dyrbar tid och stora kostnader.
- Ökande konkurrens mellan smörjmedelsleverantörer då deras produkter kan jämföras under industrins övervakning på ett kostnadseffektivt sätt och det är 'upp till bevis' som gäller då man lanserar ett nytt smörjmedel som ska kunna uppvisa förbättrade egenskaper.



|                                                                                                                                                                                                                                            |                                                             |                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                                                                                                   |                                                             | <b>Projekt</b><br>31038 Improved modeling of work roll wear<br>prediction in hot strip mill<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>8 665 176 SEK                                                                                                                                                                                                             | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-11-24 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                               |
| Universitet/Högskola/Företag<br>KTH<br>Rautaruukki Oy<br>SSAB Tunnpå AB<br>Åkers Sweden AB<br>MEFOS (VB)                                                                                                                                   |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                         |
| Adress<br>Dept. of Production Engineering, Brinellvägen 68, 100 44 Stockholm<br>Casting of Metals, Brinellvägen 23, 100 44 Stockholm                                                                                                       |                                                             |                                                                                                                                                                               |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Björn Widell, <a href="mailto:bjornw@matpr.kth.se">bjornw@matpr.kth.se</a><br>Mohammed Tahir, <a href="mailto:mohammed.tahir@iip.kth.se">mohammed.tahir@iip.kth.se</a> |                                                             |                                                                                                                                                                               |
| Final report, title and name Slutrapport, namn och förlag<br>Improved modeling of work roll wear prediction in hot strip mill<br>Jernkontorets forskning, serie TO                                                                         |                                                             |                                                                                                                                                                               |

## Summary

The aim of the wear study is to develop an accurate roll-wear prediction for hot strip finishing mills, which takes more influential parameters into account. A new model of higher accuracy is presented. This model is based on a large amount of production campaigns. The strategy of the work was described.

After a comprehensive literature study a promising model structure was found. The corresponding prediction model is tested on two hot strip mills. Predicted wear is found to be in qualitative agreement with industrial experience and measured wear. Thus the structure – taking the influence of back-up rolls into account – was chosen for further development. This was done on behalf of results obtained from one mill built up by six stands and three different work-roll materials (HSS, HiCr and IC). Campaigns of “mixed” and “similar” strip grades were used. The obtained model is tested successfully in two other hot strip mills, give good agreement between predicted and measured wear. Wear factors of different roll grades was also determined.

The model enables increased rolled strip length and prolonged lifetime of the rolls, because of improved process control. Further more, grinding cost and time for roll changing can be minimized. Of course these possibilities should result in considerable energy saving.



## Main results

### New roll wear prediction model

A new roll wear prediction model, based on the main structure of Eq. (1) has been developed with greatly improved prediction power. A large amount of rolling data from **SSAB** has been used to reach this goal. HiCr-rolls are found in F1 and different combinations of HiCr and HSS- rolls in F2-F4. In F5 and F6, IC-rolls are used. The strategy of this research work is carried out step-by-step is clear from Fig. 1. Seven production campaign data were utilized, Table 1.

$$d_w(x) = b_1 \sum_j (L_i / R'_i) \times ((P_i / (B_i \times ld_{1i}))^{n_i}) + b_2 \sum_j (l_i / R'_i) \times (P_i / (L_{B_i} \times ld_{2i}))^{0.5} \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq B/2$$

New notations are presented below.

- $d$  Depth of work roll wear
- $L$  Length of rolled strip
- $R'$  Radius of flattened roll
- $P$  Rolling load
- $B$  Width of strip
- $ld_1$  Contact length between work roll and strip
- $ld_2$  Contact length between back up and work roll
- $L_B$  Length of barrel
- $b_1$  Wear factor referred to work roll
- $b_2$  Wear factor referred to back up roll
- $i$  Stand number
- $j$  Pass number
- $n$  Work resistance / strip yield strength at room temperature

**Table 1.** Arrangements of work rolls in SSAB campaigns

| Stand | Camp. 1 | Camp. 2 | Camp. 3 | Camp. 4 | Camp. 5 | Camp. 6 | Camp. 7 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| F1    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    |
| F2    | HSS     | HSS     | HiCr    | HSS     | HSS     | HSS     | HSS     |
| F3    | HiCr    | HSS     | HSS     | HiCr    | HSS     | HiCr    | HiCr    |
| F4    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    | HiCr    |
| F5    | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      |
| F6    | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      | IC      |

### Applied of the model to other mills and the test in campaigns

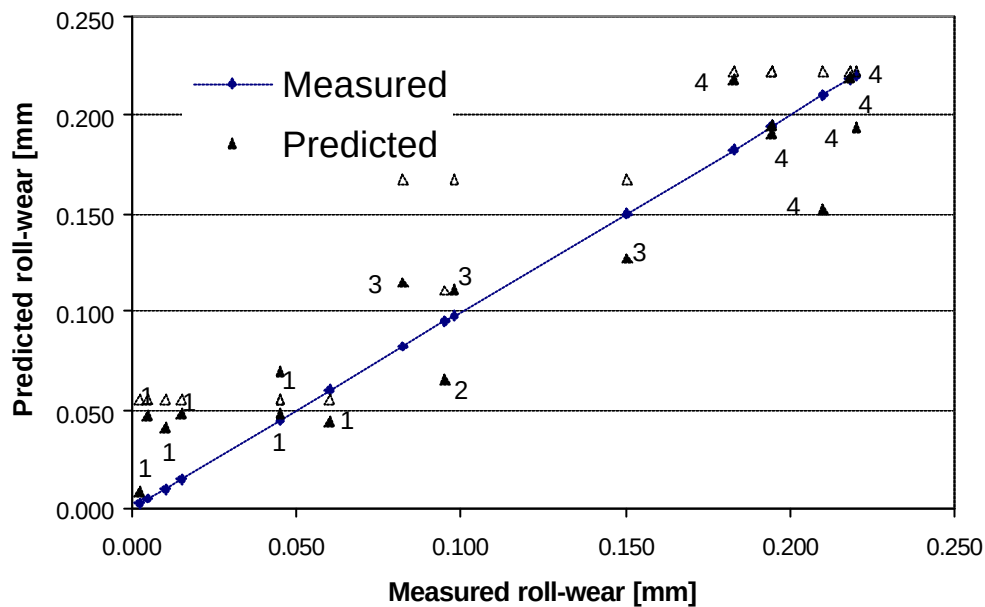
The model has been tested on two other mills, **Rautaruukki Steel** of six stands and **Dofasco** of seven. Results from different rolling conditions and work-roll arrangements confirm that the model, Eq. (1) can be used as a general prediction model for hot strip finishing mills.

From Table 2 it is clear that the wear factors,  $b_1$  and  $b_2$  referred to the different work roll grades are of good accuracy.

**Table 2.** Statistically determined wear constants and their accuracy

| Roll grades | R square | $b_1$       | $b_2$       |
|-------------|----------|-------------|-------------|
| HSS         | 0,97     | 1,18000E 11 | 6,53708E 09 |
| HiCr        | 0,88     | 8,50163E 13 | 4,11313E 08 |
| IC          | 0,82     | 1,56000E 13 | 5,23659E 08 |

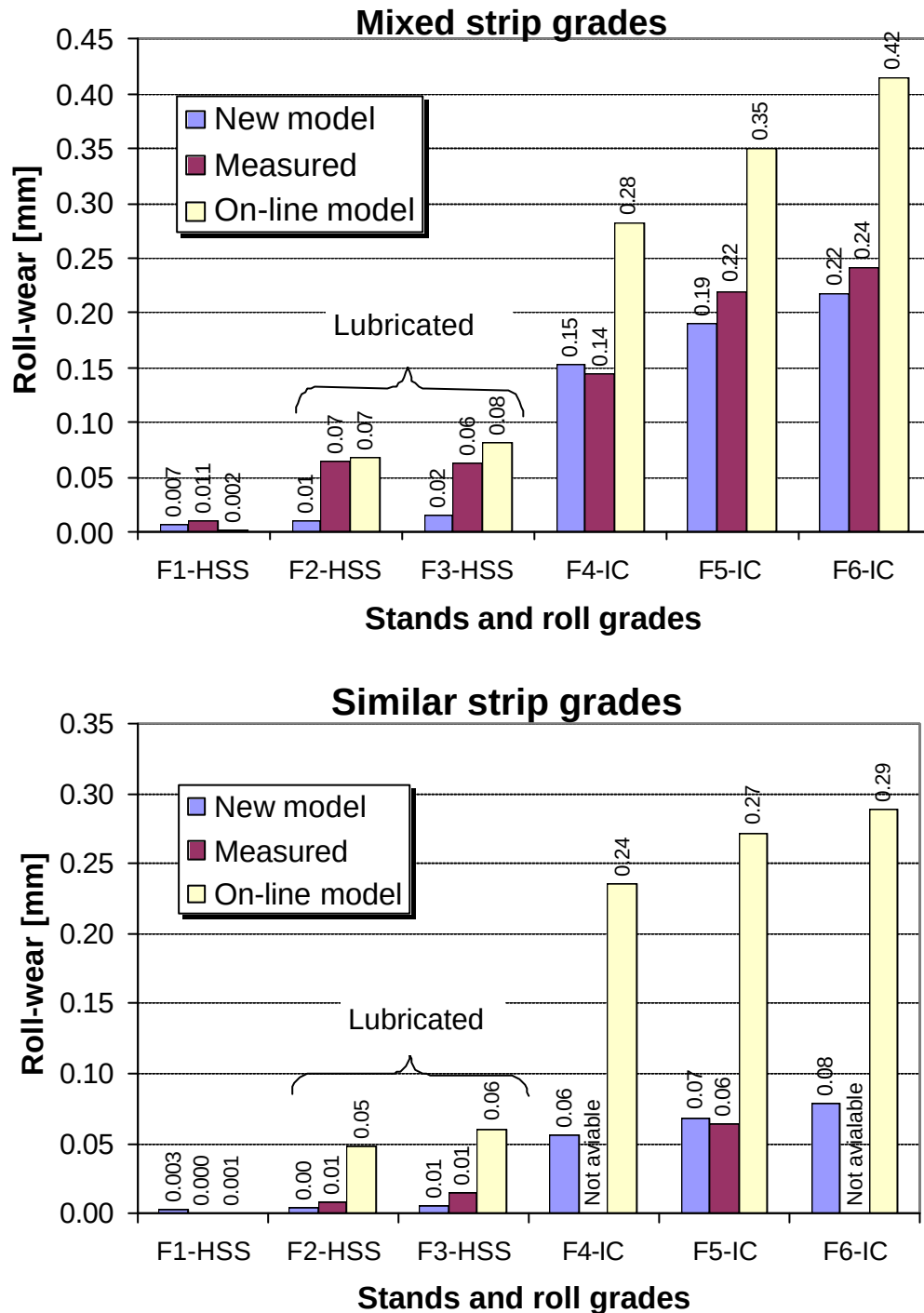
As an example the evaluation of the correctness of wear factors associated with HiCr-rolls is presented in Fig. 1. The figures 1 - 4 found in the diagram denote the stand-number of the HiCr-rolls. The work-roll exponent  $n$  is proposed on the basis of process parameters, deformation resistance and yield strength of the strip material at room temperature.



**Fig 1.** Predicted and measured wear of work rolls. The figures 1-4 are referred to the stands number where the HiCr-roll are investigated

Compared with the current on-line model, the new model takes in consideration more influential parameters, among others, roll wear contribution from process parameters and back-up rolls, different strip and roll grades - HSS, HiCr and IC - spread and roll flattening.

Prediction by the new model and the current on-line model are compared with experiments in **Rautaruukki Steel** for “mixed” and “similar” strip grades. A typical example is shown in Fig. 2. The hot strip mill is characterized by HSS-rolls in stands F1-F3 and by IC-rolls in the following stands F4-F6. It is clear that the new model is superior for “dry” rolling.

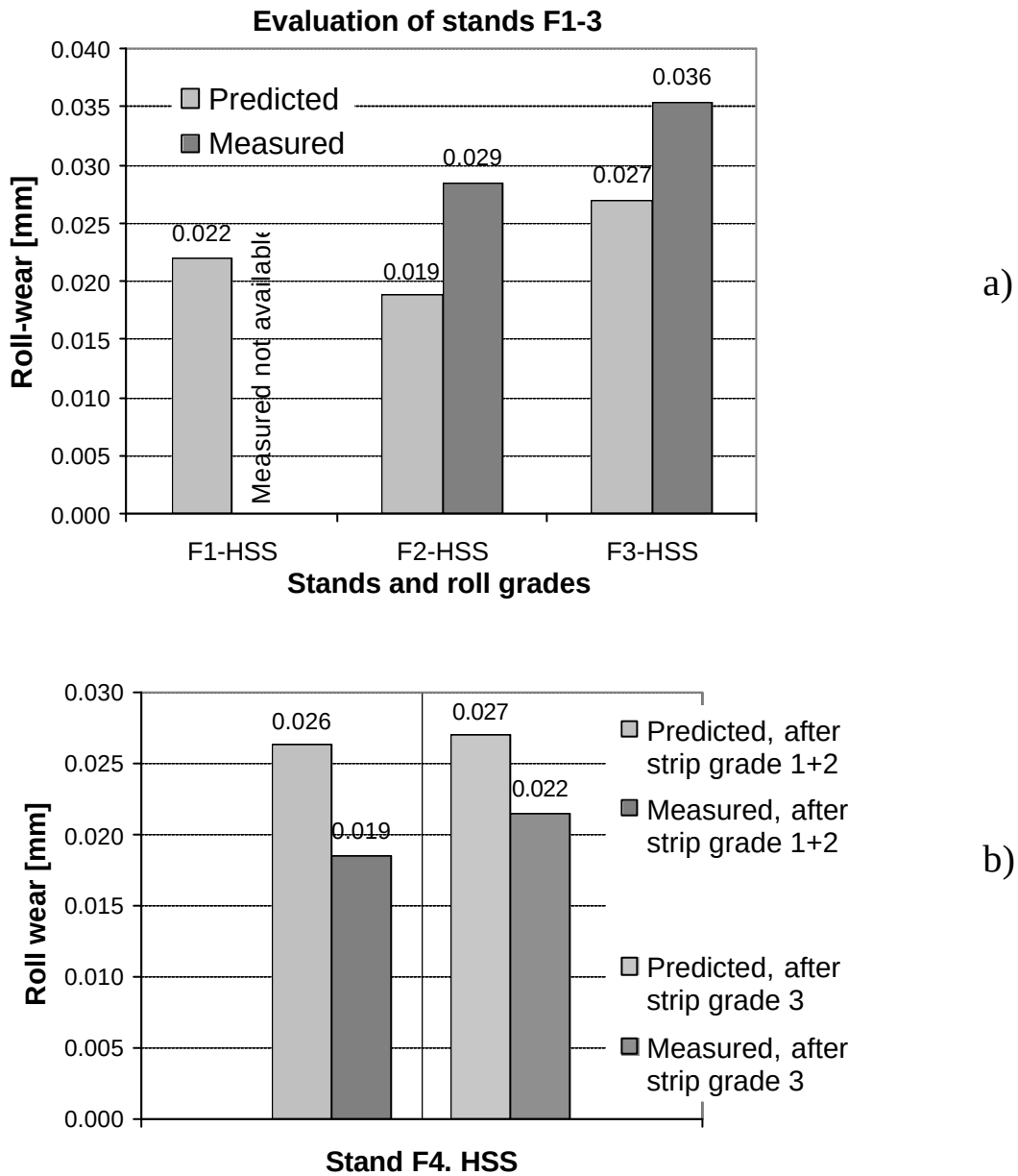


**Fig 2.** A comparison of wear as predicted from the new and the currently used on-line model, with experiments after rolling a) “mixed” steel grades and b) “similar” steel grades in Rautaruukki Steel.

The reason for the bad agreements regarding stands F1 and F2 is that these stands include lubrication, which is not incorporated in the model. It is clear that the predictions of today - current on-line model - heavily overestimates the wear for the last finishing stands F4-F6 where the rolls are not lubricated.

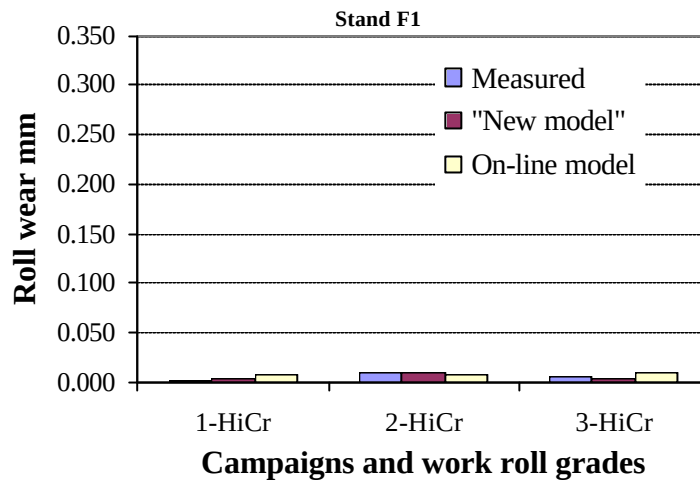
The evaluation of the new model with **Dofasco** strip mill is shown in Fig. 3. The mill contains HSS in stands F1-4 and rolls “similar” strip grades. Lubrication is used in the early finishing stands. The

evaluation of F1-F3 is done after rolling a complete campaign, Fig. 3a. Within this campaign two evaluations are carried out for F4, Fig. 3b.

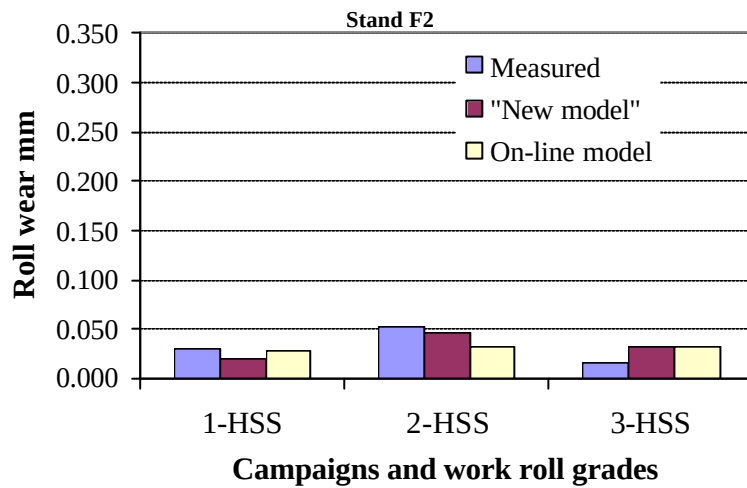


**Fig 3.** Comparison between predicted and measured rolls wear in Dofasco. a) Stands F1-F3, after rolling a complete campaign of three strip grade types. b) Stand F4 after an interrupted campaign; first after rolling grades 1+2 and then after rolling just grade 3 (after roll-changing)

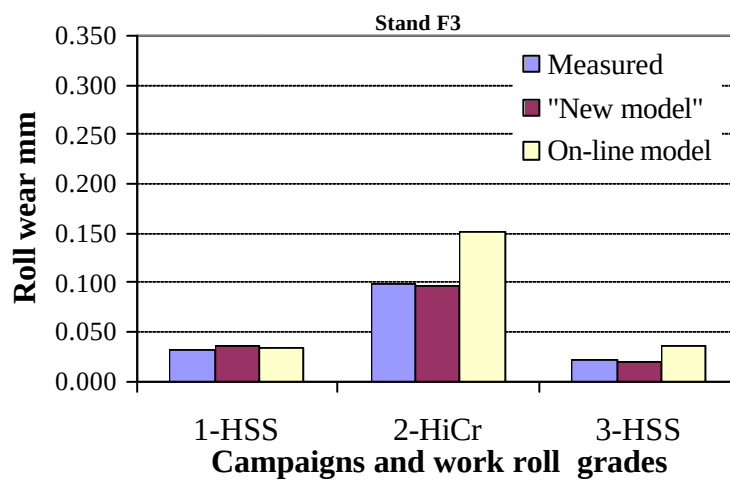
Fig. 4a-f shows the result of three campaigns, of **SSAB**, with similar rolling conditions and mixed roll grades. HiCr work rolls were used in stands F1 and F4 while HSS stand F2, in all three campaigns.



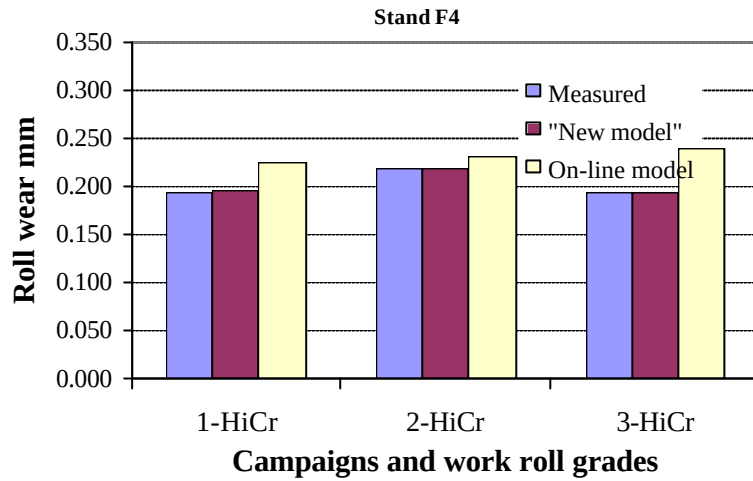
(a)



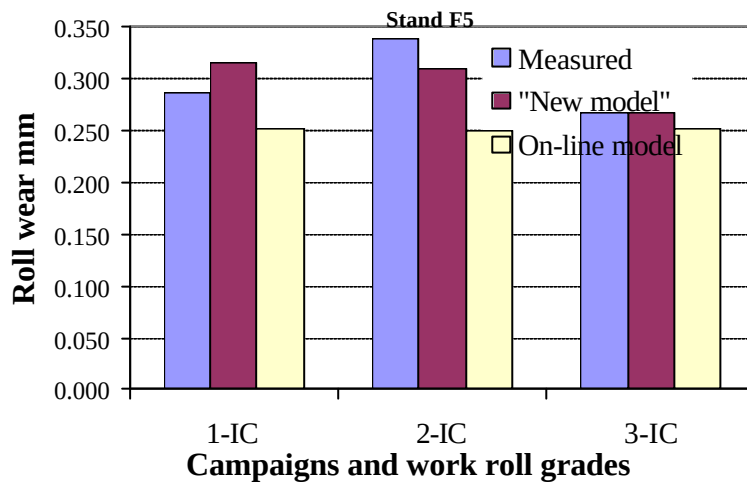
(b)



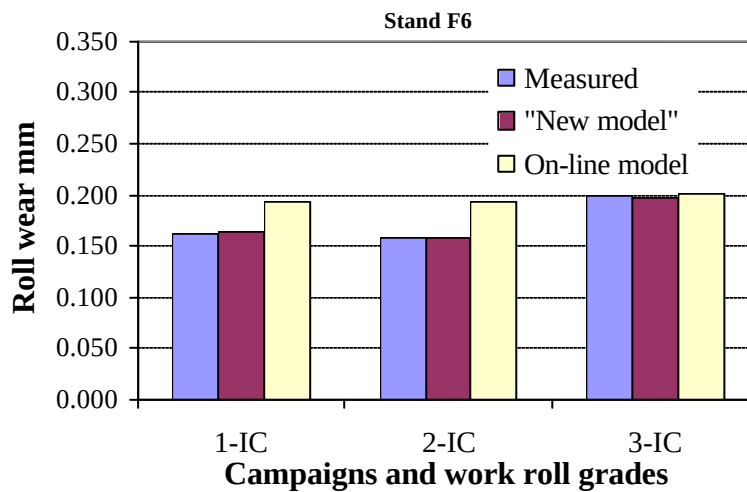
(c)



(d)



(e)



(f)

**Fig. 4.** Evaluations of the Model 1 and Model 2 using measured roll wear as a reference.

Concerning roll wear evaluation in a lubricated condition; authors propose a separate similar investigation of the early finishing stands, i.e. determining wear factors in a lubricated condition.

### Advantages and the new developed model

An accurate work roll wear prediction model, of for hot rolling, was developed in this project.

The new prediction model takes in consideration:

- More influential parameters
- Roll-wear contribution from strip/work-roll and work-roll/back-up roll
- Different strip grade qualities
- Different roll grades, HSS, HiCr and IC
- Rolling temperature

and the advantage of using a new model is among others:

- Increasing of rolled length without jeopardizing the strip quality
- Increasing the work-roll life by using the accurate roll wear prediction
- Decreasing the costs of cooling (after roll change and before grinding), grinding and storage in grinding-workshop
- Minimizing unnecessary roll changes and stop times due to inaccurate roll wear prediction
- **Saving energy**

### Interpretation of results in relation to project goals

The idea was in the first place to develop an accurate model of work roll wear allowing present day wear prediction to be adjusted to the project result and secondly to improve weaknesses of present day prediction. Adjustments could comprise new situations like lubrication, cooling and new materials.

A fraction of the material scrapped because of error in:

- flatness
- bending

depends on error in roll wear prediction.

An accurate roll wear prediction model also allows increased campaign length. This allows higher efficiency in reheating the material before rolling. The following tables, table 3 and 4 exhibits the status and the target of the project.

**Table 3.** Exhibits the status (weight% scrapped):

| Item                 | Rolling | Cut to length | Customer complaint |
|----------------------|---------|---------------|--------------------|
| Flatness and bending |         | 2.2%          | 0.06%              |
| Campaign length      | 110 km  |               |                    |
| Scrap                | 0.48%   |               |                    |

**Table 4.** Exhibits the targets (weight% scrapped, improvement) from implementation of results of this research project:

| Item                 | Rolling | Cut to length | Customer complaint | Improvement |
|----------------------|---------|---------------|--------------------|-------------|
| Flatness and bending |         |               |                    | 0.1%        |
| Campaign length      |         |               |                    | 2 km        |
| Scrap                |         |               |                    | 0.025%      |

It is judged by the participating industries that the targets will be met. Table 5 exhibits the energy saving from higher yield and longer campaigns (GWh /5Mton):

**Table 5.** Exhibits the energy saving from higher yield and longer campaigns (GWh /5Mton):

| Item                 | Rolling | Cut to length | Customer complaint | Energy saving |
|----------------------|---------|---------------|--------------------|---------------|
| Flatness and bending |         |               |                    | 16            |
| Campaign length      |         |               |                    | 3             |
| Scrap                |         |               |                    | 4             |

## Project presentation

### **Problem addressed**

The thickness profile of rolled strip is highly dependant on roll wear. Normally the rolls are worn more at the edges of the strip. In case a long series of strips of the same width are rolled, this is obvious. Modern technology, however, allows shifting of the rolls axially and roll profiles such that roll wear is distributed more evenly. Optimization of the roll shift requires a good prediction of roll wear. Up to now, a number of simple and crude models of work roll wear at hot rolling were in use. They often contain assumptions, scarce historical data and experiments. Updating of these models takes a long time, for example at introduction of new roll materials.

### **Aims and goals**

The idea was in the first place to develop an accurate model of work roll wear allowing present day wear prediction to be adjusted to the project result and secondly to improve weaknesses of present day prediction. Adjustments could comprise new situations like lubrication, cooling and new materials.

### **Methods and approach**

Stepwise approach of the project, which is also published in four papers, is shown in Fig. 5.

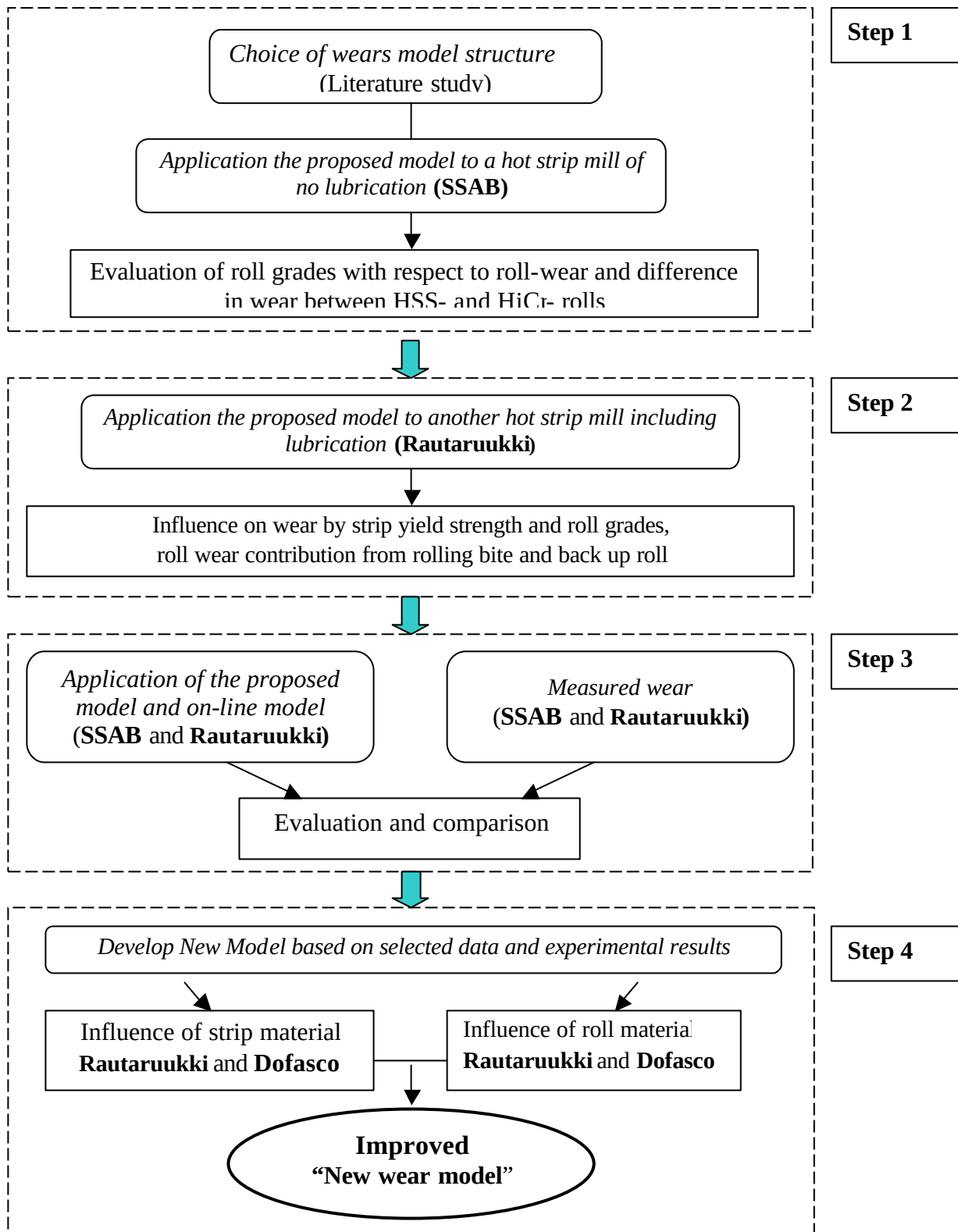
The publications of step I-4 in figure 5 are:

1. M. Tahir and B. Widell, Prediction of roll wear by means of proposed model, *Preceedings of the 10<sup>th</sup> Nordic Symposium on Tribology, Nordtrib 2002*, Stockholm, Sweden, June 9-12, 2002
2. M. Tahir and B. Widell, Prediction of roll wear for HSS work roll in regard to different strip grades, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Rolls Conference "Rolls 2003"*, Birmingham, UK, April 9-11, 2003
3. Tahir and B. Widell, Roll wear evaluation of HSS, HiCr and IC work rolls in hot strip mill, *J. Steel Research*, Volume 7, No. 10, pp. 624-630, 2003.
4. M. Tahir, B. Widell, and U. Ståhlberg "Improved modeling of work roll wear prediction" submitted to *J. Journal of Materials Processing Technology*, Oct. 2003.

### **Benefits from the research in relation to Energimyndigheten's mission**

Benefits from the research in relation to Energimyndigheten's mission can be seen from "results in relation to project goals" and "advantages and the new developed model" above.





**Fig. 5.** Schematic picture, that shows the principle structure of this project dealing with the development of a roll wear model.



|                                                                                                                                            |                                                             |                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins värmnings-,<br>bearbetnings- och materialpaket,<br>1999-2003                                    |                                                             | <b>Projekt</b><br>31040, Förbättrad planhet och inre<br>spänningar vid kallvalsning av spaltband<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>2 682 500 kr                                                                                                              | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-05-03 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                                    |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>AB Sandvik Materials Technology AB<br>ABB Automation Technology Prod.<br>AvestaPolarit Finn Strip |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                              |
| Adress<br>MEFOS, Box 812, 971 25 Luleå                                                                                                     |                                                             |                                                                                                                                                                                    |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Thorbjörn Hansén, thorbjorn.hansen@mefos.se                            |                                                             |                                                                                                                                                                                    |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Cold rolling of slit strip, Jernkontorets forskning, serie TO.                                             |                                                             |                                                                                                                                                                                    |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Möjligheterna att styra bandets sidorörelse med de styrdon som finns att tillgå i ett modernt mångvalsars verk har analyserats med multivariat dataanalys och planerade försök och det står utom allt tvivel att det ej är möjligt att kontrollera bandets rörelser i sidled i eller i närheten av valsgapet.

FE-simuleringar av valsning av spaltband har visat att det är möjligt att styra bandets sidoläge på haspeln med hjälp av brytrullar monterade mellan haspel och valsgap och som vinklas i horisontalled och/eller vertikalled.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Den multivariata dataanalysen och de påföljande planerade försöken har visat att det inte går att styra bandets sidorörelse med styrdon som finns att tillgå i moderna mångvalsars verk. Andra metoder måste därför användas och det mest lovande är att implementera ställbara brytrullar mellan valsgap och haspel. Denna konstruktion har vid FE-simuleringar visat sig kunna ge en vinkel-förändring såväl som en parallellförflyttning av bandet beroende på hur de nyttjas.

De först studerade styrmöjligheterna hade inte medfört några större investeringskostnader. Tyvärr är det så att ställbara brytrullar kräver en hel del ombyggnad som exempelvis ett utökat avstånd mellan haspel och valsgap för att möjliggöra installation av extra brytrullar. Det är av den anledningen viktigt att arbeta vidare med extra brytrullar för att definiera arbetsområde och effekt av dessa genom simuleringar och försök i pilotskala. Det måste kunna bevisas att tekniken med yttre brytrullar fungerar till 100 % innan något verk investerar i den nya tekniken.

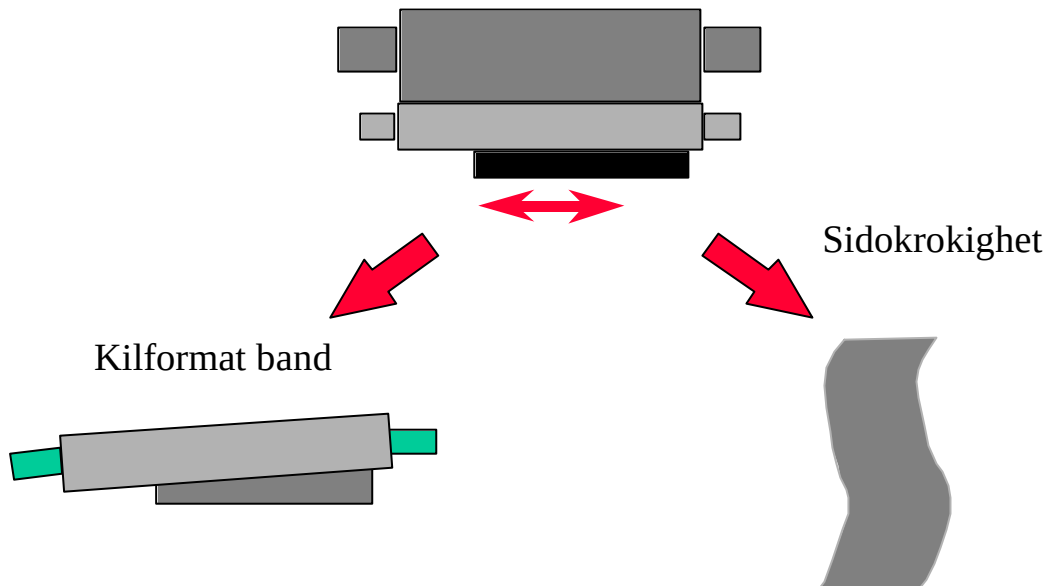
## Projektpresentation

### Problemställning

Tillverkare av precisionsvalsade stålband tillverkar av olika anledningar smala band. Med smala band avses band smalare än 800 mm. Det är vanligt idag att breda varmvalsade och ibland även kallvalsade band köps in och slittas i två eller fler smalare band innan de levereras till precisionsvalsverket.

Den asymmetriska eller kilformade tjockleksprofilen i ett slittat band orsakar ofta problem under kallvalsningen. Bandet har en tendens att flytta sig i sidled med påföljande svårigheter att haspla bandet rakt. Dessutom är det ibland omöjligt att få homogena mekaniska såväl som geometriska egenskaper i det färdiga bandet.

## Bandstyrningsproblem



### Syfte och mål

Målet med detta projekt är att förbättra styrningen och hasplingen av slittade band med asymmetrisk tjockleksprofil. Genom att eliminera eller radikalt minska bandets sidorörelse kan tidsödande omhaspling av band undvikas. Vidare erhålls en förbättring av utbytet då kantskärning/skrotning till följd av bandvikningar och dålig haspling undvikas.

### Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.

Det är nu utrett att styrningen av bandets sidoläge ej är möjlig med hjälp av de styrmedel ett modernt reversibelt mångvalsars verk erbjuder. Andra metoder måste tillgräpas och som projektet visat med FE-simulering kan sidoläget regleras med yttre styrrullar som vinklas i horisontal och/eller vertikalplanet.

En 10 % reduktion av utbytesförlusterna vid valsning av spaltband motsvarar för i projektet deltagande företag ett minskat energibehov på cirka 5,1 GWh



|                                                                                                                              |                                                             |                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                     |                                                             | <b>Projekt</b><br>31041, Prediktering av slutegenskaper efter<br>varmbandvalsning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>10 753 601 kr                                                                                               | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-08-17 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                     |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>IM<br>AB Sandvik Materials Technology<br>Rautaruukki Oy<br>SSAB Tunnpå AB, Borlänge |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                               |
| Adress<br>Box 812, 971 25 Luleå                                                                                              |                                                             |                                                                                                                                                                     |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Mats Karlberg, mats.karlberg@mefos.se                    |                                                             |                                                                                                                                                                     |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Prediktering av materialegenskaper för varmband,<br>Jernkontorets forskning, serie TO.       |                                                             |                                                                                                                                                                     |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Inom ramen för projektet har en övergripande prediktionsmodell för prediktering av mikrostruktur samt mekaniska egenskaper utvecklats. Nedan beskrivs det huvudsakliga arbetet med fysikaliska modeller, empiriska modeller, process och lab-datainsamling samt implementering.

### Fysikaliska modeller

De fysikaliska modeller som används beskriver följande materialprocesser:

- Upplösning och utskiljning av partiklar, t ex karbo-nitrider.
- Korn tillväxt under påverkan av utskiljningar och dislokationer.
- Rekristallisation under påverkan av utskiljningar och dislokationer.
- Dislokationsutveckling under påverkan av deformation, återhämtning, rekristallisation och i viss mån av utskiljningar.
- Fasomvandlingen från austenit till ferrit, eutektoid och martensit, med hänsyn till effekter av utskiljningar, kornstorlek och dislokationsdensitet.
- Flytspänningen beskriven genom en dislokationsmodell.

Dessa modeller innehåller materialkonstanter och parametrar som passats mot laboratoriedata som samlats in från tidigare publicerade arbeten och samarbetsprojekt inom IM och JK.

## Empiriska modeller

För att kunna beräkna drivande kraften vid upplösning och tillväxt av de partiklar som finns närvarande i materialet behövs termodynamisk information. Termodynamiken kan hämtas från en extern programvara som kopplas till Matlab-programmet eller från de neurala nätverk som har utvecklats inom ramen för detta projekt. Nätverken har byggts upp och tränats mot termodynamiska data som kommer direkt från den termodynamiska programvaran. Arbetet med att utveckla nätverken har utförts på MEFOS.

Fördelen med att använda neurala nätverk som beskriver termodynamiken jämfört med att koppla en extern programvara till Matlab är framför allt snabbheten och pålitligheten. Beräkningarna med neurala nätverk gick ca 5-10 gånger fortare vid tester på enbart återuppvärmningsförlopp. För att kunna beskriva alla samspel mellan faser och legeringselement används totalt 46 neurala nätverk. Vid hög temperatur ska interaktionen mellan grundmassan, austenit, och en sekundär fas som t ex karbo-nitrider eller AlN för olika materialsammansättningar kunna återges.

## Processdata och mikrostrukturanalys

För att trimma in modellerna mot ett valsverk behövs processdata. Den datamängd som har samlats in kan beskriva tid-, temperatur- och deformationsförloppen för banden (längs hela banden). Dessutom har processparametrar som kan indirekt påverka slutresultatet tagits med, t ex valskraft, valsdiameter, valshastighet. Data från band som täcker in i stort sett hela SSAB Tunnsplåts produktprogram har insamlats. De stålsorter som data samlats in för är CMn-stål, HSLA med tillsatser av mikrolegeringselementen Nb, Ti, V och högkolhaltiga stål. Från varje band som data samlats in från har prover för mikrostrukturanalys och dragprovning tagits enligt ett bestämt mönster, se Figur 1. En längdprovstav och en tvärprovstav är centrerade i mitten, och de andra två används som dubbelprov. Från den längdprovstav som är centrerad i mitten tas små prover för mikrostrukturanalys. Sammanlagt har data från 240 band samlats in. Där det är möjligt har provkupper klippts ut i ena änden och i mitten av bandet. Mikrostrukturanalys har gjorts av 320 prover, dvs ofta två prover från ett och samma band.

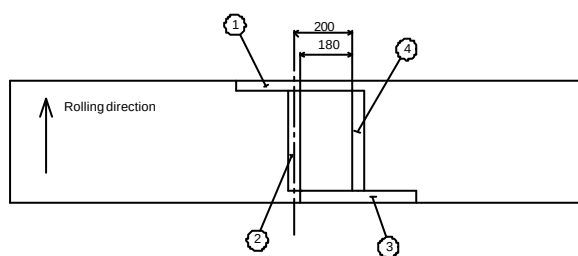


Fig. 1 Probstavarna klipps ut enligt följande mönster. Probstav 1 och 2 är centrerade i mitten och probstav 3 och 4 används som dubbelprov.

Vid mikrostrukturanalysen har ett bildanalyssystem för ljusoptiskt mikroskop använts. Man har mätt fasandelar, kornstorlekar och kornstorleksfördelning samt gjort en uppskattning av lamelltjockleken i perlit, grov, medel eller tunn för varje prov. Strukturerna kan skilja sig mycket åt beroende på stålsort. Den uppmätta mikrostrukturen används för att passa den beräknade mikrostrukturen.

En relationsdatabas som innehåller processinformation, resultat från både dragprovning och mikrostrukturanalys har skapats. Från databasen kan man sedan ta ut tid-, temperatur- och deformationsförlopp för varje band.

## Programbeskrivning

För att beräkna de mekaniska egenskaperna behöver sammansättning och tid-, temperatur- och deformationsförlopp för hela valsprocessen anges. Ett grafiskt användargränssnitt (GUI) har

skapats i Matlab för att enkelt kunna läsa in laboratorie- och processdata till modellen. I Figur 2 visas huvudfönstret för mikrostrukturmodellen. Befintliga data visas i grafen, det kan t ex vara kornstorleksmätning vid olika temperaturer och deformationer eller fraktionen partiklar i materialet efter en simulerad uppvärmning. Nere i vänstra hörnet kan man välja om beräkningen ska genomföras med termodynamik från neurala nätverk eller ett externt beräkningsprogram, ThermoCalc, kopplat via Matlab. Det finns också möjlighet att välja vilken metod som skall användas vid lösningen av de differentialekvationer som bygger upp modellerna.

När ett material för en beräkning har valts visas data för det materialet i fönstret i Figur 3. Det är tid-, temperatur-, deformationsförlopp samt eventuella mätresultat från laboratorieförsök. I Figur 4 visas fönster med modellparametrar, där det även är möjligt att ändra på värdena.

Under en beräkning kan man välja vilken parameter som ska plottas för att illustrera hur beräkningen fortskrider. I Figur 5 plottas hur fraktionen partiklar i materialet varierar med tiden.

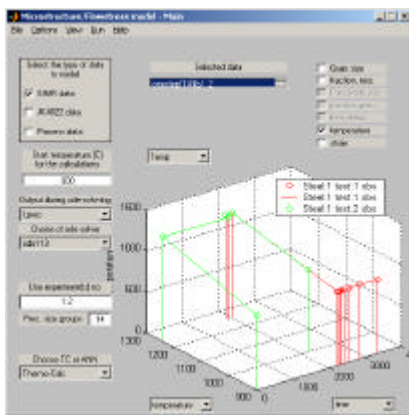


Fig. 2 Huvudfönstret för mikrostrukturmodellen där material för beräkningen väljs.



Fig. 3 Data för valt material.

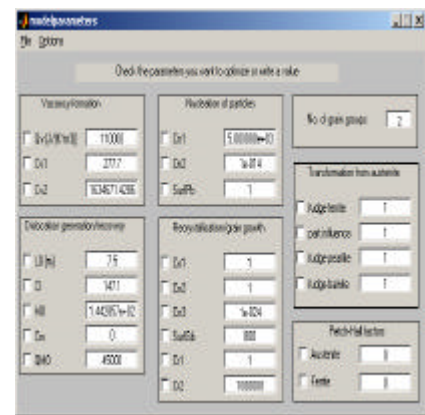


Fig. 4 Modellparametrarna anges, med möjlighet att ändra värdet.

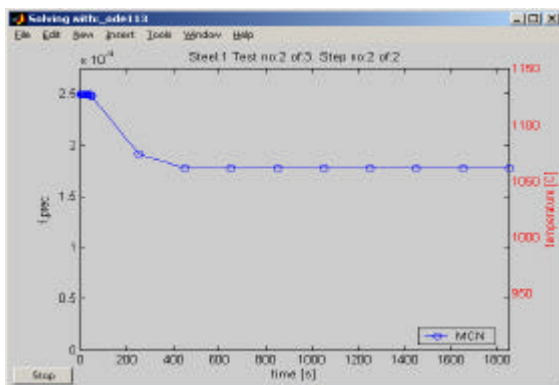


Fig. 5 Under beräkningen visas i detta fall fraktionen partiklar.

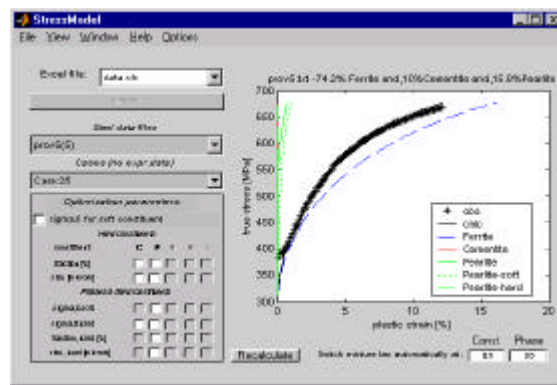


Fig. 6 Gränssnittet för flytspänningsmodellen. Val av parametrar för optimering möjlig.

Flytspänningsmodellen har ett eget GUI med möjlighet att läsa in dragprovkurvor och mikrostrukturinformation, se Figur 6. Här väljs även vilka modellparametrar som ska optimeras.

## Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Sammankopplingen och till viss del utveckling av de fysikaliska modellerna är gjord inom projektet. Ett GUI har skapats för att enkelt läsa in laboratorie- och processdata till modellen. En grov passning av materialkonstanter och parametrar baserad på erfarenhet är gjord. För att på sikt använda programmet i processdatorerna måste beräkningstiden för en valsning vara mycket snabb. Ett led i att minska beräkningstiden är att använda neurala nätverk för prediktering av den termo-

dynamik som är nödvändig för de fysikaliska modellerna. Dessa nätverk har utvecklats inom ramen för detta projekt.

Målet för projektet har till en del uppnåtts. För att skapa ett predikterande system återstår finjusteringen av modellparametrar och test av modellen för ett helt valsförlopp för olika stålsorter. För att passa materialmodellerna mot valsningsprocessen behövs mikrostrukturinformation. Den beräknade mikrostrukturen jämförs och passas mot den uppmätta. På IM har man utfört kvantitativ mikrostrukturanalys på ett stort antal materialsorter som ska användas för att trimma in materialmodellerna.

Nuvarande modell kan användas för att optimera återuppvärmningen av ämnen, som är den första delprocessen vid varmvalsningen. En gruppering av materialet sker beroende på stålsort. Anpassningen av värmningen sker med tid och/eller temperatur för att vara så energieffektiv som möjligt.

## Projektpresentation

I detta multipartner projekt har MEFOS, SSAB Tunnpå, Rautaruukki, Sandvik och IM deltagit. IM har arbetat med materialmodeller under en mångfald år, MEFOS med processmodeller och hybridmodeller. Ståltillverkarna tillhandahåller processdata och göra kontrollerade provuttag för anpassning och verifiering av modellerna. Slutligen kan de använda de färdiga modellerna för uppföljning av produkttegenskaperna, processoptimering och processtyrning mot önskade egenskaper.

## Problemställning

Modeller med syfte att beskriva mikrostruktur och mekaniska egenskaper under och efter varmbearbetning har utvecklats under flera decennier och i takt med datorutvecklingen har även komplexiteten av dessa ökat. Trenden är tydlig mot allt mer fysikaliskt baserade modeller används i kombination med empiriska modeller. Enbart empiriskt baserade modeller har begränsningar då komplexa samband råder t ex vid modellering av HSLA stål. Samtidigt har processsystemen utvecklats mot allt bättre mätning av bl a temperaturförlopp och dessutom gjorts mer lättillgängliga via olika databaser. Utifrån detta har projektiden formulerats. Använd data från befintliga processsystem i fysikaliskt baserade materialmodeller för prediktion av mikrostruktur. Anpassa prediktionerna till verklig processmiljö genom statistiska metoder (t ex neurala nätverk), dvs bygg en hybridmodell.

## Syfte och mål

Syftet och målet med projektet har varit att utveckla en modell för prediktering av mikrostruktur och mekaniska egenskaper i varmvalsade band, lämplig för integrering i processdatorsystemen. Detta skulle utföras i ett antal steg,

1. sammanställning och implementering av befintliga fysikaliskt baserade modeller för mikrostrukturutveckling under hela processen.
2. från slutstrukturen modellera de mekaniska egenskaperna.
3. anpassa modellerna mot befintliga laboratedata.
4. extrahera relevant processinformation, dvs tid, temperatur och deformationsförlopp för varmvalsade band, göra kontrollerade provuttag för dragprovning och mikrostrukturanalys.
5. applicera modellerna på de insamlade processdata.
6. göra en slutlig anpassning av prediktionerna till uppmätta egenskaper.
7. använda prediktionerna för kontinuerlig egenskapskontroll och därigenom förbättrad produktion med åtföljande energivinster.

Kärnan i predikteringsystemet (1 och 2 ovan) har gjorts så generell som möjligt, dvs den kan utan större förändringar anpassas mot en mångfald materialtillverkande industrier.

Målet för projektet har till en del uppnåtts. Punkterna 1, 2 och 4 är huvudsakligen slutförda. Punkt 3 kräver mer arbete. När det väl är utfört är de övriga punkterna inom nära räckhåll.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Den förväntade energirelaterade nyttan med ett predikterande system är mångfaldig. Olika processteg kan optimeras, t ex kan den mycket energikrävande återuppvärmningen av stålämnen optimeras. Skrotningen av bandändar kan optimeras, materialprovningen reduceras mm. På sikt möjliggör ett predikterande system styrning av processen mot bestämda målparametrar och därigenom produkter med jämnare egenskaper både längs och tvärs bandet.

I dag producerar SSAB ca 2 300 000 ton varmvalsat stål. Av detta är ca 95 % av acceptabel kvalitet, dock med en viss spridning i egenskaperna. Övriga ca 5 % visar brister vid provningen. Detta kan bero på att provuttaget är gjort för nära änden av bandet eller genom att bandet har fått felaktiga egenskaper av någon anledning. Allt som inte fyller måttet blir naturligtvis en extra belastning, dvs måste produceras ånyo. Energiåtgången för produktion av ett ton omsmält stål är ca 3 150 kWh. Detta innebär att idag finns en möjlighet att minska energibehovet genom minskade ombeställningar eller omklassning samt effektivare avskrotning av material med ca 0,5 % per år. Energibesparingen blir då ca 36 GWh per år.

Potentialen för energirelaterade besparingar finns inom detta projekt så även intresset från industrin för att slutföra och tillämpa denna forskning trots att projektet är avslutat. Arbetet med att skapa en fullständigt utvecklad modell är massivt och kommer kräva ytterligare resurser innan ett det fullt ut går att värdera energi besparingen kvantitativt. I dagsläget arbetar dock såväl SSAB som Rautaruukki för en applicering av modellen inom respektive valsverk.





|                                                                                                       |                                                             |                                                                                                                                                     |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-<br>Bearbetnings och Materialpaket<br>1999-2003 |                                                             | <b>Projekt</b><br>31042, Termomekanisk bearbetning av grovplåt<br><input checked="" type="checkbox"/> Pågående<br><input type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>4 388 273                                                                            | Tidplan, förväntade delrapporter<br>1999-12-17 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                     |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>SSAB Oxelösund<br>Institutet för Metallforskning AB<br>MEFOS          |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                               |  |
| Adress<br>613 80 Oxelösund                                                                            |                                                             |                                                                                                                                                     |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>bertil.ahlblom@ssabox.com         |                                                             |                                                                                                                                                     |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Slutrapport ej klar. Pilotskaleförsök oktober 2003.                   |                                                             |                                                                                                                                                     |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Genom att utföra laboratorieexperiment och modelleringsarbete har underlag skaffats för att på ett bra sätt kunna simulera egenskaperna vid tillverkning i pilot plantskala och fullskaleproduktion genom processerna normaliserande valsning och termomekanisk bearbetning med accelererad kylning. Jämförelse av resultaten från simuleringsförsöken visade sig stämma kvalitativt bra med fullskaleförsök med motsvarande betingelser, men hållfastheten var oftast marginellt lägre i fullskaleplåtarna.

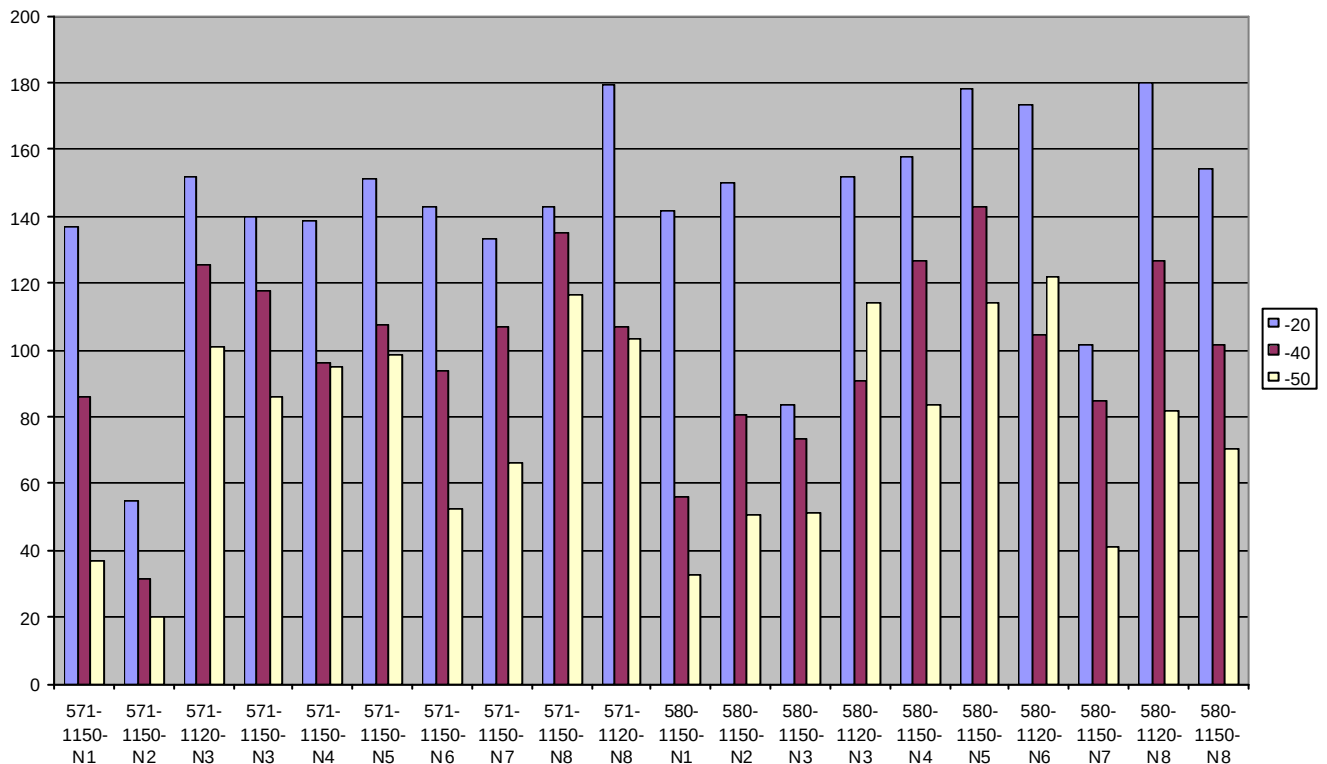
Hur ämnesvärmningstemperaturen påverkar utgångskornstorleken före valsning bestämdes för 3 stålsorter mikrolegerade med titan och vanadin eller niob. Vid en låg temperatur (1175C) visade det sig svårt att lösa upp tillräckligt av niob-karbonitriderna för att nå tillräcklig hållfasthet. Vid försöken tillämpades ett par olika stickscheman enligt nedanstående principer. De olika fallen kan till en viss del härledas till verkliga situationer orsakade av algoritmer vid stickschemagenereringen, ämnesvridningar, planhetsstyrning el. dyl.

Valsningsförsök i pilotskala med normaliserande valsning vid BTF visar på möjligheter att påverka de mekaniska egenskaperna hos titan-vanadin-mikrolegerade stål. Under valningsförsöken mättes ämnens temperatur med hjälp av termoelement som placerats i hål, borrade i ämnena. I varje ämne placerades sex termoelement, två i vardera överytan, centrum samt underytan.

Vid försöken tillämpades följande stickscheman för 40 mm plåttjocklek:

- N1. Lika stora reduktioner i varje stick (referens).
- N2. Första stick delat i två små.
- N3. Minska de första två sticken och maximal reduktion i det sista.
- N4. Minska de första två sticken och maximal reduktion i de två sista.
- N5. Minskat förstastick, maximal reduktion i näst sista stick plus 2% slätstick.
- N6. Minskat förstastick, maximal reduktion i näst sista stick plus 4% slätstick.
- N7. Litet stick i mitten av stickserien.
- N8. Lika stora stick. Paus innan sista stick, slutvalsningstemperatur c:a 900C.

Slagsegheten för de olika varianterna visas i figuren nedan. 571 och 580 är olika kemiska analyser och 1150C respektive 1120C är olika ämnestemperaturer.



Resultaten visar att valsningsschemat inte påverkar hållfastheten nämnvärt. Däremot kan segheten förbättras enligt figuren ovan genom:

- Sänkt slutvalsningstemperatur i sista stick genom en paus i valsningen.
- Sänkt ämnestemperatur till 1120C (vilket även sänker slutvalsningstemperaturen).
- Maximal reduktion i slutet av valsningen.

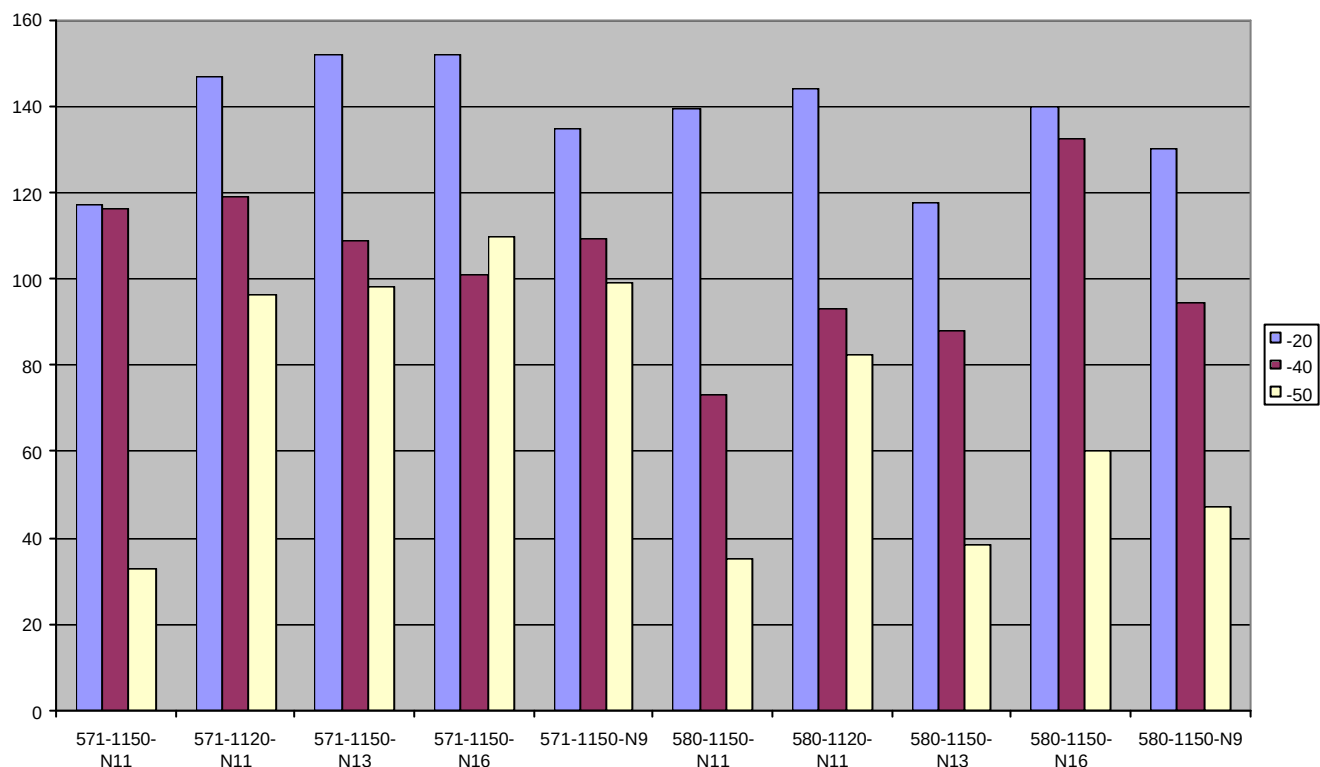
Ett slutstick på upp till cirka 4 % i reduktion efter det kraftiga valssticket ger ingen allvarlig försämring av segheten men simuleringsmodellen räknar med att detta ska ge en förhöjd kornstorlek. Här behövs vidare trimning av kornstorleksberäkningsprogrammet. Om ett sådant stick tillämpas för att förbättra planheten bör nog reduktionen inte överstiga cirka 2 %.

Av de studerade stålsorterna gav den med lägre kolhalt (571) bäst resultat.

De stickscheman som användes för 70 mm plåttjocklek visas nedan:

- N9. Lika stora reduktioner i varje stick (referens).
- N11. Två små inledande stick. Stor reduktion i sista sticket.
- N13. Kraftigt näst sista stick med efterföljande slätstick.
- N16. Lika stora stick. Paus innan sista stick, slutvalsningstemperatur c:a 900C.

Seghetsutfallet i längsriktningen vid olika temperaturer visas i figuren nedan:



Resultaten från 70 mm plåtarna pekar i samma riktning som för 40 mm. Det ser dock ut som om den slumpvisa spridningen i resultat är större för 70 mm.

Analys av provresultat från motsvarande stålsort fullskaleproduktion visar inget enkelt samband mellan valsningsschema och plåtarnas seghet. Det kan bero på att andra faktorer såsom variationer i kemisk analys mellan olika charger, har större betydelse än slumpvisa variationer orsakar. Därtill krävs systematisk styrning av valsningen efter ovanstående principer.

För att studera större variationer utfördes experiment med sänkt slutvalsningstemperatur i plåttjocklekar på 40 och 70 mm. För samtliga fall blir segheten bättre med sänkt slutvalsningstemperatur ned till 850 C. Där börjar dock hållfastheten (speciellt sträckgränsen) stiga något, vilket visar att gränsen för vad som är tillåtet vid normaliserande valsning ligger i detta område.

Försöksserien vid BTF med accelererad kylning är i skrivande stund inte färdigprovad. Rapporten kommer att kompletteras med dessa resultat senare.

Arbetet med att konvertera seghärdad plåt i hållfastheter kring 420-500 MPa kan dock bli problematisk om vi inte kan komma tillrätta med problemen med tillverkningssäkerhet vi brottats med för tjockare plåt.

Parallellt med detta arbete har valsningsprocessen trimmats i plåtproduktionen. Samtidigt har ämnestemperaturen sänkts generellt, men kampanjer med ned till 1150C används också för en stor

del av den normaliserande valsade plåten. Även om de mekaniska egenskaperna blir bra skapar detta problem med bland annat att risken för vätefel ökar. Annars har sänkningen inte inneburit några större problem för de flesta tunna plåtar. Bastemperaturen har också sänkts i flera steg från att ursprungligen legat klart över 1200 C till att idag ligga på 1170 C. För de tunnaste plåtarna krävs dock en högre temperatur. Användandet av 3 temperaturer ger dock flera problem när alla andra planeringsrestriktioner ska hanteras. Därför fortsätts arbetet med att finna en optimal ämnestemperatur med minimerade kampanjer. Faktiska energiförbrukningen påverkas mycket kraftigt av hur ugnarna fylls med ämnen och hur jämn produktionstakt de kan gå i.

### ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Eftersom SSAB Oxelösund AB koncentrerar produktionen på tillverkning av seghärdad plåt kommer övriga produkter med lägre hållfasthet att tvingas agera utfyllnadsorder och produktionsbuffert. Hur väl genomförda förändringar passar in mot energibesparingsmålen styrs inte bara av framgången i utvecklingsarbetet utan också av affärsmöjligheterna för att tillverka produkter som faktiskt tillåts levereras i normaliserande valsat tillstånd. Det bör ändå vara mest rättvisande att jämföra hur stor procentandel som tillverkas ugnsnormalisering. I jämförelsen nedan redovisas andelen ordinärt höghållfast stål som tillverkas utan ugnsnormalisering. Det är framför allt tjock plåt över 50 mm som ugnsnormaliserats av tillverkningstekniska skäl även om regelverken tillåter normaliserande valsning. Där har andelen ugnsnormalisering minskat från 27 % till ca 10% mellan åren 1999 och år 2003. Energibesparingen för en inbesparad ugnsnormalisering ligger på ca 1,35 GJ/ton. Genom minskad volym av dessa produkter och konvertering har volymen ugnsnormalisering under 2003 en prognos på ca 35 kton/år. Det mesta är tjock plåt som kräver 1,7 GJ/ton. Det finns fortfarande en teoretisk potential på upp mot 60 GJ/år om vi lyckas med implementeringen. Problemet med att stålsorterna bland annat de med de högsta seghetskraven inte klaras med denna processväg. Dessutom kräver vissa stålstandarder såsom tryckkärlsplåt ugnsnormalisering. Svenska myndigheter har här haft specifika krav men nu gäller EU-standardens krav. Det är dock inte visat att det går att tillverka de svåraste stålsorterna och de tjockaste plåtarna med normaliserande valsning.

Andelen seghärdad WELDOX-plåt i hållfasthet mellan 420 och 500 MPa har minskat från 36 % till 22 % under ovannämnda period. Samtidigt är det tveksamt att bedöma hur volymen av dessa produkter kommer att utvecklas i framtiden. Hittills har dock 2,5 kton konverterats från seghärdning med en energibesparing på ca 2,25 GJ/ton eller totalt 5,6 GJ/år.

Sänkningen i ämnestemperatur uppskattas normalt till att leda till en minskning av energiförbrukningen med 0,9 % per 10 C. Trots en kraftig sänkning av ämnestemperaturen verkar inte detta givit förväntade energivinster. För vidare diskussion av detta hänvisas till slutrapporten i JK 5144 "Effektivare energianvändning i ämnesugnar...."

För att lyckas räkna hem energibesparingsvinsten måste gissningsvis en bättre driftsstrategi för ett bättre utnyttjande av ämnesugnarna utvecklas.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Tillverkning av höghållfasta konstruktionsstål med en hållfasthet (sträckgräns) upp till 355 MPa och höga krav på seghet och svetsbarhet sker traditionellt genom så kallad ugnsnormalisering. Egenskaperna nås då först efter en separat värmebehandling efter valsningen. För att spara energi och kostnader har till stor del den traditionella valsningen ersatt med normaliserande valsning där egenskaper likvärdiga med ugnsnormalisering kan nås i valstillstånd. Det är emellertid svårt att klara de högsta seghetsklasserna och de grövsta plåttjocklekarna. För att klara detta behöver stålets sammansättning och valsningsprocessen kartläggas och optimeras ytterligare. En viktig

förutsättning för detta är att SSAB Oxelösund har investerat i ett mycket kraftfullt varmvalsverk för grovplåt, som gör det möjligt att starta valsningen vid en lägre ämnestemperatur men också ta större tjockleksreduktioner i varje valsstick. Detta leder till att man valsar fram plåt med mindre kornstorlek (kristallstorlek) vilket samtidigt ger en förhöjd hållfasthet och en bättre seghet i stålet. Det går alltså att spara energi genom att undvika en separat värmebehandling (ugnsnormalisering) men också genom att värma de stränggjutna ämnena till en lägre temperatur.

Tillverkning av stål med högre hållfasthet kan ske med olika metoder:

1. Ugnsnormalisering av en mer legerad stålsort. Detta har nackdelen att stålet får en sämre svetsbarhet, vilket medför ett ökat behov av energikrävande förvärmning före svetsning.
2. Seghårdning, som är en mycket effektiv metod att tillverka stål med hög hållfasthet, seghet och svetsbarhet. Detta kräver dock först en uppvärmning (motsvarande ugnsnormalisering) före hårdningen genom släckning i vatten. Sedan utförs en anlöpning vanligen vid 580-680C. Tillverkningskostnaderna gör att det är framför allt för de allra högsta hållfastheterna, som denna process är optimal, eftersom den ger de bästa egenskaperna.
3. Termomekanisk valsning innebär att valsningen styrs till lägre temperaturer än vid vanlig valsning och normaliserande valsning. På så vis kan högre hållfastheter upp till ca 500 MPa nås direkt vid valsningen. För tjockare plåt kan även en vattenkylning direkt efter valsningen till typiskt 500-650 C utföras för att klara så höga hållfastheter utan att behöva öka legeringsinnehållet i stålet. På så vis kan stål upp till ca 500 MPa tillverkas med mycket bra svetsbarhet utan någon separat värmebehandling. Svårigheten ligger i de praktiska svårigheter och begränsningar, som finns för tjock plåt.

Idag tillverkas stål i hållfastheter på 420-500 MPa med termomekanisk behandling upp till ca 40 mm. Det finns alltså en stor potentiell energibesparing om det går att optimera den termomekaniska processen och på så vis ersätta segghårdning för tjock plåt. Dessutom fås stål med bra svetsbarhet.

## **Syfte och mål**

Projektet har två huvudsyften:

1. Att kartlägga möjligheterna för att ersätta all ugnsnormalisering med normaliserande valsning genom optimering av valsning och stålsammansättning.  
Målet är att klara högre seghetskrav och utveckla en bra processföring för tjockare plåt.
2. Att vidga tillverkningsfönstret för termomekaniskt processade stål i hållfasthetsområdet 420-500 MPa.  
Målet är att lösa problemen med praktiska begränsningar för tjock plåt men också att nå höga segheter i tjock plåt i nivå med de krav som ställs för användning i oljeplattformar.

## **Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.**

SSAB Oxelösund har som kärnaffär att tillverka segghärdade höghållfasta konstruktionsstål och slitstål. Genom sin höga hållfasthet och slitstyrka skapas möjligheter för att bygga lättare konstruktioner och/eller öka deras livslängd. Andra möjliga energibesparingar ligger i enklare tillverkning (mindre svetsarbete), ökad nyttolast eller minskad bränsleförbrukning vid transporter. Vid tillverkningen används ofta samma ugnar för normalisering och anlöpning. Genom att undvika normalisering kan kapacitet frigöras för att tillverka de mest höghållfasta stålen via segghårdning utan att bygga fler ugnar. Dessutom slipper man tomgångskörning av ugnarna vid omställning från anlöpning till normalisering. (Det skiljer mer än 200C.)

Sett i ett totalperspektiv innebär en övergång till mer höghållfasta och högpresterande stål energivinster i slutförbrukarledet (t ex minskad bränsleförbrukning, ökad nyttolast eller ökad

livslängd). Eftersom närmare 90 % av vår tillverkning exporteras kan dock inte detta räknas Sverige tillgodo. En framgångsrik global energibesparing kan därför inte visa lika positivt resultat inom Sveriges gränser.



|                                                                                                                                                               |                                                             |                                                                                                                                               |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>"Energipaketet" - Stålindustrins Värmnings-, Bearbetnings- och Materialpaket, 1999-2003                                           |                                                             | <b>Projekt</b><br>31043, Höghållfasta stål för bilindustrin<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>1 918 500 SEK                                                                                                                                | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2001-12-19 – 2003-10-31 |                                                                                                                                               |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning<br>SSAB Tunnpå AB                                                                              |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                         |  |
| Adress<br>Drottning Kristinas väg 48, 114 28 STOCKHOLM                                                                                                        |                                                             |                                                                                                                                               |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Peter Segle, peter.segle@simr.se                                                          |                                                             |                                                                                                                                               |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Fully reversed strain controlled fatigue testing of high strength steels for car industry, Jernkontorets forskning, serie TO. |                                                             |                                                                                                                                               |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Utmattningsdata för ett flertal ultrahöghållfasta stål (UHS-stål) har genererats genom töjningsstyrd, fullt reverserad utmattningsprovning i intervallet  $10^4$  -  $10^6$  cykler. Utmattningshållfasthet som funktion av töjningsamplitud, plastisk töjningsamplitud, spänningsamplitud och Neuberparametern såväl som Coffin-Manson relationer har bestämts. Resultaten visar att rankningen av materialen påverkas både av val av parameter mot vilken rankningen görs och vid vilket cykelantal utvärderingen görs. Typen av applikation avgör rankningsförfarandet.

Genomförandet av projektet har vidare lett till att SSAB Tunnpå ökat sin kunskap om UHS-ståls utmattningsegenskaper och att IMs kompetens inom området töjningsstyrd utmattningsprovning av UHS-stål ytterligare höjts.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Genererade utmattningsdata bildar underlag för utmattningsdimensionering av bilkarossdetaljer i UHS-stål. Genom att använda dessa stål kan tunnare plåt utnyttjas och egenvikten hos bilarna kan därmed minskas. Energibesparingar erhålls då dels genom att en mindre mängd stål behöver tillverkas hos ståltillverkaren och dels genom att bränsleförbrukningen hos bilarna kan minskas.

Genom att olika typer av UHS-stål provats inom detta projekt kan en jämförelse mellan olika stål göras. Detta ger ökad kunskap om vad det är som är styrande för ståls utmattningsegenskaper. Detta leder i sin tur till att nya förbättrade stål kan tas fram i framtiden.

Projekresultaten lägger vidare grunden för rekommendationer för tillverkning och användning av UHS-stål inom bilindustrin.

## Projektpresentation

### **Problemställning**

Krav på sänkt energiförbrukning och minskning av avgasernas miljöpåverkan har lett till höjda krav på sänkt bränsleförbrukning för personbilar. En framkomlig väg att uppnå detta är att sänka bilens egenvikt. Detta kan åstadkommas genom en ökning av andelen höghållfast stål i karossen.

I det s.k. ULSAB-projektet visades det att karossvikten för en medelstor bil kan sänkas med nära 25 % genom användning av höghållfast stål. I projektet var dock cirka hälften av stålet material med en hållfasthet på 280 MPa eller lägre, d.v.s. stål med relativt låg hållfasthet. Det finns med andra ord en potential till att ytterligare sänka bilens egenvikt genom att använda höghållfasta stål med ännu högre hållfasthet som exempelvis UHS-stål. För detta krävs dock mera kunskap om UHS-stålets materialegenskaper.

En materialegenskap som är väsentlig vid dimensionering av en bilkaross är materialets utmattningshållfasthet. För stålsorter med lägre hållfasthet är utmattningshållfastheten relativt väl dokumenterad. För UHS-stålen är utmattningsdata dock bristfällig. Kompletterande utmattningsprovning av UHS-stålen är därför nödvändig för att dessa fullt ut ska kunna bli tillgängliga som konstruktionsmaterial i bilkarosser.

### **Syfte och mål**

Syftet med detta projekt är att generera utmattningsdata för ett antal UHS-stål nyttjande fullt reverserad töjningsstyrd utmattningsprovning. Genererade data bildar underlag för utmattningsdimensionering av bilkarosskomponenter tillverkade i UHS-stål.

### **Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.**

I de flesta av dagens nytillverkade bilar används höghållfast stål i karossen. Huvuddelen av de höghållfasta stålen har dock sträckgränser under 280 MPa, dvs en måttligt hög hållfasthet. Med de här stålen har bilarnas vikt kunnat reduceras och därmed bilarnas bränsleförbrukning kunnat minskas en del. Sänkningen som man hittills har uppnått är dock inte tillräcklig. Krav från myndigheter och önskemål från organisationer och allmänhet gör att energiförbrukning och utsläpp från bilavgaser måste minskas ytterligare. Genom att i bilkarosserna utnyttja UHS-stål som har avsevärt högre hållfasthet än de höghållfasta stål som nyttjas idag är detta möjligt.

Den direkta energibesparing som kan göras genom en produktionsminskning enbart i svenska stålverk genom införande av en större andel UHS-stål i bilkarosserna kan beräknas enligt följande:

Plåten kan göras 30 % tunnare med UHS-stål jämfört med stål med lägre hållfasthet. Det innebär att 100.000 ton enklare stål ersätts med 67.000 ton UHS-stål. Energibesparingen blir då med 6.351 kWh/ton från malm till band:

$$33.000 \text{ ton/år} \times 6.351 \text{ kWh/ton} = 210 \text{ GWh/år}$$

Vidare erhålls en minskad råvaruförbrukning i form av minskade mängder av järnmalm, koks, legeringar mm vid stålframställningen. Detta har också en positiv inverkan på energibesparingen.



En sänkning av vikten för personbilar genom att utnyttja UHS-stål ger inte bara den energibesparing som beräknats ovan. Andra positiva effekter är att bränsleförbrukningen minskar och avgasutsläppet minskar vilket är mycket positivt ur miljösynpunkt. Det är främst mängden CO<sub>2</sub>-utsläpp som minskar.

Den samlade energibesparing som redovisats ovan kommer att ge ett tydligt bidrag till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.



|                                                                                                                                                                       |                                                             |                                                                                                                                                   |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins värmnings,<br>bearbetnings och materialpaket                                                                               |                                                             | <b>Projekt</b><br>31044, Materialegenskaper vid bandgjutning<br><input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>1 600 000 SEK                                                                                                                                        | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2002-01-10 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                   |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning<br>SSAB Tunnplåt AB<br>AvestaPolarit AB<br>MEFOS                                                       |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                             |  |
| Adress<br>Drottning Kristinas väg 48, SE-11428 Stockholm                                                                                                              |                                                             |                                                                                                                                                   |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Bevis Hutchinson, bevis@simr.se                                                                   |                                                             |                                                                                                                                                   |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Processing and final properties of strip cast steel products containing copper and tin from scrap. Jernkontorets forskning, serie TO. |                                                             |                                                                                                                                                   |  |

## Summary

### Main results

Steels containing large contents of copper (up to 2.5%) and tin (up to 0.1%) were successfully processed in laboratory simulations of strip casting together with direct hot rolling of the strip products. This finding is in marked contrast to experience of conventional steel processing using slab casting with reheating for hot rolling, where severe cracking occurs during hot rolling for copper contents above about 0.2%. The strip casting route also offers significant saving of energy as compared to the existing process.

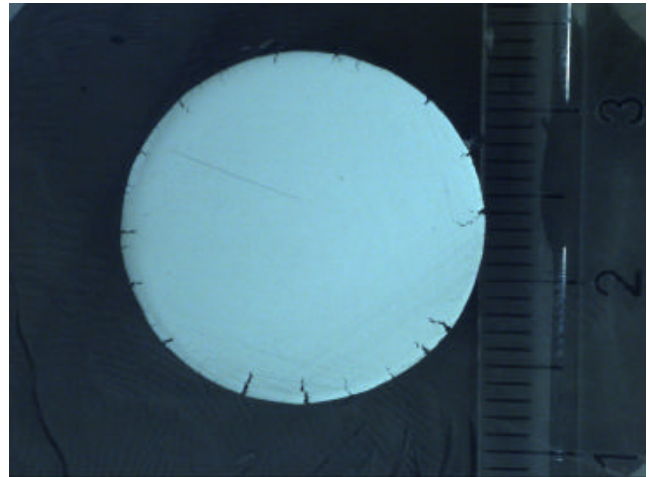
Copper and tin are so called tramp elements in steel scrap that cannot be removed in the remelting process and their accumulation in recycled steel is a subject of concern. The possibility of using strip casting together with direct hot rolling is therefore a significant development in a move towards sustainable development in the steel industry.

Ten steels containing different contents of copper and tin were prepared as 20kg ingots. A laboratory technique has been developed for testing the susceptibility to hot embrittlement using specially designed compression specimens. These were heated to simulate the final stage of the strip casting process and submitted to oxidation for various periods of time before testing. Figure 1 shows an example of one of these specimens after compression. Cracks can be seen in the central ring section due to the embrittling effect of copper enrichment at the surface. Examples of such cracks are seen more clearly when the specimens are sectioned, as shown in Fig.2. These kind of observations have been used to give a quantitative assessment of the conditions that will cause hot

cracking in terms of (i) chemical composition, (ii) temperature and (iii) time of exposure to oxidation



Fig.1 Hot deformed specimen of steel with 2.5%Cu after oxidation for 20s at 1100°C



Cross-section through the central ring of a test specimen containing 1.6%Cu after 20s at 1200°C

Processing windows are identified for steels having different contents of copper so that these can be produced without risk of serious surface cracking. A summary of results in Fig.3 shows that the most dangerous temperature with regard to hot cracking is around 1200°C and the critical time at temperature (during oxidation) before cracks appear becomes shorter as the content of Cu in the steel increases. With strip casting, the time available for oxidation is very short and so the process is much more tolerant of increased copper contents than is conventional processing.

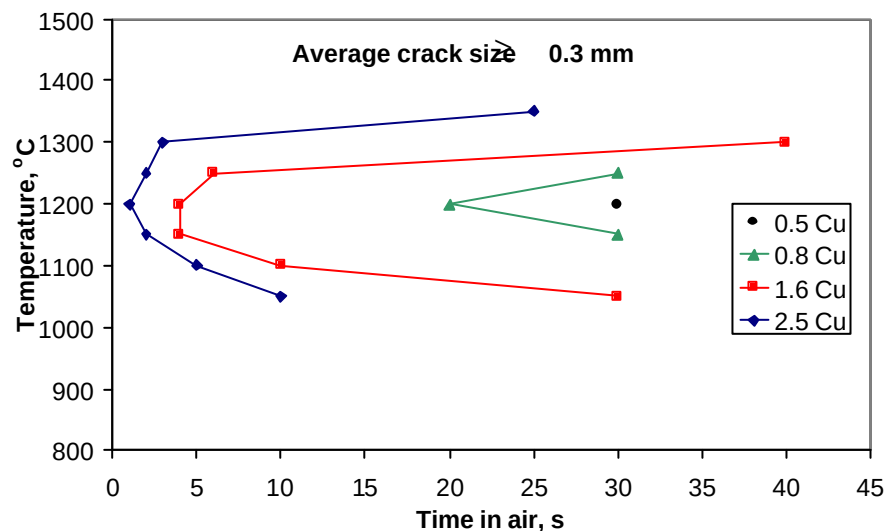


Fig.3 C-curves show the combinations of time and temperature where there is a danger of hot cracking for steels having different copper contents

The mechanism of surface degradation is confirmed to be associated with oxidation and enrichment of copper, leading to the formation of liquid films. This could be seen in optical micrographs such as Fig.4 where copper films and cracks delineate the austenite grain boundaries. Microanalysis in the scanning electron microscope confirmed the enrichment of copper (and tin) in the grain

boundary films. At high temperature, during testing, these films consisted of liquid metal which accounted for the ease of cracking.

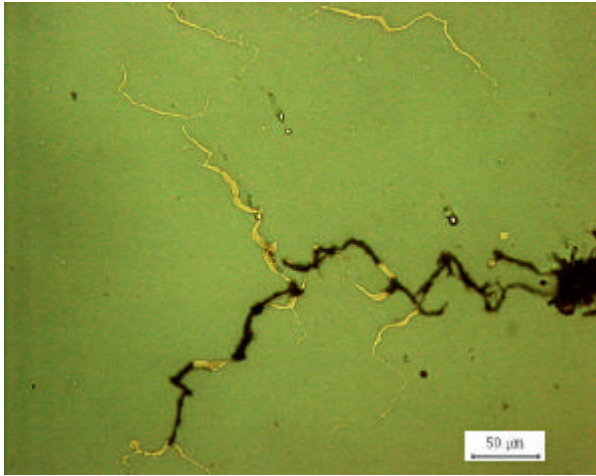


Fig.4 Optical micrograph showing a network of copper films delineating the austenite grain boundaries. Cracks (black lines) follow the copper films.

When copper contents in the steel exceed about 1% there is a very significant increase in strength level. The actual strength achieved then depends on the temperature at which the strip is coiled after hot rolling. Low coiling temperatures in the vicinity of 450°C give the greatest strengthening effect as shown in Figs.5 and 6 for steels having different contents of copper. The useful strength of the final product can be doubled in this way leading to yield stress values of up to 700MPa. As a result, impurities from the scrap can be used as very effective alloying elements to improve the quality of the steel at no extra cost.

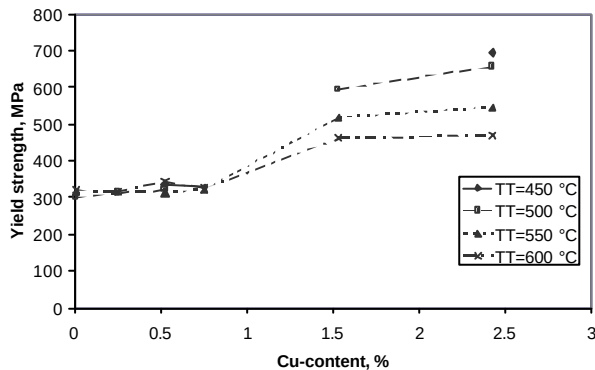


Fig.5 Yield stresses for steels with different copper contents and coiling temperatures (TT)

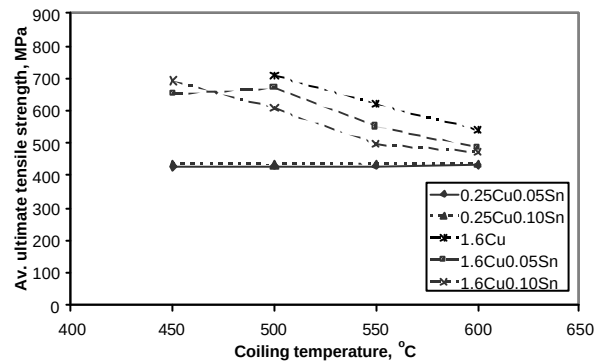


Fig.6 Tensile strengths for steels with different coiling temperatures and copper contents

The high strength levels demonstrated here are shown to be due to nano-scale precipitation of copper particles within the microstructure of these low carbon steels. Evidence for this is seen in the high magnification micrographs from transmission electron microscopy in Fig.7

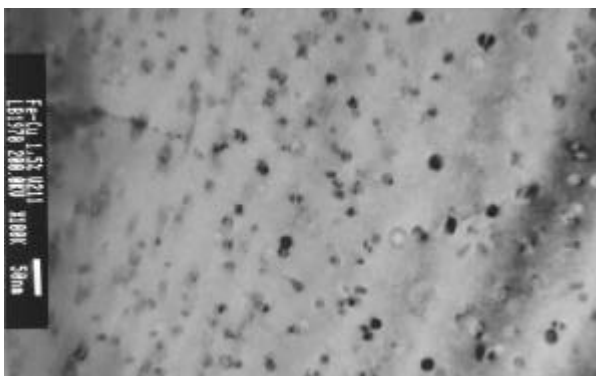


Fig.7 Transmission electron micrograph showing nano-sized particles of copper precipitated in the 1.6%Cu steel during the simulated coiling treatment. These particles are responsible for the great increase in strength that was obtained.

### ***Interpretation of results in relation to project goals***

Present results fulfill very substantially the aims set out at the start of the project. They demonstrate the feasibility of using strip casting together with direct hot rolling as an energy-efficient process for treating recycled steel scrap that has become contaminated with copper and /or tin. Critical conditions for avoiding the well known problem of 'hot shortness' are identified.

The original concept of using impurities in scrap as a means of improving the final mechanical properties is shown to be valid.

Scientific principles have been elucidated regarding the observed mechanical behaviour of the steel both during processing at elevated temperatures and in the final product condition.

## **Project presentation**

### ***Problem addressed***

Strip casting of steel to thicknesses in the range 2mm to 12mm is a new technology that is presently poised to break through into large scale production world-wide. After casting, the strip is rapidly fed into a hot rolling mill to reduce the thickness to the final gauge while at the same time creating desired surface condition and improving the metallurgical quality. Large pilot plants and small commercial scale units are already in operation in various countries and offer significant savings in energy by eliminating the need to reheat the steel during the process.

The question at the start of this project was whether this new technology could be utilised to take especial advantage of scrap as a raw material, especially when the scrap has become contaminated with other elements as a result of repeated recycling. In particular, it is known that conventional steel processing gives problems with surface cracking during hot rolling when the content of copper exceeds about 0.2%. The problem is exacerbated if small amounts of tin are also present. Environmental aspects of recycling, to make the best possible utilisation of scrap material, therefore, formed an important part of the thinking behind the project.

Although copper is known as a pest in normal steel processing it does have interesting aspects as an alloying element that improves strength and corrosion resistance among other things. A second question was, therefore, whether advantage can be taken of copper for improving the quality of the final product.

### ***Aims and goals***

The first aim of the work has been to determine conditions whereby steel scrap contaminated with copper and/or tin can be successfully processed via strip casting together with direct hot rolling and to identify process windows appropriate to different levels of impurities.

A second aim was to identify such improvements in final quality as could be achieved if copper is to be utilised as an alloy element (as opposed to being tolerated as an impurity). What levels of strength can be reached and what process parameters are important for their optimisation?

In addition to finding specific answers to the above questions, an on-going aim has been to understand the results and observations in terms of the underlying physical principles.

***Benefits from the research in relation to Energimyndigheten's mission***

It has been estimated that significant savings in total energy usage can be made if existing steel processing is modified towards the strip casting route with direct hot rolling. The energy saving has been estimated as 1000MJ per ton of steel produced which corresponds to 280 kWh. A conservative estimate of the potential saving is 56 GWh/year. However, the steel industry is very capital intensive and before any decisions can be made to invest further in new plant it will have to be quite convinced that the alternative route is technologically viable and that the products are of sufficiently high quality to compete on the market with established steel products. The present work can be seen as a contribution towards confidence-building actions to demonstrate that the new, less energy-demanding, process will be acceptable to the decision makers. Our findings are extremely positive in this regard.



|                                                                                                                             |                                  |                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                     |                                  | <b>Projekt</b><br>32071, Förbättring av temperaturjämnheten<br>längs med ämnen under värmning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad                                                                                                               | Tidplan, förväntade delrapporter |                                                                                                                                                                                 |
| 10 184 800 SEK                                                                                                              | 2000-04-26 – 2003-10-31          |                                                                                                                                                                                 |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>Fundia Special Bar AB<br>Rautaruukki Steel<br>AvestaPolarit AB                     |                                  | Avdelning/Institution                                                                                                                                                           |
| Adress                                                                                                                      |                                  |                                                                                                                                                                                 |
| MEFOS, Box 812, 971 25 Luleå                                                                                                |                                  |                                                                                                                                                                                 |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson                                                            |                                  |                                                                                                                                                                                 |
| Anders Rensgard, anders.rensgard@mefos.se                                                                                   |                                  |                                                                                                                                                                                 |
| Slutrapport, namn och förlag                                                                                                |                                  |                                                                                                                                                                                 |
| New ways to improve longitudinal temperature homogeneity of slabs in reheating furnaces, Jernkontorets forskning, serie TO. |                                  |                                                                                                                                                                                 |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

CFD-simuleringar i kombination med ett stort antal kontinuerliga försök i Mefos pilotugn har utförts för att undersöka energibesparingar och möjligheterna att förbättra temperaturjämnheten i ämnena med hjälp av bafflar, fläkt och kylning av ämnesändar.

Olika tekniker för att öka värmeöverföringen mitt på ämnena i ugnarnas konvektiva zon har undersökts mha CFD-beräkningar. Ett simuleringsexempel på ökning av värmeöverföring till ämnet, mha av en fläkt, framgår av Figur 1. Det framgår tydligt att en ökning i värmeflödet erhålls under fläkten där rökgashastigheten är högst.

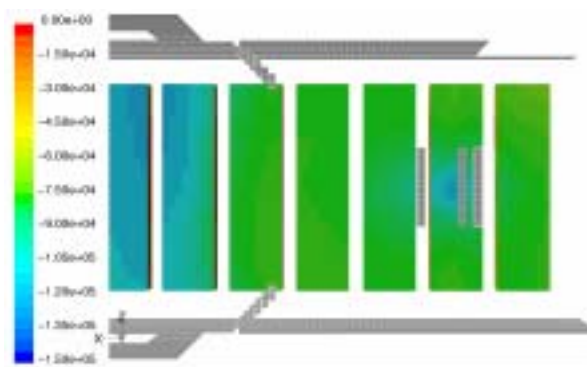


Fig. 1 Ugnsvy från ovan. Visar hur värmeöverföringen ökar (blå färg) lokalt under en fläkt, placerad ovanför det andra ämnet från höger.

MEFOS pilotugn har byggts om för försök med justerbara bafflar i valv och väggar, men även en teknik installerad i valvet för att höja rökgashastigheten lokalt, med en radiell fläkt, och därmed erhålla en bättre värmeöverföring har testats. Bl a har hela valvet i ugnens konvektiva zon ersatts med ett nytt speciellt konstruerat för försök med fläkt och takbaffel.

CFD-simuleringarna visade att den konvektiva värmeöverföringen kan förbättras betydligt genom användandet av en fläkt för att öka rökgashastigheten vid ämnet. Ett antal försök i pilotugnen har utförts med en högtemperatur fläkt för att verifiera simuleringarna. Mätningar med termoelement i testämnen visar också att temperaturökningen sker mycket snabbare mitt i ämnet (under fläkten), än vid en referenskörning utan fläkt, se Figur 2.

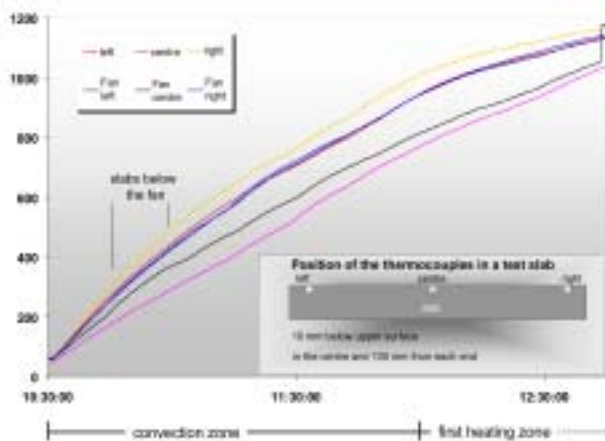


Fig. 2 Temperaturen 10 mm under överytan för 3 mätpunkter i ett testämne under pilotförsöken. Figuren visar en jämförelse mellan ett referensförsök och ett försök med en fläkt installerad i den konvektiva zonen.

Användandet av bafflar för att påverka strömningsbilden gav en liten men positiv effekt på värmningsförloppet. Sidobafflar visade något större effekt men en kombination av tak och sidobafflar gav störst effekt på temperaturjämnheten. Bafflar, speciellt takbafflar, används idag kanske mest för att underlätta temperaturregleringen zonvis i ugnar.

Slutligen har en minst lika omfattande ombyggnad utförts för försökskampanjer med ett system för kylning av ämnesändarna. Två stycken värmebeständiga rör har installerats längs med ena sidoväggen. Rören går in i ugnen i början av zon 1 och går ut genom kortsidan i slutzonen. Förbränningsluften till sista brännarzonen passerar genom rören i ugnen för förvärmning, se Figur 3.

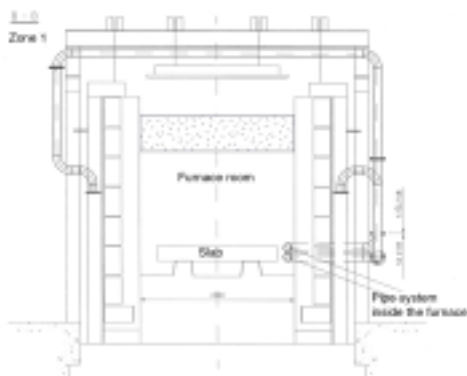


Fig. 3 MEFOS pilotugn med ett rörsystem för kylning av ämnesändar installerad längs ena långsidan.



Tekniken som har utvärderas är möjligheten att minska övervärmning av ämnesändarna mha förbränningsluft, som transporterar genom rör i ugnen. Ett resultat från försöken framgår av Figur 4. I figuren framgår att när förbränningsluften leds genom rören i ugnen så minskar temperaturstegringen 20 mm in i ämnet för den ända som är mot rören.

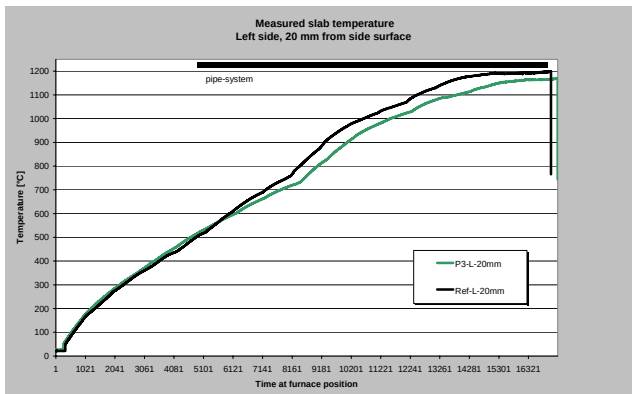


Fig. 4 Temperaturen 20 mm från ämnets sidoyta under värmning i pilotugnen.

### **Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål**

Att förbättra värmeöverföringen till ämnena mha fläktar genom att öka den konvektiva värmeöverföringen visar på mycket lovande resultat. Försöken med en radiell fläkt visade på en lokal höjning av värmeöverföring på ca 40 % under fläkten. Fläktar kan användas för att påverka temperaturjämnheten i ämnena men även för att höja produktiviteten och minska energiförbrukningen i ugnen. Radiella fläktar för temperaturer över 1000 °C finns idag tillgängliga på marknaden.

Försöken med förvärmning av förbränningsluften och samtidigt minska övervärmning av ämnesändarna visar på att tekniken fungerar i praktiken. Pilotförsöken visar på att det är möjligt att minska temperaturen på ämnesändarna och samtidigt förvärma förbränningsluften. I en industriell applikation placeras rören med fördel inuti sidoväggen och matning av den förvärmda förbränningsluften sker direkt vid sidan brännaren.

Utförda simuleringarna och pilotförsök överensstämmer i stort vilket medför att olika lösningar, t ex placering av fläkt, med fördel kan studeras med hjälp av beräkningar.

### **Projektpresentation**

Projektet har ingått i ett ECSC- projektet där MEFOS och IRSID tillsammans har studerat möjliga lösningar för att minska övervärmning av ämnesändarna i värmningszonerna genom att minska temperaturen lokalt på sidoväggarna i ugnen. Övriga partners inom projektet har i huvudsak studerat möjligheten att kontrollera och styra ämnens värmningsförlopp i ugnen genom att ändra bränslepådrag till brännarna.

MEFOS har även undersökt möjligheten att styra rökgaserna i mörkzonen för att förbättra värmningsförloppet. MEFOS del i projektet har i huvudsak att inriktas mot pilotförsök i stegbalksugnen men också kompletterats med olika beräkningar för att optimera valda lösningar. Ett antal olika koncept för att påverka ämnesvärmningen har konstruerats och installerats i MEFOS pilotugn. Såväl tidigare känd teknik (olika bafflar) som mera nytänkande (installation av fläkt för ökad konvektion) har prövats. Förutom ökad värmeöverföring lokalt har även möjligheterna att påverka övervärmning av ämnesändar studerats. Ett flertal försökskampanjer har utförts för att utvärdera de olika nya processteknikerna.

## Problemställning

För produktion av högkvalitativa stålband behövs effektiva metoder att kontrollera temperaturjämnheten i produkten redan under omvärmningen i slabsugnarna. Att ha god kontroll över ämnes-temperaturen vid uppvärmningen gäller såväl längs med slabsens som i dess tjockleksriktning.

Övervärmning av ämnesändarna kan uppgå till mer än 50 °C i t ex en bandverksugn, se Figur 5.

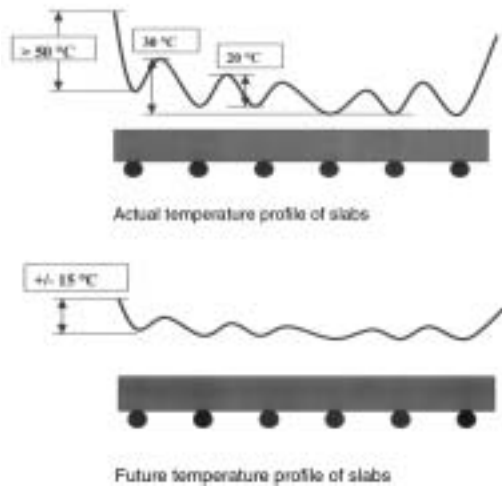


Fig. 5 Exempel på temperaturskillnader vid dragning i ett slabs.

## Syfte och mål

Målet med projektet har varit att studera och utveckla nya tekniker för att förbättra den longitudinella temperaturjämnheten för ämnen i omvärmningsugnar. Det är två skilda områden som har undersökts i projektet:

1. Minskning av övervärmning av ämnesändarna
2. Förbättrande av temperaturjämnhet längs med ämnena i ugnen

Stora temperaturavvikelser medför felaktig tjocklek i för- och slutändan, intryckt glödskal på övervärmda partier (ca 5 % beträffande band) och svårigheter att sätta in bandet i valsverket vid höga hastigheter.

Idag är alla moderna värmningsugnar i världen uppmärksamma på problematiken och försöker erhålla en så homogen temperatur som möjligt i produkten. T ex finns det idag olika lösningar för att eliminera skenmärken men för att minska den longitudinella temperaturdifferansen i ämnena finns för närvarande ingen bra teknik.

## Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet

Förväntade fördelar är en förbättrad dimension och produktkvalitet samt högre produktivitet i valsverket (minskad skrotning och lättare hastighetskontroll av bandändarna i bandverk) En bättre temperaturkontroll i värmningsugnar medför energibesparingar p g a ökad produktivitet i valsverken. Bränslebesparingar genom åtgärder för att förbättra temperaturjämnheten i ämnen och därmed

kunna erhålla en effektivare uppvärmning, uppskattas till ca 0.5 %. Med ett värmningsbehov på ca 400 kWh/ton, blir den sammanlagda energibesparingen för ca 5 Mton stål per år:

$$0.005 \times 400 \text{ kWh/ton} \times 5 \text{ Mton/år} = 10 \text{ GWh/år}$$

Metoder för att förbättra temperaturjämnheten i slabsugnar kan givetvis också användas i billetsugnar och eventuellt även i värmebehandlingsugnar.

### **Referenser**

- [1] New ways to improve longitudinal temperature homogeneity of slabs in reheating furnaces, ECSC steel RTD programme, ECSC-project: P4060, Final report, March 2003.
- [2] New ways to improve longitudinal temperature homogeneity of slabs in reheating furnaces, Final report (The Mefos Part), MEF02063.



|                                                                                                                                                                |                                                             |                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                        |                                                             | <b>Projekt</b><br>32072, Förbättrade dimensionstoleranser vid<br>valsning av grov stång och profiler<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>3 442 900 SEK                                                                                                                                 | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-02-12 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                                        |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>AB Sandvik Materials Technology<br>Fundia Special Bar AB<br>Imatra Steel Oy Ab<br>Morgårdshammar AB<br>Ovako Steel AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                                  |
| Adress<br>MEFOS, Box 812, 97125 Luleå                                                                                                                          |                                                             |                                                                                                                                                                                        |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Jan-Olov Perä, jan-olov.pera@mefos.se                                                      |                                                             |                                                                                                                                                                                        |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Förbättrade dimensinstoleranser vid valsning av grov stång och profiler,<br>Jernkontorets forskning, serie TO.                 |                                                             |                                                                                                                                                                                        |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Huvuddelen av komitéarbetet har bestått av driftsförsök hos de deltagande verken. Befintliga verk har utvärderats m a p dimensionstoleranser. Försöken visar att kolstål och austenitiska stål krymper mest medan duplexa stål och nickelbaslegeringar krymper minst. Hetan svalnar fortare då den inte valsas och färdigdiametern ökar tumregelmässigt med 0,5 mm per 100 °C svalning. En slutsats är att processen bör styras mot sluttemperatur och analys. Temperaturen måste vara jämn från heta till heta och även inom hetan. Vid några verk har olika stålsortergrupper i kombination med olika rulledarlådor införts för dimensionsstyrning. Om en lämplig valsstol utrustas med en mätare för kontinuerlig mätning av valskraften fås underlag för spelkorrektioner nedströms i verket. Fasta spelkorrektioner kan sedan göras heta för heta.

Valsverkspersonal från deltagande företag i kommittén har deltagit parallellt med kommittémötena. Tillsammans med personal från det aktuella verket har frågor ang dimensionsutfall diskuterats. Arbetsområdet för näst sista sticket vid valsning av rundstång har analyserats med avseende på dimensionstoleranser, se Figur 1. Statistiskt baserad optimering har visat att ovaler med plana flanker är mindre känsliga för variationer i ingående bredd jämfört med en enkelradieoval. Analysen av arbetsområdet har publicerats externt i form av ett konferensbidrag.

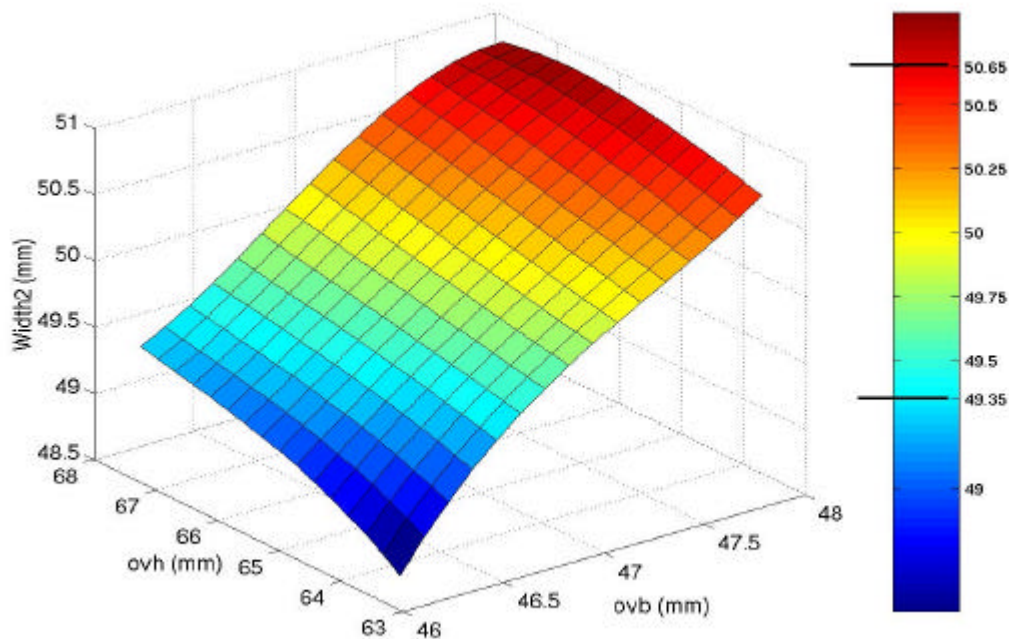


Fig. 1 Responsyta för beräknad runddiameter som funktion av inkommande höjd och bredd på färdigovalen.

### **Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål**

Ändringar i valsningsprocessen kräver omfattande utvärderingar av erhållet dimensionsutfall. Flera verk har ny utrustning för dimensionsmätning och dimensionsreglering under intrimning. Optimering av dimensionsutfall görs efterhand som den nya utrustningen sätts i kontinuerlig drift. Resultaten från projektet ger underlag för korrekt kompensering för analys, temperatur och fjädring i valsstolar. Metodiken för analys- och temperaturberoende compensation av spelinställningar har införts alternativt kommer att införas på flera deltagande företag.

## **Projektpresentation**

### **Problemställning**

Dimensionstoleranserna vid kontinuerlig valsning av klen stång visar skillnader i temperatur mellan bakände och framände som påverkar dimensionen inom hetan. Vid valsning av grov stång och profiler sker valsningen helt eller delvis reversibelt vilket ger större temperaturspridning mellan hetorna. Skillnader i temperatur ger spridning i valskraft och, beroende på styvheten i valsparet, spridning i fjädring som i sin tur resulterar i dimensionsvariationer. Vidare kan valsböjning uppträda för t ex ovalspår mitt på valsens.

En högre slutvalsningstemperatur medför mindre dimension på grund av större krympning vid svalning. Krympningen beror också av hetans analys. En annan orsak till problem med toleranser är variationer i temperatur inom hetor, t ex från stegbalksränder.

Vid valsning i spår utformas stickserien så att närliggande dimensioner så långt möjligt kan valsas i en gemensam spårserie. Variationer i inkommande dimension till färdigsticket påverkar därför erhållna dimensionstoleranser på den färdiga rundstången.

## **Syfte och mål**

Projektets industriella huvudmål är att klarlägga vad som orsakar variationer i dimension vid valsning av grov stång och profiler. Snävtare dimensionstoleranser ger också bättre möjligheter att optimera ämnesvikten, minska andelen skrot och därmed också optimera värmningen. En målsättning är därför att klarlägga orsakerna till dimensionsvariationerna och föreslå metoder för att minska spridningen i dimension.

## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Kommitténs arbete har gett underlag för att komplettera kravspecifikationerna då nya valsstolar respektive dimensionsmätare köpts in. Komplettering av styrsystem med analysgrupper och kompensering för temperaturavvikelser är infört eller kommer att införas efterhand.

Potentialen i form av ökat utbyte kan uppskattas till 1% av tonnaget. Produktionen i nordiska grovvalsverk är ca 1100 kton/år. Potentiella utbytesvinsten i valsning kan därför uppskattas till 11 kton/år. Vid valsning av stång från skrot kan energibehovet uppskattas till 1400 kWh/ton vilket ger en potential på 15 Gwh/år.



|                                                                                                                                                                              |                                                             |                                                                                                                                                                              |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins värmnings-,<br>bearbetnings- och materialpaket,<br>1999-2003                                                                      |                                                             | <b>Projekt</b><br>33010, Smörjmedelsammansättningens<br>inverkan på tråddragningsprocessen<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>7 342 791 SEK                                                                                                                                               | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-12-18 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                              |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning AB<br>AB Sandvik Materials Technology<br>AvestaPolarit Welding AB<br>Haldex Garphyttan AB<br>Henkel Norden AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                        |  |
| Adress<br>Drottning Kristinas väg 48, 114 28 Stockholm                                                                                                                       |                                                             |                                                                                                                                                                              |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Ulrik Palmqvist, ulrik.palmqvist@simr.se                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                              |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Smörjmedelsammansättningens inverkan på tråddragningsprocessen,<br>Jernkontorets forskning, serie TO.                                        |                                                             |                                                                                                                                                                              |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Hos trådindustrin finns ett behov att öka kunskapen/kompetensen om hur ett smörjmedel (tvål) inverkar på tråddragningsoperationer. Friktionen som uppkommer mellan dragskiva och tråd vid själva dragningen gör att tråddiametern reduceras. Friktionen är därför av största vikt. Den sänks genom att tillsätta någon form av smörjmedel till tråden, i de flesta fall i pulverform.

Det är viktigt att en kunskap byggs upp om hur tråd och tvål och dess samverkan, både kemiskt och fysikaliskt, skall analyseras experimentellt. Det vill säga, hur skall vi analytiskt kunna erhålla den information som vi vill om smörjmedel. Därefter är det möjligt att beskriva faktorer som påverkar valet av smörjmedel samt beskriva egenskaper, klassificering och att studera processen i bl.a. energibesparingssyfte.

För industrin är det mycket viktigt att kunna öka dragbarheten, d.v.s. draghastigheten, hos valstråden och i vissa fall även förbättra tvättbarheten av dragen tråd. Orsaken är att detta skulle genererar en energivinst för företagen, och därmed också en ekonomisk vinst samt en total miljövinst för samhället.

Det är många parametrar som måste beaktas och som påverkar slutresultatet vid experimentell utvärdering av resultat av nya smörjmedel och dess potential att användas i dragprocessen, med utgångspunkt att de skall öka dragbarheten i själva processen. Situationen är således mycket

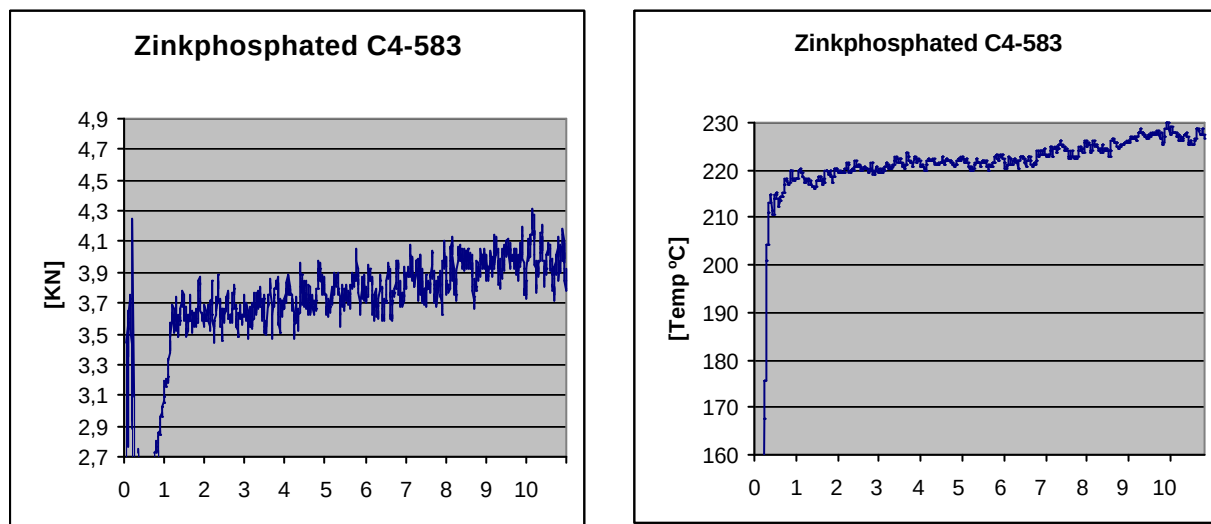
komplex. Detta arbete har initierat en sådan förståelse och är grunden till fortsatt arbete inom området.

Nedan redovisas kortfattat de viktigaste resultaten som framkommit ur detta projekt.

Vi har uppnått en uppenbar kompetenshöjning och medvetenhet hos alla i projektet berörda parter vad gäller både karaktistiken hos smörjmedlet och själva dragprocessen. Projektet har lett till en insyn och förståelse vilka karakteriseringstekniker och metoder (metodik) och vilka kombinationer av metoder som är praktiskt användbara för att studera smörjmedel och få värdefull mekanistisk information om dragprocessen. Bland annat kan nämnas att vi idag har kunskap nog för att studera samverkan mellan trådyta, smörjmedel och dragskiva under själva dragprocessen. Kunskapen har vi erhållit genom experimentellt arbete, men också genom att studera litteraturen och ha seminarier.

En rad smörjmedel samt additiv har testats industriellt under projektets gång. En experimentell studie som vi utfört på jungfruligt smörjmedel har också varit omfattande. Denna process har varit tidskrävande och nödvändig och tagit stora delar av projektet i anspråk.

Parametrar som vi har studerat och som sannolikt är viktiga för hur en tvål uppför sig är bl. a: Kornstorleken hos tvålens partiklar, tvålens fetthalt och fukthalt, kemisk och strukturell uppbyggnad av tvålen, termiska effekter och reaktioner såsom sönderdelning och smältning som sker på ytan är också viktiga att kunna detektera och förstå, då sådana reaktioner med största sannolikhet ändrar tvålens egenskaper och därmed också dess smörjande förmåga. Det är också viktigt att kunna studera dragprocessens prestanda, hur mycket tvål mängdmässigt som finns kvar på dragen tråd, ytans utseende och att kunna mäta kraften som krävs för att dra tråden och trådtemperaturen direkt på tråden i processen. Dragprocessparametrarna kraft och temperatur ger värdefull information som vi måste beakta i framtida försök. För exempel se figur 1.



Figur 1. Exempel på effekter som vi kan studera med kraft och temperaturregistrering (x-axel visar tid i minuter).

Den klara trenden i figur 1 är att dragkraften ökar, och vi ser också motsvarande ökning i temperaturen. Detta kan i slutändan leda till trådbrott. Den generella dragkraftnivån ger ett mått på energiförbrukningen, och är en viktig parameter för att studera dragbarheten hos ett smörjmedel. Det är alltså viktigt att försöka minimera dragkraftnivån för att kunna reducera energiförbrukningen.

Smörjmedelsparametrar såsom fetthalt och mjukningstemperatur hos smörjmedlet är också viktiga för karaktistiken hos tvålen. Till exempel kan valet av smörjmedel (olika fetthalter i tvålen) drastiskt ändra mängden smörjmedel som finns kvar på dragen tråd.



Med mjukningstemperatur menas den temperatur där tvålen mjuknar/smälter. De oorganiska tillsatserna i tvålen smälter dock ej vid denna temperatur. Det bildas då en viskös film på stålytan. Om inte en film bildas finns risk att tråden går av eller att den blir riven av dragskivan vid själva dragprocessen. Kopplingen mellan smörjmedlets mjukningstemperatur och dess ytegenskaper är oklar. Mjukningstemperaturen hos trådens smörjmedel är dock viktig för smörjmedlets filmstyrka, alltså hur mycket belastning som smörjmedlet kan bära. Till exempel ger en ökad draghastighet högre friktion mellan tråd och dragskiva, vilket resulterar i högre temperatur i systemet och därför krävs ett smörjmedel med en högre mjukningstemperatur.

Det visade sig inte vara trivialt att bestämma mjukningstemperaturen hos tvålarna. Trots höga temperaturer smälte eller mjuknade inte vissa tvålar. Det krävs eventuellt en initial belastning innan provet/smörjmedlet börjar att flyta, en s.k Binghamkropp.

Vi kan ej utesluta att mjukning av vissa tvålar härrör från en liknande effekt. Det krävs reologiska studier (Reologi är läran om materiens deformations- och flytegenskaper), eller experimentella studier under själva dragprocessens gång för att få en förståelse för smörjmedlets komplexa reaktionsmekanismer och fasövergångar. Ytterligare grundläggande forskningsinsatser krävs inom detta område. Det är viktigt att förstå vilken effekt mjukningstemperaturen hos tvålen har för den smörjande effekten och dragbarheten.

Kraft- och temperaturloggning av tråd ger, tillsammans med övriga analystekniker och resultaten därav, goda möjligheter att få en uppfattning om dragprocessen i gränsskiktet dragskiva/smörjmedel/tråd under processens gång.

För att på ett relevant sätt analysera och utvärdera smörjmedel och process samt för att göra det möjligt att kunna dra riktiga slutsatser är det nödvändigt att relatera flera tekniker och resultat från flera karakteriseringsmetoder till varandra. Förutom de smörjmedelsspecifika parametrarna som vi gått igenom ovan är även andra egenskaper av avgörande karaktär för hur ett smörjmedel fungerar. Exempel är: trådens ingångsdiameter, vilken typ av stålsort vi använder (kolstål, rostfritt), vad kunden har för krav etc. Situationen är således mycket komplex.

För industrin är det viktigt att kunna öka dragbarheten hos tråden av både ekonomiska och konkurrensmässiga skäl. Om dragbarheten ökar är det möjligt att öka draghastigheten med vilken tråden tillverkas. Vi vet idag att ökade draghastigheter i processen genererar en energivinst och ökad produktivitet. Den stora utmaningen industriellt är att ta fram smörjmedel som kan bära en ökad hastighet och den ökade belastning och värme som då genereras.

Dragbarheten hos valstråd är möjlig att öka genom att använda olika smörjmedelskombinationer i dragprocessen. Vi ökade smörjmedelsmängden med ca 70 % på trådytan på dragen tråd jämfört med ett referenssmörjmedel genom försök med smörjmedel med olika mjukningstemperaturer på tvålarna. Därmed ökar dragbarheten, vilket gör det möjligt att öka draghastigheten och reducera energiåtgången. Likaså lyckades vi öka dragbarheten genom att bärarbelägga valstråden *in-line* (i linjen). Detta innebär att vi ej behöver utföra vissa processteg såsom betning och bärarbeläggning av tråden separat i ett bethus, vilket alltså tillsammans med möjligheten att öka draghastigheten innebär en energibesparing. Bäraren lägger man på tråden före smörjmedlet, framförallt för att öka vidhäftningen av tvålen på tråden. Framtida studier är planerade och kommer att utföras för att ytterligare öka förståelsen och insynen vad gäller både att kombinera olika typer av smörjmedel och att belägga tråden med bärare *in-line*.

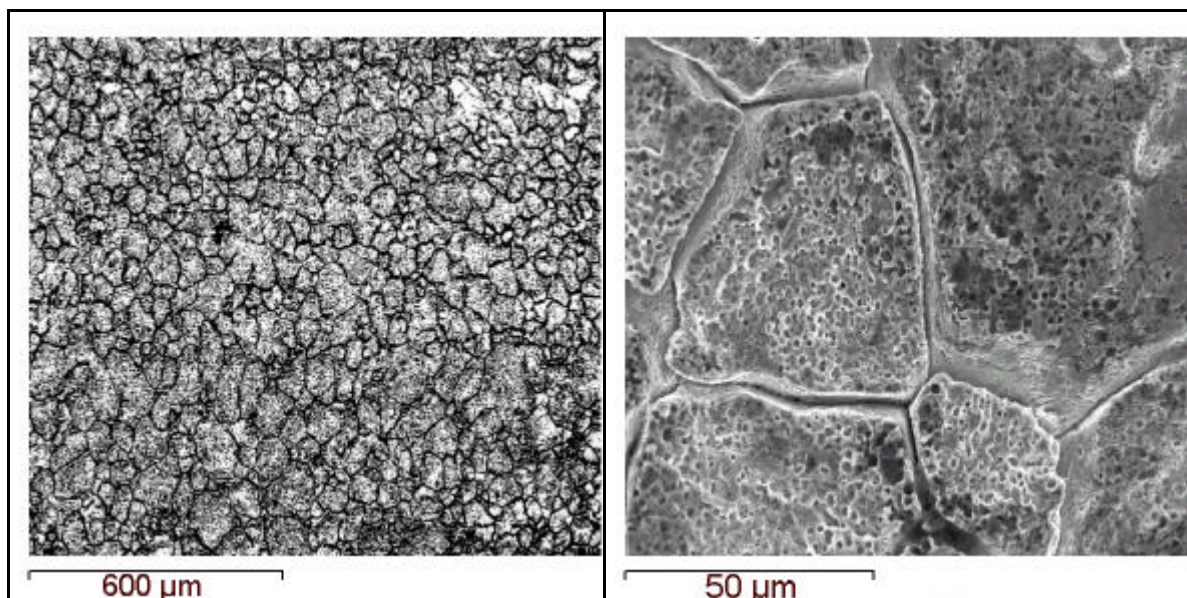
Detta är ett par exempel på konkreta försök som vi har utfört med smörjmedel där vi kunnat se en signifikant förbättring av den smörjande förmågan. Många av de fullskaleförsök vi har utfört med smörjmedel på tråd ute i industrin har dock inte gett dessa positiva signaler och inte gett någon signifikant förbättring av den smörjande effekten av tråden. Därför har det heller inte funnits någon

anledning att byta det just då använda referenssmörjmedlet och gå vidare med de nya tvålarna som testats.

För att tråden skall kunna dra med sig optimalt med smörjmedel in i processen och därmed få en optimerad dragbarhet, är topografin eller råheten på trådytan avgörande. Förbehandlingen av tråden innan själva dragprocessen är därför mycket viktig. En typ av förbehandling är glödning av valstråd. Detta gör man för att återställa och förbättra bearbetningsegenskaperna hos tråden efter valsningen. Tråden kan vara glödgad på olika vis. Denna förbehandling påverkar i kommande processteg betprocessen (tar bort oxiden som finns på ytan av tråden) och ger en yta med varierande ytråhet. Typen av förbehandling påverkar även andra egenskaper som är avgörande för dragbarheten. Exempel är trådens hållfasthet och kornstorleken på kornen som bygger upp materialet.

Inom ramarna för detta projekt fanns inte utrymme att på ett statistiskt fullödigt sätt korrelera ytråheten med smörjmedelsdistributionen och avlägsnandet av smörjmedelsbäraren i processen. Systemet visade sig vara komplicerat och vi har inte haft utrymme att slutföra denna studie. Vi har kommit en bit på väg genom de baskunskaper vi fått i de experimentella studierna. Om bäraren är möjlig att avlägsna sparar vi både energi och miljö i och med att ett processteg försvinner. Våra resultat tyder, hur som helst, otvivelaktigt på att ytråheten är en mycket viktig parameter som man måste beakta. Den påverkar smörjmedelsdistributionen på stålytan och därmed dragbarheten i processen. I många avseende kan det bli möjligt att skraddarsy topografin och egenskaperna hos den aktiverade valstråden som skall dras. Detta är av avgörande betydelse och måste beaktas i framtida studier.

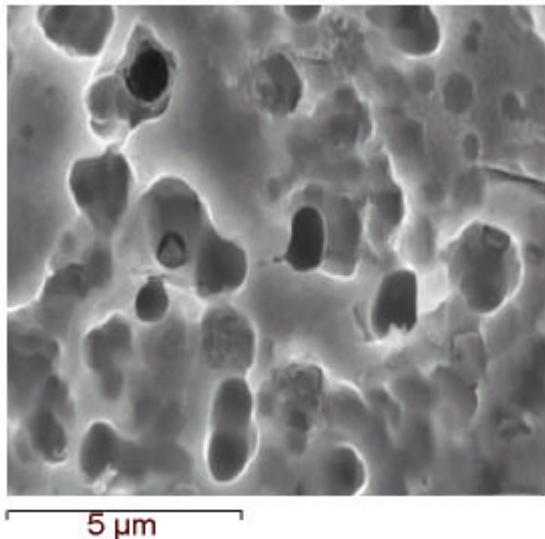
Figuren 2 och 3 är ett exempel på råheten som uppkommer på en trådyta efter betning. Den varmvalsade tråden har glödgats.



Figur 2. Trådytan i låg förstoring.

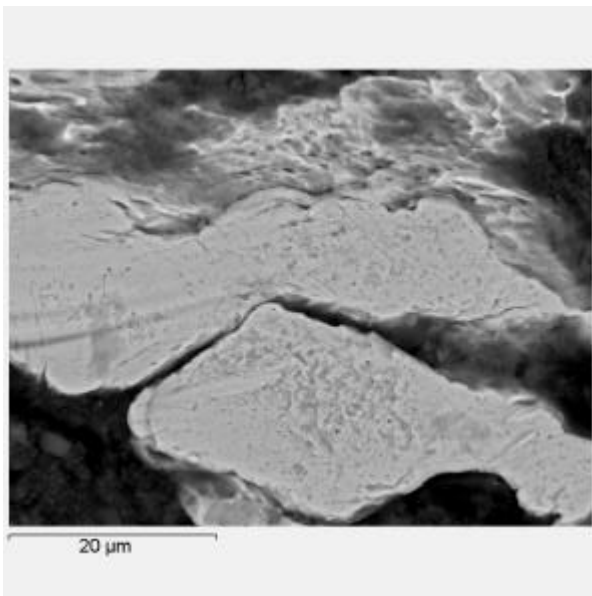
Figur 3. Ytan vid högre förstoring. Ytråheten beror på betningen, korngränsupplösning.

Inom varje separat korn kan vi detektera små gropar ofta kallade etsgropar, se figur 4.



Figur 4. Etsgropar som kan detekteras på varje individuellt korn.

Smörjmedlet på tråden samlar sig sedan till största delen i sprickor och gropar på trådytan. Dessa fungerar som smörjmedelsreservoarer. Endast en liten del av smörjmedlet smetar ut på ytan, se figur 5. Vi har experimentellt kunnat visa hur smörjmedelsmängden på ytan signifikant minskar som en funktion av antalet drag eller reduktioner som man gör, trots att smörjmedel kontinuerligt förs på i processen.



Figur 5. Smörjmedelsdistributionen på dragen tråd. Smörjmedlet har en mörkgråare ton i bilden.

Vid själva dragningen utsätts tråden och smörjmedlet för höga tryck och temperaturer. Vad som då händer med smörjmedlet är oklart. Tvålen kan sönderdelas eller på annat sätt reagerar med ytan av tråden. I detta arbete har vi detekterat sådana ytkemiska fenomen. Det är svårt att i dag svara på ifall detta skulle kunna påverka dragbarheten. Det krävs ett större statistiskt underlag för att dra några slutsatser om dragbarheten.

## ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Projektet har lett till en insyn och förståelse vilka karakteriseringstekniker och metoder (metodik) och vilka kombinationer av metoder som är praktiskt användbara för att studera smörjmedel. En något större förståelse för smörjmedlets mekanism (hur smörjmedlet uppför sig under processen och relationen dragskiva/smörjmedel/trådyta) i dragprocessen och även vilka parametrar som påverkar dragförhållandena har erhållits under projektets gång i enlighet med de generella målen. Denna studie är ett initialt arbete och en bas för fortsatt arbete har formats. En möjlig väg för mekanistisk information är att spåra skillnader i processparametrar såsom dragkraft och temperatur på trådytan i dragprocessen och koppla det till parametrar såsom exempelvis filmtjockleken hos smörjmedlet och eventuella reaktioner på ytan av tråden. Denna höjning av kompetens och den ökade förståelsen för hela dragprocessen och smörjmedlen är viktig och möjliggör för företagen att öka produktiviteten och bli mer kostnadseffektiva och spara både pengar och energi.

Antalet parametrar som påverkar de smörjande egenskaperna är många. Fetthalten är en i raden. Andra parametrar, såsom viskositet, mjukningsintervall, kornstorleksfördelning etc. måste man också ta hänsyn till. Storleken på reduktionen, alltså hur mycket trådens diameter minskar i varje drag, påverkar också mängden smörjfilm på ytan av tråden. Likaså är typen av substrat avgörande. Det är således en mycket komplex situation mellan smörjmedlets sammansättning och påverkan på processparametrarna, där det är nödvändigt att beakta och optimera olika parametrar för en specifik dragprocess. Innan beslut kan tas om lämpliga fetthalter och smältpunkter är det viktigt att man bl.a. utgår från kundens krav på produkten. Likaså är det viktigt att man tar hänsyn till

- trådens prestanda
- förbehandlingen
- dragskivan, i vilken själva reduktionen av diametern sker
- hastighet
- totalreduktion
- yta lämplig för fortsatt bearbetning
- mekaniska egenskaper
- trådens användningsområde

Att kunna öka dragbarheten (göra det möjligt att öka draghastigheten) av tråden i processen är viktig för industrin och är ett av de viktigaste tekniska målen hos företagen. En ökad dragbarhet leder till en ökad produktivitet för företagen och minskar konsumtionen av energi, och därmed påverkar vi också miljön positivt. Vi har utfört ett antal lyckade fullskaleförsök, där en ökad draghastighet i processen är möjlig. Dock krävs en mer omfattande studie i området för att också kunna tillmötesgå kundens krav. Vi vet också idag vilka parametrar som kan vara viktiga för att nå detta ändamål. T.ex. är typen av valstråd, ytråhet, mjukningstemperatur och smörjmedelsbärare viktiga.

En faktor som kan vara viktig för smörjmedlets funktion på ytan, dess mekanism, är också om där sker några ytreaktioner mellan smörjmedlet och trådytan eller om smörjmedlet sönderdelas under dragprocessen. Detta bör påverka dragbarheten och därmed också egenskaperna hos smörjmedlet och dess förmåga att användas under de tuffare omständigheter som råder vid högre draghastigheter. För att vi ska kunna uttala oss om eventuella yteffekter i våra studier krävs det ett mer statistiskt underlag.

Ytråheten är ytterligare en viktig parameter som påverkar smörjmedelsdistributionen på tråden och därmed dragbarheten. Dock är situationen mer komplex. Dragbarheten beror också bl. a på typ av förbehandling och vilket substrat som används. Vi har sett att smörjmedlet samlas i sprickor och ojämnheter på trådytan. När tråden sedan dras, vilket leder till en areaexpansion, bör smörjmedel tryckas upp ur sprickorna något och har därmed en smörjande funktion. För att förstå parameterrelationen stål/ytta/smörjmedel/dragkraft är det viktigt att först förstå smörjningens förlopp.

Energibesparingsmålet bör vi kunna uppfylla i framtida studier genom att bl. a hitta universella smörjmedel som tål högre draghastigheter. Vi kan idag metodiken för hur vi skall gå till väga för att kunna uppnå kravet. En möjlighet är att man exempelvis använder sig av kombinationer av smörjmedel. Den målformulering som utarbetades vid projektets början visade sig i vissa avseenden inte vara relevant inom projektets ramar, då förståelsen och problemställningen analyserades.

De industriella fullskaleförsöken har resulterat i signifikanta förbättringar av dragbarheten, såsom att använda sig av vissa smörjmedelskombinationer och att bärarbelägga tråden *in-line*. Detta är inga fullständiga lösningar. Framtida studier är planerade inom området. Vissa av de industriella försöken som utförts har dock ej lett till någon större signifikant förbättring av den smörjande effekten i processen. Undersökning av dessa system har istället lett till ytterligare en pusselbit i den generella förståelsen.

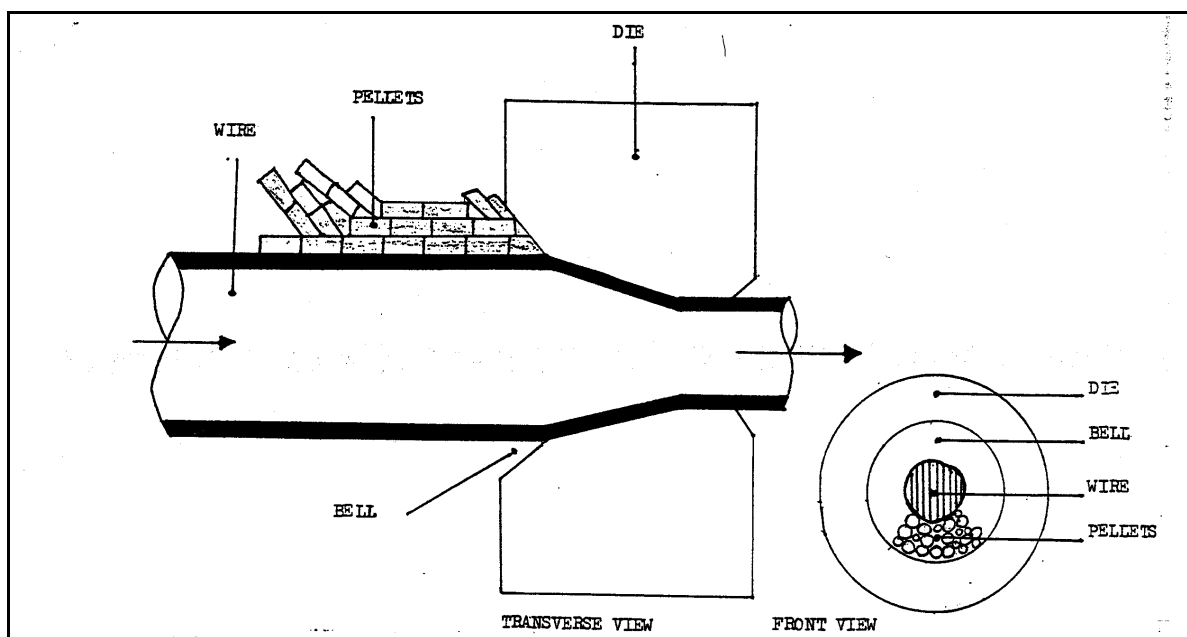
Det är en mycket komplicerad procedur att introducera ett nytt smörjmedel med optimala egenskaper som helst också skall vara så universellt som möjligt, för att underlätta lagerhållning etc. för industrin. Det krävs ytterligare studier och forskningsinsatser för att optimera smörjmedlen så att de uppfyller både kundens och producentens krav.

## Projektpresentation

### Problemställning

Tråddragning är en frekvent använd industriell process, där startmaterialet är en varmvalsad tråd av grövre dimension och slutprodukten är en tråd med mindre tvärsnittsarea. Den varmvalsade tråden är oftast belagd med ett lager av smörjmedelsbärare innan tråddragningsprocessen sker. Syftet med bäraren är att öka mängden tvål som fastnar på tråden, att öka vidhäftningen av tvålen till stålytan och att förbättra egenskaperna hos smörjmedelsfilmen.

Reduktionen av diametern hos valstråden sker genom att tråden passerar genom ett antal dragskivor med successivt minskad diameter. Figur 6 visar en bild på tråd (wire) och dragskiva (die). Figuren illustrerar också principen för dragprocessen. I detta fallet används smörjmedel i form av pellets.



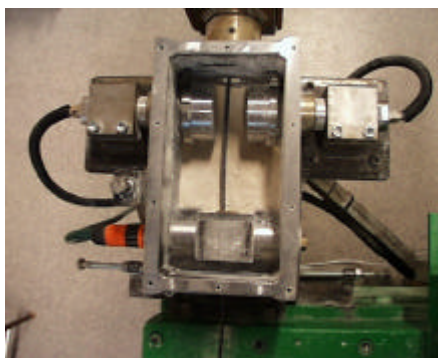
Figur6. Principen för tråddragning.



Dragprocessen sker i låga bearbetningstemperaturer. Den totala reduktionen beror på en rad parametrar, där friktionen mellan tråden och dragskivan är av primär betydelse. Friktionen reduceras vanligen genom att introducera en tvål i pulverform. När tråd passerar genom ett smörjpulver i smörjmedelsbehållaren för den med sig smörjmedlet in i dragskivan. Trycket och värmen vid deformationen av tråden gör att smörjmedlet övergår (mjuknar) till en plastisk film som reducerar friktion och nötning och minimerar kontakten mellan tråd och dragskiva, vilket förbättrar ytfinheten hos tråden och gör det möjligt att öka draghastigheten. En dragmaskin och en smörjmedelsbehållare är illustrerad i figurerna 7 och 8.



Figur 7. Dragmaskin.



Figur 8. Smörjmedelsbehållare .

En rad kvalitativa och kvantitativa industrirelaterade dragserier samt en rad smörjmedel och additiv har testats både industriellt och på laboratorienivå under projektets gång. En litteraturstudie om tråddragning har också utförts inom ramen för detta arbete.

Forskning inom tråddragningsområdet utförs vanligen på laboratorienivå, vid låga draghastigheter, vilket är otillräckligt för att generera relevanta förhållanden. Industrieförsök är därför nödvändiga komplement för att kontrollera trovärdigheten vad gäller smörjmedlets prestanda. Tre företag har deltagit med industrieförsök: AB Sandvik Materials Technology , Haldex Garphyttan AB och AvestaPolarit Welding AB.

Det behövs idag smörjmedel av bättre prestanda för tråddragning av rostfria, special- och kolstål för att uppnå högkvalitativ tråd med billigare och en miljömässigt förbättrad process. Detta skulle leda till en signifikant ökning av produktiviteten och eliminering av en rad processteg. Optimerade smörjmedelegenskaper skulle resultera i kompaktare, flexiblare samt energi- och kostnadseffektiva tråddragningsprocesser. Valet av smörjmedel i dagens industri sker vanligen genom att pröva sig fram, vilket resulterar i låg produktivitet och slöseri med material. För att göra smörjmedelsvalet möjligt måste en förståelse för smörjmedlet och dess mekanism också finnas.

Dragprocessen är beroende av en mängd olika processvariabler, med friktionen mellan dragskiva och tråd som den av störst vikt. Friktionen sänks alltså genom att tillsätta någon form av smörjmedel, som i de flesta fall är i pulverform.

Processkedjan i ett drageri utgörs normalt av följande steg.

1. Rengöring och aktivering (aktivering innebär att tråden behandlas för att kunna bearbetas)
2. Applicering av smörjmedelsbäare
3. Applicering av smörjmedel
4. Tråddragning

Smörjmedlet är en mycket viktig del av det totala dragsystemet då det har en direkt inverkan på kvaliteten hos den tillverkade tråden. Idealt skall det använda smörjmedlet uppfylla följande fodringar och mål;

- Vara enkelt att applicera på tråden i rörelse
- Säkerställa en kontinuerlig film av smörjmedel mellan tråd och dragskiva under deformationsförloppet
- Resultera i en jämn yta fri från defekter och minimera dragskiveslitage
- Skydda tråden från rost och vara kemiskt inert med avseende på såväl tråd som dragskiva samt skydda tråden mekaniskt
- Ge en tråd som är lämpad för fortsatt bearbetning som t. ex kallstukning eller fjäderlindning
- Vara lätt att avlägsna från tråden efter dragprocessen

Vanligast är torra smörjmedel, ofta benämnda stearater eller tvålar, som tillverkas av fettsyror, hydrater (vanligen kalcium och natrium), oxider, karbonater och olika typer av additiv (molybdensulfid, borax, grafit).

## **Syfte och mål**

Syfte och målsättning med projektet har bl. a. varit att beskriva faktorer som påverkar valet av smörjmedel samt beskriva egenskaper, klassificering och tillverkning av smörjmedel.

Vidare har projektet haft följande målsättning

- Att initiera ett arbete som skall resultera i att kunna förstå relationen mellan smörjmedlets sammansättning och processparametrarna för tråddragning av kol och rostfritt stål. Att öka kunskapen vad gäller växelverkan mellan stålytan/smörjmedel/dragkiva under industriella multipeldragprocesser
- Föreslå smörjmedel, med förbättrad vidhätning och förbättrade smörjande egenskaper, för att eventuellt kunna avlägsna smörjmedelsbärare i processen.
- Tekniska mål; öka draghastigheten i processen och att ta bort smörjmedelsbäraren med bibehållen prestanda på tråden.
- Energibesparingsmål; idag är den totala energikonsumtionen för tråddragningsprocessen 7 GWh/år för Haldex Garphyttan AB och AB Sandvik Steel. AvestaPolarit Welding AB förbrukar ca 1.6 GWh/år.  
Målet för Haldex Garphyttan AB, AB Sandvik Steel och AvestaPolarit Welding AB är att reducera energiförbrukningen med 15 %.

Det generella industriella målet var att framförallt öka dragbarheten och i vissa fall tvättbarheten:

Det kan vara svårt att ha ett smörjmedel som är bäst på allt, det går alltid att hitta smörjmedel som är lätta att avfetta men som uppvisar dålig dragbarhet eller tvärtom. Det är praktiskt omöjligt att ha en smörjmedelskombination för varje produkt som tillverkas. Industrin är snarare intresserad av att minska antalet olika smörjmedel som används idag eftersom pengar då kan sparas i lagerkostnader och smörjmedelsförbrukning. Dessutom minskar risken att välja fel smörjmedelskombination. Därför måste smörjmedlet som väljs kunna användas till så många applikationer som möjligt.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Då valet av smörjmedel i industri vanligen skett genom att pröva sig fram, har detta lett till låg produktivitet och slöseri med material. Den kunskap och kompetenshöjning som företagen fått under detta arbete har lett till att företagen blivit mer produktiva och kostnadseffektiva, vilket då resulterar i reducerad energikonsumtion och därmed också en miljömässig vinst.

Det generella industriella målet var att framförallt öka dragbarheten av tråd och i vissa fall tvättbarheten av tråden efter dragprocessen. Tvättbarheten påverkas av kundens krav. En ökad dragbarhet av tråd genererar en rad fördelar:

- Ökad dragbarhet ger bättre utbyte i dragprocessen, vilket generellt leder till minskat antal omarbetningar av materialet samt minskar antalet kassationer (internt) och reklamationer (från kund). Allt detta ger en energibesparing.
- En förbättrad dragbarhet innebär att kassationer och omarbetning av dragskivor minskar. Detta ger en energibesparing.
- En förbättrad dragbarhet innebär att årsvolymen på smörjmedel kommer att minska. Detta ger mindre energiförbrukning vid transport och destruktion samt skonar miljön.
- En ökad dragbarhet betyder möjligheten att öka draghastigheten. Det innebär att mer prima meter tråd per tidsenhet kommer att produceras. Detta ger en energibesparing.
- Ett mer lättavfettat smörjmedel gör att en lägre temperatur i avfettningsbadet kan användas, det minskar kemikalieförbrukning i avfettningsbad före ugnar (miljövinst), det gör det möjligt att köra med högre hastighet i poleringen samt minskar vattenförbrukningen i poleringen.

Allt detta ger en energibesparing som minst motsvarar vad som anges i projektplanen till 1 GWh/år.





|                                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                 |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins värmnings-,<br>bearbetnings- och materialpaket,<br>1999-2003                                                                         |                                                             | <b>Projekt</b><br>33011, FEM vid tråddragning <input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>2 871 469 SEK                                                                                                                                                  | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-02-29 – 2003-10-31 |                                                                                                                                 |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Örebro Universitet<br>AB Sandvik Materials Technology<br>Fagersta Stainless AB<br>Haldex Garphyttan AB<br>Ovak Steel AB<br>Springwire Sweden AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                           |  |
| Adress<br>SE-701 82 ÖREBRO                                                                                                                                                      |                                                             |                                                                                                                                 |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Henrik Överstam, henrik.overstam@tech.oru.se                                                                |                                                             |                                                                                                                                 |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>FEM vid tråddragning, Jernkontorets forskning, serie TO.                                                                                        |                                                             |                                                                                                                                 |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Vid försöken vid Haldex Garphyttan, rapport Oru-Te-2003-70, kunde en energibesparing på 20% påvisas vid en ökning av draghastigheten. Denna minskning i energiåtgång beror troligtvis på att smörjningen blir bättre på grund av att temperaturen i kontakten mellan verktyg och tråd ökar och/eller att mängden smörjmedel som följer med in i skivan ökar. Ingen förändring i trådkvaliteten kunde påvisas. En minskning av skivvinkeln med 25% gav en något bättre trådkvalitet samt 3-4% lägre energianvändning jämfört med den större skivvinkeln (16°). Förhållandevis liten del av energin var rena förluster.

I rapport MEF02023, MEF00118 och MEF00077 presenteras FEM-simuleringar för ett rostfritt stål, ett högkolhaltigt stål samt dragförsök för att verifiera dessa. Tråddragning har simulerats i två dimensioner. Olika reduktioner och skivvinklar har studerats för båda materialen. Dragkrafterna har jämförts med uppmätta resultat samt resultat beräknade med enklare analytiska metoder som ofta används inom industrin. Resultaten visar en god överensstämmelse mellan de krafter som erhålls vid simuleringar och de krafter som mätts upp. En effektbalans visade i de flesta fall en god

överensstämmelse mellan tillförd mekanisk effekt och uppmätta temperaturstegringar. De genomförda simuleringarna ger en god uppfattning om hur deformationen fördelas i tråden vid olika skivgeometrier. Vid små areareduktioner, 5%, är skivvinkelns inverkan stor på deformationsfördelningen i tråden vilket i sin tur påverkar både trådens egenskaper och energianvändningen vid tillverkningen. Vid ökande areareduktion minskar inverkan av skivvinkeln.

Simuleringar har även utförts i tre dimensioner, rapport MEF0017, vilket gav möjlighet att studera snedställning av dragskivan. Dragkrafterna som erhöles vid simuleringarna har jämförts med uppmätta resultat. Resultat är det samma som redovisas ovan, med den skillnaden att tøjningen snedfördelas över tvärsnittet.

Två mindre arbeten har redovisats i form av tekniska meddelanden, TM00060 och TM00067. Dessa behandlar flytspänningens beroende av deformationshastigheten för 316L vid rumstemperatur samt simulering och försök med två drag i serie.

### ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Projektet har gett en god uppfattning om hur deformationsfördelningen i tråden ser ut. Man har genom försöken fått ett underlag som kan ligga till grund för processoptimering. Både med avseende på dragrafter och på styrning av produktens egenskaper och därigenom eliminera omarbetning. Man har även visat att de traditionella analytiska metoderna fungerar bra inom vissa förhållande, de kan användas till processoptimering om man är medveten om var felet blir så stort att man ej längre kan lita på dem. Energibesparing har kunnat påvisas både teoretiskt och genom fullskaliga försök. Projektet har dessutom gett många uppslag till vidare forskning.

En energibesparing vid dragning på 10% såsom presenteras under rubriken "förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndigheten uppdrag att ställa om energisystem" är i allra högsta grad rimlig vid en processoptimering med avseende på skivgeometri eftersom skivgeometrin påverkar både deformationsfördelningen i tråden och de tribologiska förutsättningarna (smörjning). Mycket stora energibesparingar kan erhållas om man genom denna typ av processoptimeringar kan minimera antalet värmebehandlingar och efterföljande betning (rengöring) av tråden.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Projektets syfte är att utveckla och verifiera FEM-program för tvådimensionell simulering av tråddragning för olika stålsorter, samt att undersöka möjligheten till processoptimering. En optimering av tråddragningsprocessen kan ge en energibesparing. Vidare kan ökad kunskap ge möjlighet att styra dragningsprocessen så att en hög och jämn trådkvalité kan erhållas.

### ***Syfte och mål***

Målet är att utveckla och verifiera FEM-program för tvådimensionell simulering av tråddragning för olika stålsorter, samt att undersöka möjligheten till processoptimering. Produktionen av tråd i Sverige är mer än 150.000 ton/år, varav 55.000 ton är höglegerat, högkolhaltigt eller rostfritt

material. Forskningen inom trådteknik har under en tid varit begränsad till företagens egna satsningar. Jernkontoret har inom sin forskningsverksamhet bildat ett teknikområde Tråd (TO33). En stor satsning på trådforskning har gjorts vid Örebro universitet. Där bl.a. en tråddragningsbänk med diverse instrumentering har installerats. Tråddragning är en relativt energikrävande och kostsam process. Med hjälp av finita elementmetoden (FEM) kan tråddragning simuleras och analyseras för att optimeras. Med en utvecklad FEM-teknik för tråddragning kan följande studeras som idag inte är riktigt klarlagt: Deformationsfördelningen i tråden, spänningsfördelningen i tråden, dragkrafter, inverkan av dragskivans geometri, friktionsförhållande, förslitning och trådens slutegenskaper.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Energianvändningen olika beroende på stålsort, för höglegerad tråd är den 1450 kWh/ton, medan den är runt 400 kWh/ton för enklare tråd. En processoptimering med hjälp av FEM förväntas kunna sänka energiförbrukningen vid trådtillverkning (dragning, värmebehandling och betning) med ca 10%. Energisparpotentialen med ovan angivna tonnageuppgifter blir då

$$0,1 \times (55\,000 \text{ ton/år} \times 1\,450 \text{ kWh/ton}) + 0,1 \times (95\,000 \text{ ton/år} \times 400 \text{ kWh/ton}) = 12,0 \text{ GWh/år}$$

Energibesparing kan uppnås genom optimering av dragserier med avseende på produktivitet och omarbetningar. En ökad kunskap om vad som sker i tråddragningsprocessen ökar sannolikheten att träffa rätt materialegenskaper, vilket medför högre utbyten och minskad omarbetning.

Den här typen av besparingar är både ekologiskt och ekonomiskt försvarbara då eventuella förändringar ej påverkar miljön (förutom den indirekta inverkan på miljön som energibesparingen i sig ger) eller medför merkostnader för industrin att införa.



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                             |                                                                                                                                                           |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins värmnings-,<br>bearbetnings- och materialpaket,<br>1999-2003                                                                                                                                                                                                                                            |                                                             | <b>Projekt</b><br>33012, Valstrådspreparing, alternativ till<br>betning <input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>8 600 585 SEK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-04-14 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                           |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Örebro Universitet<br>Celsius Materialteknik Karlskoga AB<br>Erasteel Kloster AB<br>Fundia Dalwire Oy Ab<br>Fundia Hjulsbro AB<br>Grytgöls Bruk AB<br>Gryts Bruk AB<br>Haldex Garphyttan AB<br>Hörle Tråd AB<br>Mustad & Sön A/S<br>Petterssons Järnförädling AB<br>Skyllbergs Industri AB<br>Springwire Sweden AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                     |  |
| Adress<br>SE-701 82 Örebro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |                                                                                                                                                           |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Peter Gillström, peter.gillstrom@tech.oru.se                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             |                                                                                                                                                           |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Valstrådspreparering, alternativ till betning, Jernkontorets forskning, serie TO.                                                                                                                                                                                                                                  |                                                             |                                                                                                                                                           |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Litteraturgranskningar inom två områden är genomförda "alternativ till betning" samt "egenskaper hos oxider på kolstål". Detta överensstämmer väl med de förväntade målen. Tre alternativa metoder har utvalts och värderats, skalbrytning, blästring och borstning. Projektet har utvecklat en metod för att bestämma mängden kvarvarande glödska på kolstålstråd efter töjning. Olika stålsorter som används inom svensk trådindustri har provats med denna metod. Blästringsförsök har genomförts i fullskalanläggning. Blästrad tråd har utvärderats vid dragförsök i testutrustningen vid Örebro universitet och vid dragförsök vid företag inom projektet. Energiåtgång, dragnings- och ytegenskaper har analyserats. Försök med skalbrytning och borstning har genomförts i testutrustning vid Örebro universitet. Oxidens egenskaper vid lagring har studerats.

## ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Enligt projektplanen uppskattades elförbrukning i betningsprocessen till 90 kWh/ton tråd, Därtill kommer kostnad för omhändertagande av 30 kg betslam/ton tråd. Energiförbrukningen under försöken med blästring var betydligt högre än den uppskattade vid betning. Det är ändå rimligt att tro att med små förändringar i processen sänka elförbrukningen betydligt under betningsprocessens. Vid försök med enbart skabrytning visade det sig att metoden inte gav en glödskalessfri tråd. Detta betyder att en efterföljande behandling krävs för att tillgodose svensk stålindustris specialprodukter med höga ytkrav.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Valstrådens glödskaless måste avlägsnas före dragningen. Betning i svavelsyra eller saltsyra är standardmetoder. Betningsteknikens användning förutsätter mycket god ventilation för en acceptabel inre miljö. Det medför mycket stora energikostnader eftersom all ersättningsluft till ventilationssystemet måste värmas upp till arbetslokalens temperatur. Ett fungerande system för rening av sköljvatten och destruktion av förbrukade betbad måste också installeras, innan utsläpp till omgivningen kan tillåtas. Därtill kommer avvattning och destruktion av vid reningsprocessen erhållet slam. Sammantaget medför detta att intresset för energibesparande och miljövänliga alternativ är stort.

För många tråddragerier är i dag följande fråga livsviktig: Kan alternativtekniker utvecklas, som inte bara är miljövänliga och energieffektiva utan också ger fullgod kvalitet på trådytan?

### ***Syfte och mål***

#### **Allmänna mål**

En ny kunskap har skapats om valstrådsoxidens sammansättning, kristallografiska uppbyggnad, vidhäftningsförmåga och mekaniska egenskaper samt hur dessa egenskaper påverkas av produktionsmetod (läggartemperatur vid varmvalsning), stålsammansättning, lagringstid (åldring).

Genomfört projekt beräknas ha gett följande resultat:

- Genom litteraturstudier och genom kontakter med institutioner och företag världen över har "state of the art" för området *alternativ till betning* klarlagts.
- Viktiga och utvecklingsbara alternativprocesser har utvalts och värderats
- Utvalda processer har provats i laboratorie- och produktionsskala. Mekanisk oxidborttagning, utförd med stor intensitet, avlägsnar oxiden effektivt men präglar ytan, vilket kan vara en kvalitetsnackdel. Vid låg intensitet präglas inte ytan men oxidborttagningen kan vara bristfällig. Forskningsarbetet har klarlagt vilka parametrar, som motsvarar optimum för olika ståltyper
- En kunskapsbas har skapats, tillgänglig för de enskilda företagens planering av kvalitets- och energioptimerade investeringar för glödskalessborttagning utan betning.

#### **Individuella mål för deltagande i projektet.**

Svensk trådindustri karakteriseras av specialprodukter med höga ytkrav. Därför har betning blivit den dominerande förbehandlingsmetoden. För de i projektet deltagande företagen finns ett klart uttalat mål att FoU-arbetet skall ge som resultat att alternativa metoder skall utvecklas med god energi- och miljöprofil och samtidigt hög kvalitetsnivå i fråga om ytstandard.

***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Svensk trådindustri och Örebro universitet har höjt sin kunskapsnivå. Industrin har därför bättre underlag för att kunna bedöma alternativa metoden inom området valstrådspreparering med avseende på energiåtgång och produktkvalitet.



|                                                                                                                                                                                                                           |                                                             |                                                                                                                                                               |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                                                                                                     |                                                             | <b>Projekt</b><br>33013, Alternativ till bly vid värmebehandling<br>av tråd <input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>5 093 995 SEK                                                                                                                                                                                            | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-02-07 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                               |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Örebro Universitet<br>EFD Induction AB<br>Institutet för Verkstadsteknisk Forskning<br>Haldex Garphyttan AB<br>Hörle Tråd AB<br>Pacwire AB<br>Sarline Furnaces AB<br>Springwire Sweden AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                         |  |
| Adress<br>SE-701 82 Örebro                                                                                                                                                                                                |                                                             |                                                                                                                                                               |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Tomas Berntsson, Tomas.Berntsson@tech.oru.se<br>Magnus Jarl, Magnus.Jarl@tech.oru.se                                                                  |                                                             |                                                                                                                                                               |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Alternativ till bly vid värmebehandling av tråd, Jernkontorets forskning, serie TO.                                                                                                       |                                                             |                                                                                                                                                               |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Vid försöken med induktionsanlöpning och rekristallisationsglödning uppnåddes 40-69% energiverkningsgrad beroende på tråddimension. Det pekar mot att målet att gå från ca 25% energiverkningsgrad med blybad till 50% med alternativ metod uppfylls. Energibesparingen i anlöpningsdelen kan uppskattas till ca 2,5 GWh/år. I det ingår minskning av tomgångsförluster och bättre utnyttjande av ugnslinjer. Vid patentering med försöksutrustningarna kunde inte energibesparingen uppskattas då den saknade energiåtervinning. Energibesparingarna vid patentering blir beroende av hur väl en produktionsutrustning kan byggas med avseende på energiåtervinning i kylsteget. Möjligheten att återvinna värme från kylsteget har ökat genom att luften i processen inte är förorenad av blyångor.

Försök har utförts med induktionsvärmning i Haldex Garphyttans pilotlinje (hårdlinje för experiment). I försöken ingick anlöpning av oljehärdad tråd (Oteva 70 SC från Haldex Garphyttan) och rekristallisationsglödning av deformationshårdnad lågkolhaltig tråd (SAE 1008 från Hörle tråd). Patenteringsförsök har utförts på IVF Industriforskning och Utveckling AB:s värmebehandlingslaboratorium i Göteborg samt kontinuerliga patentringsförsök med gaskylning har utförts hos Haldex Garphyttan AB. Försöken omfattade patentering i virvelbädd och med

gaskylning (komprimerad luft) med eller utan efterföljande hållugn. Materialet dels var skalad tråd som ska oljehärdas (Oteva 70 SC) samt pianotråd med C-halt ca 0,8% som efter hårddragning bl.a. används till fjädrar. Resultaten visar att det är möjligt att anlöpa tråd och ersätta rekristallisationsglödning i blybad med induktionsvärmning. Patentering av legerad tråd (Oteva 70 SC) går att utföra i virvelbädd och med gaskylning. Pianotråd kan patenteras med gaskylning.

### ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Försöken har visat att det är möjligt att uppnå likvärdiga materialegenskaper på tråd värmebehandlad med ersättningsmetoder som normalt (idag) är värmehandlat med blybad. För att ersättningsmetoderna ska kunna användas industriellt återstår arbete med att utveckla produktionsutrustning.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Vid tillverkning av tråd sker värmebehandling oftast i kontinuerliga processer, vilket förutsätter snabba temperaturförändringar och korta värmebehandlingstider. Tack vare att smält bly (blybad) har mycket god värmeöverföringsförmåga används blybad idag för bl.a. anlöpning, rekristallisationsglödning och patentering av tråd. Bly har negativ inverkan på miljön och blybadet har låg energiverkningsgrad, därför bör blybad ersättas med miljövänligare och energisnålare metoder.

### ***Syfte och mål***

#### ***Allmänt***

Projektet skall generera sådan kunskap att det skapas förutsättningar för företagen att vid värmebehandling av tråd helt ersätta bly med miljövänligare alternativ och minska energiförbrukningen med bibehållen produktkvalitet och produktivitet. Projektet skall identifiera tänkbara alternativ till bly som är anpassade för de värmebehandlingsmetoderna där trådföretagen idag använder blybad. Anlöpning och rekristalliserande glödning är värmebehandlingsmetoder där blybadet används för uppvärmning och vid patentering (omvandling av austenit till perlit vid konstant temperatur) används blybadet som kylmedia samt att säkerställa rätt omvandlingstemperatur. Av allt att döma krävs olika ersättningsmetoder för blybadet, beroende på om blybadet används vid kylning eller uppvärmning. Kritiskt granskning av olika alternativ med tanke på robusthet, miljöpåverkan samt energiförbrukning ingår i studien.

#### ***Mål för deltagande företag***

Projektmedlemmarna enades om att allmänna mål för projektet skall vara att ta bort bly ur tillverkningsprocessen och därmed skapa en bättre arbetsmiljö, mindre kostnader för hantering av miljöfarligt avfall, mindre miljöfarliga utsläpp och sänkta energikostnader. Detta med bibehållen kvalitet och produktivitet i befintliga lokaler.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Ett rimligt mål är att gå från dagens ca 25% verkningsgrad för blybad vid anlöpning till 50% med ersättningsmetod. Motsvarande mål för verkningsgrad vid patentering är en förbättring till ca 40%. Energimålen ska kunna nås genom att eliminera tomgångsförluster, öka utnyttjandet av hårdlinjer, genom att gå ifrån satskörning, skapa förutsättningar för återvinning av värme samt sträva efter att bättre värmeisolera processen.



Vid uppskattningen av energiförbrukningen/energibesparingspotential för trådföretagen har en förenklad beräkningsmodell används. Modellen bygger på att ett blybad med kapacitet 1 ton/h (storlek) avger mellan 50-200 kW i förlusteffekt hela tiden som badet är i drift. Vid uppvärmning antas förlusten lika varje driftstimma, medan vid kylning (patentering) erhålls värme från den uppvärmda tråden (den på det viset erhållna effekten anses som "gratis") och minskar den tillförda förlusteffekten. Indata är årsproduktion, arbetstid/skiftform och utnyttjandegrad. Total energibesparingspotential för trådföretagen i projektgruppen är uppskattad till 4,2 GWh/år.



|                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket, 1999-<br>2003                                                       |                                                             | <b>Projekt</b><br>43021, Rostfria stål för ökad prestanda i<br>kraftvärmeverk<br>43026 Rostfria stål för ökat energiutbyte vid<br>sopförbränning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>3 963 000 SEK (43021)<br>1 793 000 SEK (43026)                                                                                                 | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-05-09 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning<br>AB Sandvik Materials Technology<br>AvestaPolarit AB                                           |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                                                                              |
| Adress<br>IM, Drottning Kristinas väg 48, 114 28 Stockholm                                                                                                      |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Rachel Pettersson, <a href="mailto:rachel.pettersson@simr.se">rachel.pettersson@simr.se</a> |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                    |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Evaluation of materials for combustion environments<br>Jernkontorets forskning, serie TO.                                       |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                    |

## Sammanfattning

Kraftvärmeverk och sopförbränningsanläggningar utgör mycket svåra miljöer där en kombination av högttemperaturhållfasthet och korrosionsresistens krävs för metalliska material. Speciellt utsatta är överhettarna, där värmeöverföring sker från utvändiga rökgaser till invändig vattenånga. Ännu högre temperaturer kan dock förekomma för okylda delar som hållare och infästningsanordningar. Projektet har varit inriktat mot förbättring av underlaget för bedömning av risken för högttemperaturkorrosion hos högpresterande rostfria stål i dessa typer av förbränningsmiljöer. Målsättningen har varit att underlätta materialval, vilket möjliggör optimerad användning av befintliga material, samt utveckling av förbättrade material. Det innebär att energivinster kan uppnås genom en ökning av verkningsgraden i kraftvärmeverk och sopförbränningsanläggningar.

## Uppnådda huvudresultat

Den experimentella undersökningen har fokuserat på ett antal rostfria stålsorter avsedda för högtemperaturtillämpning, tabell 1.

Tabell 1 Undersökta material

| Material     | Si   | Cr   | Ni | Mo  | Al  | Övrigt        |
|--------------|------|------|----|-----|-----|---------------|
| ESSHETE 1250 | 0.5  | 15   | 10 | 1   |     | 6Mn, Nb, V, B |
| 304L         |      | 18   | 8  |     |     |               |
| 310          |      | 25   | 20 |     |     |               |
| 153MA        | 1.3  | 19   | 10 |     |     | Ce            |
| 253MA        | 1.6  | 21   | 11 |     |     | Ce            |
| 353MA        | 1.3  | 25   | 35 |     |     | Ce            |
| Sanicro 31HT | 0.6  | 21   | 31 |     | 0.5 | 0.5Ti         |
| Sanicro 28   | <0.5 | 27   | 31 | 3.5 |     | Cu            |
| 446          | 0.5  | 26.5 |    |     |     |               |
| Kanthal APM  | 0.2  | 20   |    |     | 5.5 | Ti, Zr        |

Långtidsexponeringar gjordes i högtemperaturmiljöer av störst relevans för kraftvärmeverk, nämligen oxiderande-sulfiderande betingelser, med jämförande studier i rena oxiderande miljöer, tabell 2. Temperaturområdet valdes till 700-1000°C. Utgångspunkten var att aktuella ångtemperaturer ligger i området 500-700°C men realistiska materialtemperaturer i överhettare är 10-20°C högre. I återuppvärmningsrör, där korrosion kan vara en begränsande faktor, ligger ång- och materialtemperaturen c:a 20 °C högre än i överhettare. Temperaturer upp till ca 750°C är därmed direkt relevanta för kylda komponenter och betydligt högre för okyllda. Högsta gastemperaturer i subkritiska system ligger på 1400 och 1100°C vid primärt resp. sekundärt överhettarpaket.

I sopförbränningsanläggningar begränsas den maximala driftstemperaturen av korrosion, som oftast orsakas av klorhaltiga föreningar. Överhettartemperaturer kring 400°C är inte ovanliga. För att behålla en direkt koppling till ovanstående resultat har inverkan av HCl tillsatser undersöktes vid 700-850°C inom STEM 43026 (tabell 2). Denna mycket begränsad del av arbetet bör i framtiden utvidgas för att omfatta andra temperaturer och även andra SO<sub>2</sub>/HCl förhållanden.

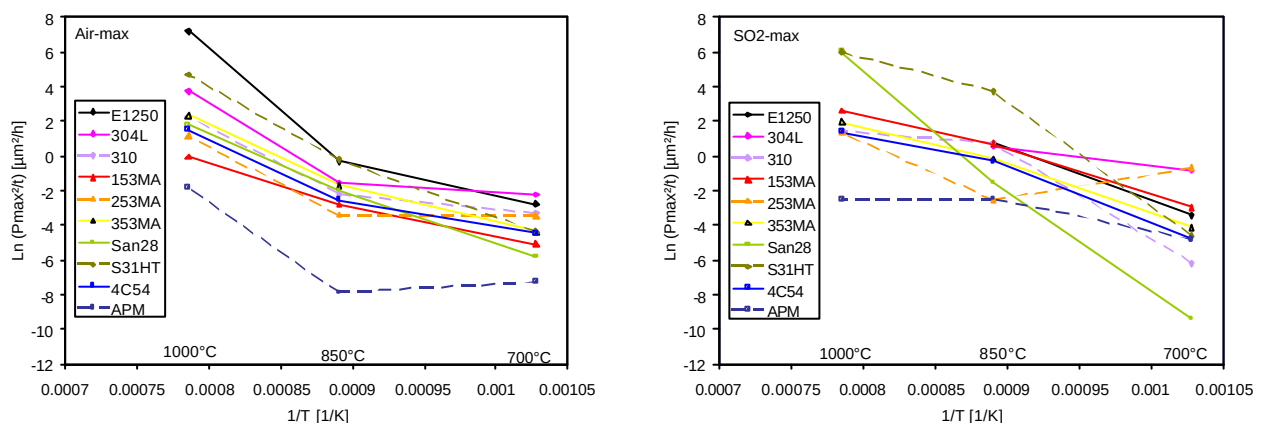
Tabell 2 Sammanfattning av högtemperaturexponeringar

| Miljö                                                                | 700°C                   | 850°C                   | 1000°C                  |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Luft                                                                 | 1000h<br>2000h<br>3000h | -<br>-<br>3000h         | 1000h<br>2000h<br>3000h |
| N <sub>2</sub> -1%O <sub>2</sub>                                     | -<br>-<br>-             | -<br>-<br>-             | 1000h<br>-<br>-         |
| Luft-1%SO <sub>2</sub> + 3%H <sub>2</sub> O                          | -<br>-<br>3000h         | 1000h<br>2000h<br>3000h | 1000h<br>-<br>3000h     |
| Luft-1%SO <sub>2</sub> + 20%H <sub>2</sub> O                         | -<br>-<br>3000h         | -<br>-<br>3000h         | -<br>-<br>-             |
| Luft-1%SO <sub>2</sub> + 20%H <sub>2</sub> O + 1%HCl<br>(STEM 43026) | -<br>-<br>3000h         | -<br>-<br>3000h         | -<br>-<br>-             |

Utvärderingen gjordes huvudsakligen genom metallografisk uppmätning av den maximala penetration av korrosionsprodukter, så att även den kvarvarande metalltjockleken erhöles. Det innebär att framtagna data är kompatibla med ASSET databasen som utvecklats i USA<sup>1</sup>. Den innehåller information om korrosionshastigheter hos kommersiella stålsorter och används bl.a. för processdesign och materialval för energisystem. Enkla empiriska relationer används för att relatera korrosionshastigheten hos en viss legering till miljöparametrar och temperatur. Dessa bygger på antagandet att korrosionsskador (metallpenetration) följer en paraboliska lag, där  $K_p$  är den paraboliska konstanten:

$$\log(K_p) = A + B \log(P_{S_2}) + C \log(P_{O_2}) + D/T$$

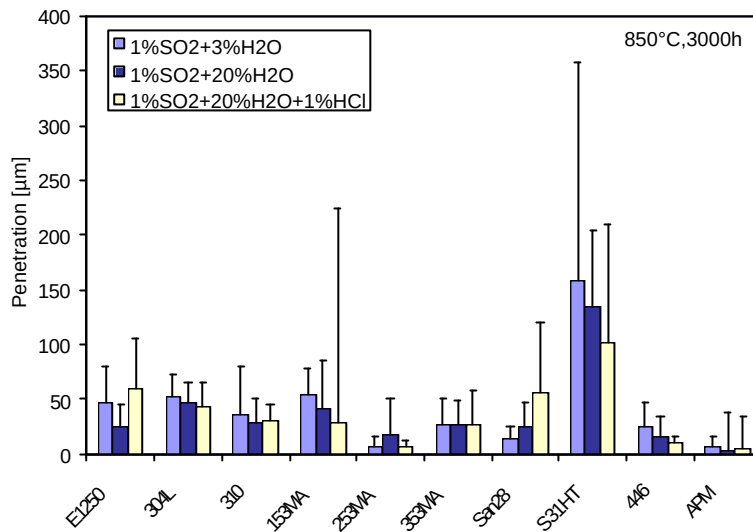
ASSET databasen inkluderar idag oxiderande, uppkolande, sulfiderande och vissa sulfiderande/oxiderande atmosfärer. Data som har genererats inom projektet fyller en viktig informationslucka då det tidigare saknats information både för sulfiderande/oxiderande atmosfärer med hög syrepartialtryck och generellt för höglegerade stål. Totalt har drygt 300 prover utvärderas med vardera sexton synfält. Exempel från 3000h exponeringar i luft och luft+1%SO<sub>2</sub>+3%H<sub>2</sub>O visas i figur 1. Det framgår att SO<sub>2</sub> accelererar korrosionsförloppet i de flesta fall trots det relativt höga syrepartialtrycket.



Figur 1. Maximal metallpenetration ( $P$ , i  $\mu\text{m}$ ) som erhållits från 3000h exponeringar i luft och i luft+1%SO<sub>2</sub>+3%H<sub>2</sub>O. Större variation ses för den sulfiderande atmosfären då korrosionsangrepp kan ske lokalt.

Inverkan av högre vattenånghalter, vanligt i förbränningsmiljöer, samt HCl, som förekommer i höga halter vid sopförbränning och eldning med biobränsle, visas i figur 2 för 850°C. Effekterna är måttliga, vilket stödjer bakgrundsdata som indikerar att den korrosiva effekten av HCl kan motverkas av SO<sub>2</sub>. Som jämförelse kan nämnas att en avverkning motsvarande 180 $\mu\text{m}$  observerats för 353MA vid 120h exponering vid 800°C i Ar+10%O<sub>2</sub>+2.6%H<sub>2</sub>O+0.25%HCl<sup>2</sup>.

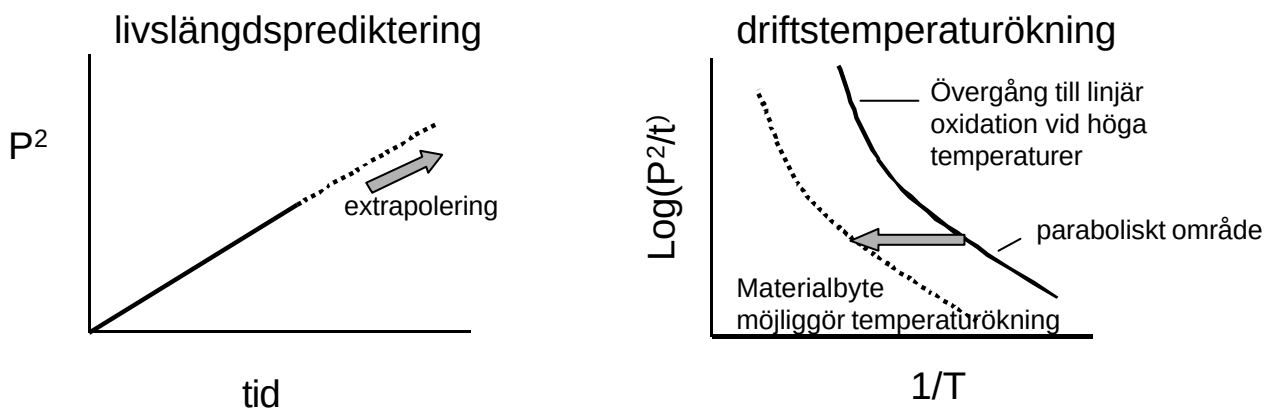
1. R. C. John, A. L. Young, W. T. Thompson: A computer program for engineering assesment of alloy corrosion in complex, high temperature gases. NACE Corrosion '97, Paper 142
2. P. Szakalos, R. Pettersson: Corrosio of three stainless steels in an oxidising-chlorinating environment at 800°C. Proc Eurocorr, Trondheim 1997



Figur 2. Metallpenetration tre olika miljöer efter 3000h exponering vid 850°C. De fyllda staplarna visar medelvärden och linjerna anger maxvärden. Det höga maxvärdet för 153MA beror på nodulbildning.

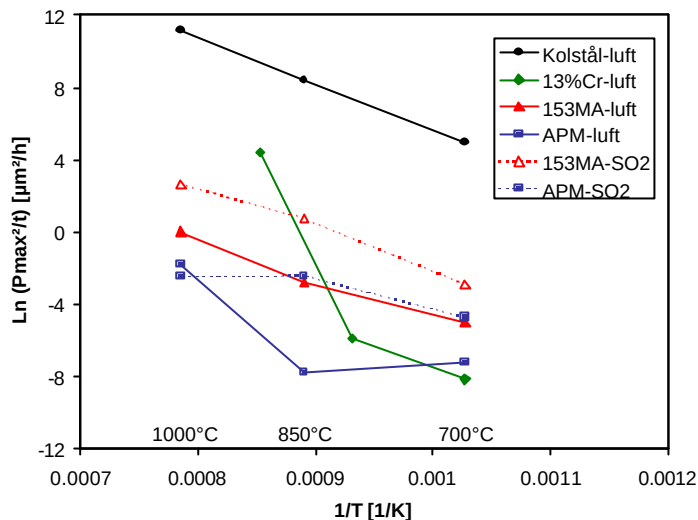
### Tolkning av resultaten i förhållande till forskningens syfte/mål

Resultaten från projektet kan användas på två sätt, som illustreras schematiskt i figur 3. Metallpenetrationsdata för varje stålsort vid en viss temperatur kan extrapoleras för att erhålla en predikterad livslängd för en anläggningskomponent, under förutsättning att samma korrosionsmekanismen råder under exponeringstiden. Alternativt kan data för olika stålsorter jämföras för att visa hur byte till en mer korrosionsresistent material möjliggör en drifttemperaturökning utan ökning av avverkningshastigheten.



Figur 3 Schematisk illustration av användning av data

Några exempel visas i figur 4, där data för 153MA och APM som tagit fram inom projektet jämförs med referensdata för kolstål och ett 13%Cr martensitiskt stål. Som framgår kan byte till ett mer höglegerade material möjliggör den typ av temperaturökning som förespeglades i projektpresentationen. Emellertid krävs mer data för att göra en direktkoppling till de mer komplexa miljöerna som förekommer i kraftvärmeverk och sopförbränningsanläggningar.



Figur 4. Data för 153MA och APM i luft och luft + 1%SO<sub>2</sub>+3%H<sub>2</sub>O samt jämförelse med referensdata för kolstål och ett 13%Cr martensitiskt stål. 1000h data för 13%Cr, 3000h för övriga material.

## Projektpresentation

### Problemställning

Energiutbytet i kraftvärmeverk och sopförbränningsanläggningar är direkt relaterat till ångtemperaturen. Därför sker en kontinuerlig utveckling mot högre temperaturer. Den höjning som brukar anges för kraftvärmeverk med konventionell teknik (koleldade kraftverk) är från subkritisk ånga på 180 bar och 540°C till "ultra"-superkritisk ånga, 300 bar, 620°C. Detta leder till verkningsgradsökning från c:a 38% till 48%. En viss effektivitetsökning är även möjlig för konventionella, subkritiska system, upp till max 42%. På lång sikt är höjning av ångdata i ultrasuperkritiska system på upp till 325 bar, 650-700°C tänkbara. Verkningsgraden hamnar då på c:a 50%. För andra bränslen är temperaturerna lägre, även om det också för t.ex. biobränslen och sopförbränning finns en strävan att gå mot högre temperaturer.

Högtemperaturkorrosion hos överhettare, förångare och okylade detaljer kan dock ofta vara gränsättande i kraftvärmeverk och oftast i sopförbränningsanläggningar. En temperaturökning för att förbättra verkningsgraden kräver därmed optimal användning av befintliga högpresterande stålsorter alternativt utveckling av nya legeringar. Ett optimerat materialval kan ge en längre livscykel för komponenterna alternativt ett bättre energiutnyttjande då det ökar effektiviteten vid elproduktion.

### Syfte och mål

Projektet syftar till att förbättra underlaget för bedömning av risken för högtemperaturkorrosion hos högpresterande rostfria stålsorter. Detta kommer att underlätta materialval för komplexa miljöer vilket möjliggör optimerad användning av befintliga material samt utveckling av förbättrade material för kraftvärmeverk och sopförbränningsanläggningar.

Projektet målsättning ur industriperspektiv är att bidra till utveckling och val av material för krävande högtemperaturtillämpningar och därmed möjliggöra utökade livslängder för anläggningar. Detta medför även en positiv miljöeffekt på sikt med minskad skrotning och haverier.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Energivinsten förväntas sker genom en ökning av verkningsgraden i kraftvärmeverk. Projektet ger underlag för val och utveckling av högtemperaturmaterial som kan motstå de korrosiva betingelser i förbränningsmiljön. Genom samverkan med konstruktions- och hållfasthetsförbättringar kan därmed en ökning av ångdata och verkningsgraden uppnås.

I konventionella fossileldade kraftverk används idag subkritisk ånga vid 180 bar och 540°C, detta ger en verkningsgrad kring 38%. För sopförbränning och biobränslen ligger temperaturer lägre, typiskt kring 400°C, på grund av korrosionsbegränsningar. En ökning av ångtemperaturen med 20°C medför en effektivitetsvinst som kan uppskattas till 1 procentenhet vid 540°C och 1,3 procentenheter vid 400°C. Exakta effektivitetsvinster går normalt ej att beräkna utifrån ångdata, eftersom en anläggnings verkningsgrad även beror av faktorer som energiförbrukning i pumpar, antal processteg, förvärmning av förbränningsluft etc. Detta är faktorer som varierar från panna till panna, och vilka till viss del själva påverkas av valda ångdata.

Enligt uppgifter från STEM:s hemsida för år 2000 låg den totala elproduktionen från kraftvärmeverk i Sverige kring 9 TWh/år varav ca 40% från olika biobränslen och resten från kol+olja+naturgas+gasol. Utifrån dessa uppgifter skulle en generell höjning av ångtemperaturer med 20°C ge c:a 55 GWh/år ifrån fossila bränslen och 35 GWh/år ifrån biobränslen och sopor.



|                                                                                                                                                                                        |                                                             |                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                                                |                                                             | <b>Projekt</b><br>43022 Styrning av rostfria ståls oxid och<br>betning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>9 827 000 SEK                                                                                                                                                         | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-01-14 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                          |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning<br>AGA AB<br>AvestaPolarit AB<br>AvestaPolarit Stainless Oy<br>Fagersta Stainless AB<br>AB Sandvik Materials Technology |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                    |
| Adress<br>IM, Drottning Kristinas väg 48, 114 28 Stockholm                                                                                                                             |                                                             |                                                                                                                                                          |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Rachel Pettersson, <a href="mailto:rachel.pettersson@simr.se">rachel.pettersson@simr.se</a>                        |                                                             |                                                                                                                                                          |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Oxidation and pickling of stainless steels in a new annealing process,<br>Jernkontorets forskning, serie TO                                            |                                                             |                                                                                                                                                          |

## Sammanfattning

En ny typ av värmningsprocess där förbränningsluften ersätts med syrgas har introducerats för rostfria stål. Tekniken, som kallas oxy-fuel, har hittills främst använts för ämnesvärmning. Nu börjar oxy-fuel tekniken dock även implementeras för glödgning av band eller plåt efter slutgiltig valsning. De förväntade energivinsterna med tekniken sker främst därför att det blir ingen uppvärmning av icke nödvändigt kväve som i fallet med luftbaserad förbränning.

Projektet utfördes i syfte att utröna hur efterföljande processer påverkas av glödgning med oxy-fuel processen. För att öka möjligheten med att implementera oxy-fuel processen för glödgning är det nödvändigt att påvisa att processen inte medför någon negativ effekt för betningsprocessen som används för att avlägsna yttoxiden efter glödgningen.

De uppnådda resultaten av projektet är uppmuntrande då de visar att bettiden primärt styrs av glödgningstemperaturen och glödgningstiden. Ingen signifikant skillnad i bettid kan påvisas vid oxy-fuel glödgning jämfört med konventionell glödgning vilket medför att den förväntade energibesparingen är uppnåelig.



## Uppnådda huvudresultat

Glödgning och betning av tre rostfria stålsorter utfördes i pilot skala. Stålsorternas nominella komposition samt normala glödgningsparametrar redovisas i tabell 1. 304L är ett austenitiskt standard stål medan 2205 och SAF2507 är duplexa (austenitisk-ferritisk) stål.

Glödgningsförsöken utfördes i en 4 m lång pilot ugn på AGA AB, se figur 1. Provmaterialet för glödgningsförsöken klipptes upp till band med en storlek av 1,5 m x 0,1m och matades genom ugnen genom ihopkoppling med ett bärarband. Försöksmatrisen för de olika glödgningsförsöken kan ses i tabell 2. Betning utfördes i den pilot anläggning som finns på IM och simulera en produktionslinje med ett 15 meter långt elektrolytiskt betsteg i 180g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vid 70°C och ett 25 meter långt efterföljande betsteg i blandsyra (HNO<sub>3</sub>-HF) vid 60°C. Den totala bettiden för ett visuellt rent prov bestämdes genom betning vid olika ekvivalenta linjehastigheter för den simulerade produktionslinjen

Tabell 1 Undersökta material

| Stålsort | Tjocklek      | Cr | Ni | Mo  | N    | Produktions glödgning |
|----------|---------------|----|----|-----|------|-----------------------|
| 304L     | 1.95 mm       | 18 | 8  | 0.1 | 0.04 | 160s at <1130°C       |
| 2205     | 0.95 mm       | 22 | 6  | 3   | 0.17 | 35s at 1090-1150°C    |
| SAF 2507 | 1.26 /1.78 mm | 25 | 7  | 4   | 0.25 | 146s at 1030-1060°C   |



Fig.1. Detaljer av bandmatningssystemet för pilot glödgningen på AGA AB. Vänstra bilden visar inloppet till ugnen och den högra ugnsutloppet med tillhörande kylzon

Tabell 2 Parameterval vid glödgning i pilotskala

| Serie | Stålsort | Glödgningsförhållande               | Andra variabler                                                                                                       |
|-------|----------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q     | 304L     | 1150°C 160s                         | Oxy-fuel med 7% eller 16% O <sub>2</sub><br>Svalning i Ar eller luft<br>Konventionell glödgning med 3% O <sub>2</sub> |
|       | SAF2507  | 1145°C 100s                         |                                                                                                                       |
| R     | 304L     | 1100 eller 1120°C, 80s              | Oxy-fuel med 2% eller 7% O <sub>2</sub><br>Konventionell glödgning med 3% O <sub>2</sub>                              |
|       | SAF2507  | 1100 eller 1120°C, 60s              |                                                                                                                       |
|       | 2205     | 1100 eller 1120°C,<br>60 eller 100s |                                                                                                                       |
| P     | 304L     | 1070 eller 1120°C<br>30 eller 60s   | Oxy-fuel med 2% eller 11% O <sub>2</sub>                                                                              |

## Oxidbildning vid glödgning

Oxiderna som bildades vid glödgning karakteriserades med en kombination av tekniker, huvudsakligen med svepelektronmikroskop (SEM) och glimurladdningsspektroskopi (GDOES). Glödgningsförhållanden i pilot skala gav liknande oxid som efter produktionsglödgning. Huvuddelen av oxiden var en tunn kromoxid och täckte mer än 95% av ytan, figur 2. Dessutom fanns noder av järnrika oxider slumpvis fördelade över ytan. Dessa var största för 304L, figur 3. Nodulbildning är ett välkänt fenomen vid oxidation av rostfria stål och är relaterat till lokal nedbrytning av den skyddande kromoxiden.

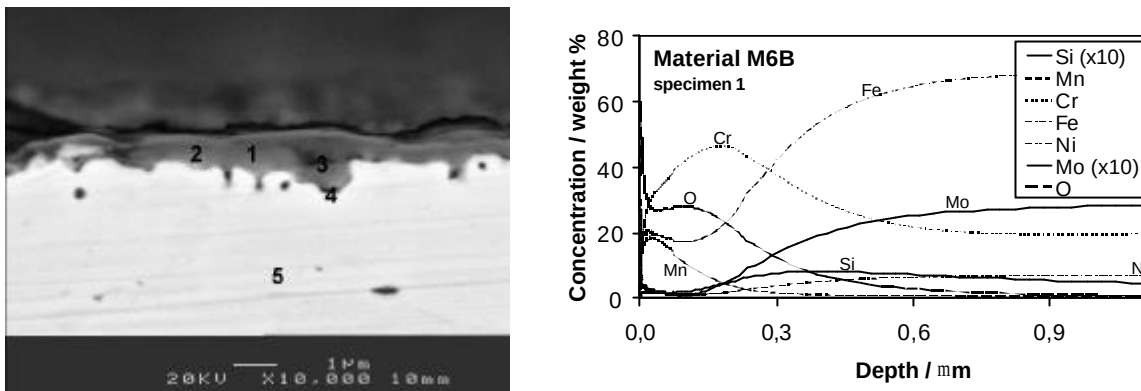


Fig. 2 Tvärsnitt (vänster bild) och djupprofil från GDOES (högra bilden) av den dominerande oxiden på produktionsglödgat 2205. Oxiden är mindre än 1  $\mu\text{m}$  tjock och utgörs främst av kromoxid med viss ytanrikning av mangan

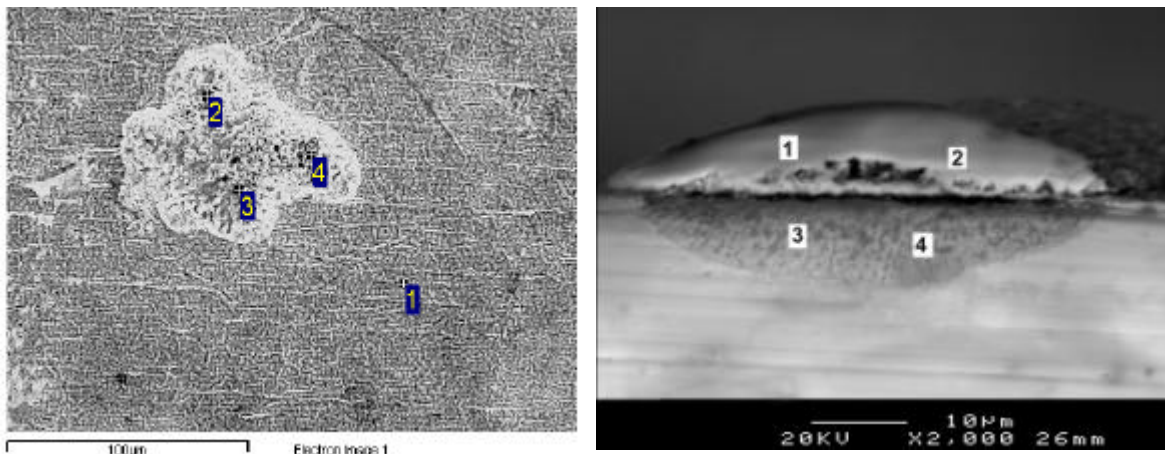


Fig. 3 Ytbild (vänster bild) och tvärsnitt (högra bilden) av en järnrik oxid nodul på 304L efter glödgning i pilotskala. Nodulerna var upp till 100  $\mu\text{m}$  i diameter hade en utbredning på 10-20  $\mu\text{m}$  under metall ytan

Undersökning av mikrostruktur och hårdhetsmätningar visade att 304L och möjligtvis även 2205 var underglödgade i R-försöken. Däremot var SAF2507 överglödgade i Q-försöken vilket resulterade i långa bettider. Glödgningsförhållandena vid pilot försöken hade därmed ett större omfång än vid produktionsglödgning.

## Faktorer som påverkar betning

Flera faktorer kan påverka betbarheten av stålet efter glödgning:

- Oxidtjocklek
- Kromhalt i oxid
- Kromutarmning under oxid
- Anrikning av legeringselement under oxid
- Oxidnoder
- Defekter i oxid så som porer och sprickor

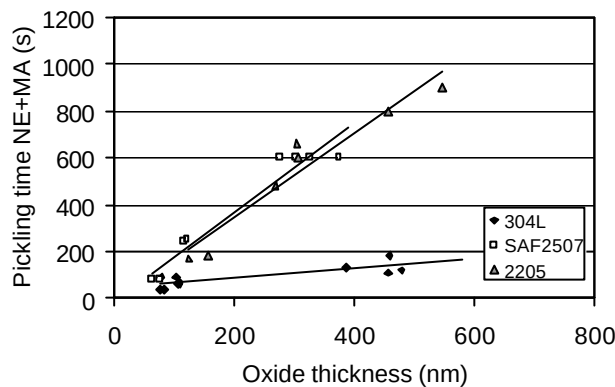


Fig 4 Beroende av bettid på oxidtjocklek, utvärderat av GDOES djupprofiler

Resultaten från betningsförsöken visade att bettiden främst styrs av oxidtjocklek, figur 4. För en specifik oxidtjocklek var bettiden liknande för de duplexa materialen medan den var ca 3 gånger kortare för 304L, trots att en högre koncentration av blandsyran användes för de duplexa stålen. Att finna orsaken till detta låg inte inom projektets ramar men en sannolik förklaring är att de högre krom- och molybdenhalterna i de duplexa stålen gör den utarmade zonen mer svårupplöst i betsyran.

Både multivariabel analys och modellering användes för att analysera resultaten men inga systematiska effekter av brännartyp, syrepartialtryck eller kylmedium kunde identifieras. Detta är ett viktigt resultat då det innebär att det inte kan påvisas någon signifikant skillnad på den efterföljande betningen mellan oxy-fuel glödgning och konventionell glödgning. Oxidtjockleken kunde relateras till glödgningstemperatur och tid via en paraboliska oxidtillväxtlag;

$$x^2 = k_p \cdot t \quad (1)$$

$$k_p = k_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

där  $x$  är oxidtjocklek,  $k_p$  den paraboliska hastighetskonstanten och  $t$  tiden. Detta visas i figur 5a. Den predikterade bettiden uppnås genom att kombinera ekvation (2) med de linjära förhållandena i figur 4 och korrelerat till de experimentella bettiderna, figur 5b.

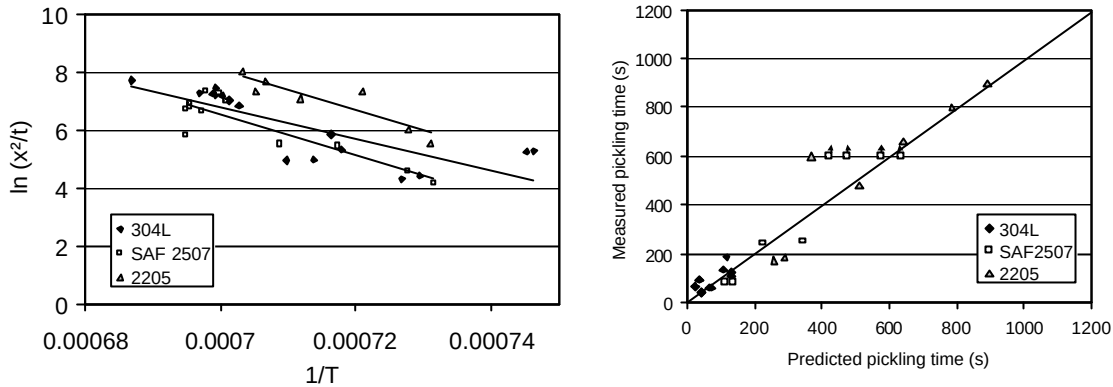


Fig 5 (a) Arrheniusplott som visar förhållandet mellan oxidtjocklek och glödningstid och temperatur  
(b) Korrelation mellan predikterad bettid baserad på oxid tjocklek och faktiskt uppmätta tider.

Lokala variationer i oxidtjocklek och oxid sammansättning påverkar sannolikt också betbarheten. Detta är speciellt märkbart för 304L där stora oxidnoduler uppkom under glödgningsförsöken. En enkel linjär regression av tillgängliga resultat för 304L påvisade att bettiden var beroende av både oxidtjocklek samt antalet noduler i oxiden. Ingen signifikant effekt kunde påvisas för 2205 där storleken på nodulerna var mindre.

### **Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål**

Arbetet inom projektet har fokuserats på användningen av oxy-fuel tekniken för slutgiltig glödning av kallvalsat rostfritt bandmaterial där det inte fanns några tillgängliga produktions data vid projektets start. Den primära frågeställningen var om oxy-fuel processen innebär några konsekvenser, fördelaktiga eller ofördelaktiga, med tanke på den oxid som bildas vid glödningen och dess bortagning i den efterföljande betningsprocessen. Det fanns två tänkbara utfall. Den första var att glödning med oxy-fuel skulle resultera i en mer lättbetad oxid vilket skulle innebära att den totala produktionseffektiviteten ökade och att konsumtion av betsyran minskade. Den andra var att den bildade oxiden var mer svårbetad men att energibesparingen i glödgningsprocessen skulle överväga ökad process tiden och betsyra konsumtion.

Resultaten har visat att glödning med oxy-fuel ger en liknande oxid som konventionell glödning (propan-luft). Oxid tillväxtkinetiken är liknande mellan de olika processerna vilket också är fallet för förhållandet mellan oxidtjocklek och betning. Det finns inga för- eller nackdelar med oxy-fuel processen på de efterföljande processerna. Detta innebär att det potentiella energibesparing i glödgningsprocessen, som förväntas ligga kring 150 kWh/ton enligt projektpresentationen, är uppnåelig.

Det finns även potentiella energivinster i glödgningsprocessen själv vilket bör utforskas närmare. Tillgänglig information indikerar att oxy-fuel processen ökar värmeöverföringen från gasen till stålet. Om detta är fallet kan glödningstiderna förkortas vilket medför tunnare oxid och kortare bettider.

## Projektpresentation

### **Problemställning**

Glödning av rostfria stål görs för att erhålla åsyftad mikrostruktur och mekaniska egenskaper. De två vanligaste ugnsatmosfärerna är luft i elektriska ugnar och förbränningsgaser i gas- eller oljeeldade ugnar. Oxidation av ytan sker vid glödning och oxiden påverkas av flera faktorer så som ståltyp, typ av ugnsvärmning, temperatur, tid, atmosfär.

En ny typ av värmningsprocess där förbränningsluften ersätts med syrgas är i introduktionsfasen. Tekniken kallas oxy-fuel är utvecklad av AGA AB i samarbete med AvestaPolarit (då Avesta Sheffield).

Den primära frågeställningen inom projektet var om oxy-fuel processen innebär några konsekvenser, fördelaktiga eller ofördelaktiga, med tanke på den oxid som bildas vid glödningen och dess bortagning i den efterföljande betningsprocessen.. Ökad förståelse av dessa effekter är nödvändig för att införa en bredare användning av oxy-fuel processen. Möjligheten att optimera glödgningsförhållanden för att underlätta den efterföljande betningen behöver också undersökas..

### **Syfte och mål**

Syftet med projektet var att underlätta införsel av energibesparande glödgningsprocesser för olika typer av rostfria produkter. Arbetet inriktades mot oxy-fuel processen och omfattade kvantifiering av inverkan av glödgningsparametrar på oxidbildning och de efterföljande betningsprocesserna.

### **Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.**

Vid projektets start fanns den 36 ugnar med oxy-fuel teknik i drift enligt kännedom hos AGA / Linde, majoriteten av dessa i Sverige. Majoriteten av dessa ugnar användes för ämnesvärmning. Idag har antalet ugnar fördubblats och ett fåtal andra ugnar använder även partiell oxy-fuel s.k. förstärkning (boosting). Oxy-fuel tekniken används för olika stålsorter och materialdimensioner från 0,5 mm till 1000 mm tjocklek. Energibesparing görs främst därför att det blir ingen uppvärmning av icke nödvändigt kväve som vid luftbaserad förbränning, dessutom kan en ökning av linjehastigheten innebära att strukturella förluster sprids över fler ton av produkter. Den totala reduktionen av energibehovet har visat sig överstiga 20% och ligger i de flesta fall mellan 40-50%. Den energi som krävs för att producera syrgas är relativt liten och motsvarar ungefär 6% av värmeinnehållet i bränslet. Den totala potentiella energibesparingen genom fullständig konvertering till oxy-fuel teknik uppskattas till 150 kWh/ton.

De potentiella energibesparingar kan beräknas utgående från siffror från svensk och nordisk produktion av rostfria stål. Beräkningen är baserad på antagandet att varje ton stål passerar uppvärmningsprocesser en gång och att hälften av produktionen konverteras till oxy-fuel tekniken. En högre siffra erhålls om flera glödgningssteg finns i produktionslinjen.

|                 |                                                                                             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sverige         | $\frac{1}{2} \times 1 \text{ miljon ton} \times 150 \text{ kWh/ton} = 75 \text{ GWh/år}$    |
| Nordiska länder | $\frac{1}{2} \times 2.2 \text{ miljon ton} \times 150 \text{ kWh/ton} = 165 \text{ GWh/år}$ |

En konvertering till oxy-fuel tekniken skulle också ge fördelaktiga miljöaspekter. Huvudsakligen genom att bildning av NO<sub>x</sub> reduceras genom att ingen tillförsel av kväve till ugnen behövs som vid luftförbränning. De bränslerelaterade utsläppen av CO<sub>2</sub> och SO<sub>x</sub> reduceras också i proportion till energibesparingen.



|                                                                                                                                                             |                                                             |                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                    |                                                             | <b>Projekt</b><br>43023, Rostfria stål i utrustning för våt<br>rökgasrening i anläggningar för<br>avfallsförbränning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>4 046 191 SEK                                                                                                                              | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2001-03-26 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                                                                        |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Korrosionsinstitutet<br>Institutet för Metallforskning<br>AvestaPolarit AB<br>AB Sandvik Materials Technology               |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                                                  |
| Adress<br>KI, Kräftriket 23 A, 104 05 STOCKHOLM                                                                                                             |                                                             |                                                                                                                                                                                                        |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Mats Linder, mats.linder@corr-institute.se                                              |                                                             |                                                                                                                                                                                                        |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Rostfria stål i utrustning för våt rökgasrening i anläggningar för avfallsförbränning<br>Jernkontorets forskning, serie TO. |                                                             |                                                                                                                                                                                                        |

## Sammanfattning

Korrosionsmiljön i system för våt rökgasrening har kartlagts i tre anläggningar för avfallsförbränning genom bestämningar av daggpunkter och kemisk analys av kondensat ur rökgas som utfällts vid olika temperaturer. Kännedomen om kondensatens sammansättning har möjliggjort beredning av ett urval av syntetiska kondensat som använts vid korrosionsundersökningar av rostfria stål i laboratorium. Resultaten av laboratorieundersökningarna har medgivit en inbördes rangordning av stålens korrosionshårdighet i de aktuella miljöerna.

## Uppnådda huvudresultat

### Daggpunktsbestämningar

Daggpunkter har bestämts i orenade rökgas i tre anläggningar ( A, B respektive C) för avfallsförbränning. Anläggning A eldas uteslutande med hushållsavfall. Anläggning B eldas med en blandning av hushållsavfall och annat avfall t.ex. från byggnadsindustrin. Blandningens sammansättning kan variera i viss omfattning. I anläggning C används också en blandning av hushållsavfall och annat sorterat avfall. Blandningens sammansättning uppges vara nära nog konstant i denna anläggning.

Undersökningarna omfattade mätningar av rökasens temperatur samt den högsta temperaturen där kondens kan uppstå. För bestämningarna användes en elektrokemisk sond. Sonden är luftkyld och har en anordning för mätning av dess ytemperatur. Sonden förvärms före mätningen till en temperatur som ligger väl över gasens daggpunkt. Temperaturen tillåts stiga spontant till rökgasens temperatur för bestämning av denna. Därefter sker en långsam kylning till dess kondensation indikeras och daggpunktstemperaturen avläses. Uppmätta gastemperaturer och daggpunkter visas i tabell 1.

Tabell 1. Gastemperaturer, daggpunkter och uttagna kondensat i de tre anläggningarna

| Anläggning | Gastemp.<br>°C | Daggpunkt |                  | Kondensat |       |
|------------|----------------|-----------|------------------|-----------|-------|
|            |                | °C        | Antal tillfällen | Temp °C   | Antal |
| A          | 140*           | 79        | 1                | -         | -     |
|            | 145            | 90        | 5                | 68        | 1     |
|            |                |           |                  | 63        | 1     |
|            |                |           |                  | 40        | 3     |
|            |                | 91        | 3                | 40        | 1     |
|            |                |           |                  | 58        | 2     |
| B          | -              | 67        | 1                | 35        | 1     |
|            | 133            | 67        | 3                | 35        | 2     |
|            |                |           |                  | 55        | 1     |
| C          | 250**          | 87        | 1                | -         | -     |
|            |                | 80        | 3                | 45        | 1     |
|            |                |           |                  | 30        | 2     |
|            | 142            | 66        | 2                | 30        | 1     |
|            |                |           |                  | 55        | 1     |
|            |                | 61        | 4                | 27        | 2     |
|            |                |           |                  | 45        | 1     |
|            |                |           |                  | 55        | 1     |

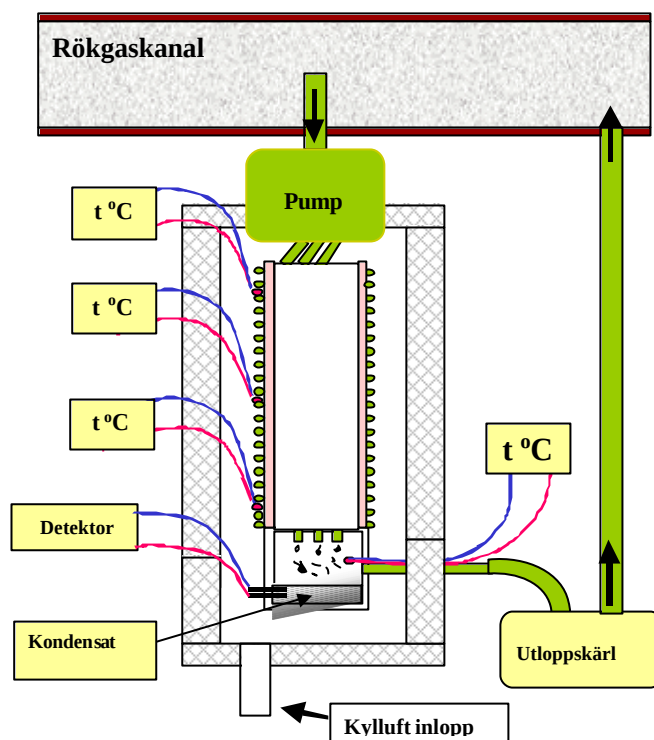
\*Dellast

\*\*Före economiser

Det framgår av tabell 1 att de indikerade daggpunkterna har ett samband med rökgasens temperatur. Sålunda låg daggpunkten i anläggning A högre vid full last och hög gastemperatur än vid dellast då temperaturen var lägre. Likaså var daggpunkten i anläggning C avsevärt högre i den varmare gasen före economisern än i kallare gas efter economisern.

## Kondensering av rökgaser

Orenad rökgas sögs ut från en rökgaskanal och leddes genom en luftkyld kylare av inert material (figur 1). Temperaturen inne i kylaren mättes vid fyra positioner av vilka den sista är belägen i den behållare där kondensatet inne i kylaren samlas. Dessutom mättes temperaturen och samlades kondensat i ett slutet kärl vid gasens utlopp.



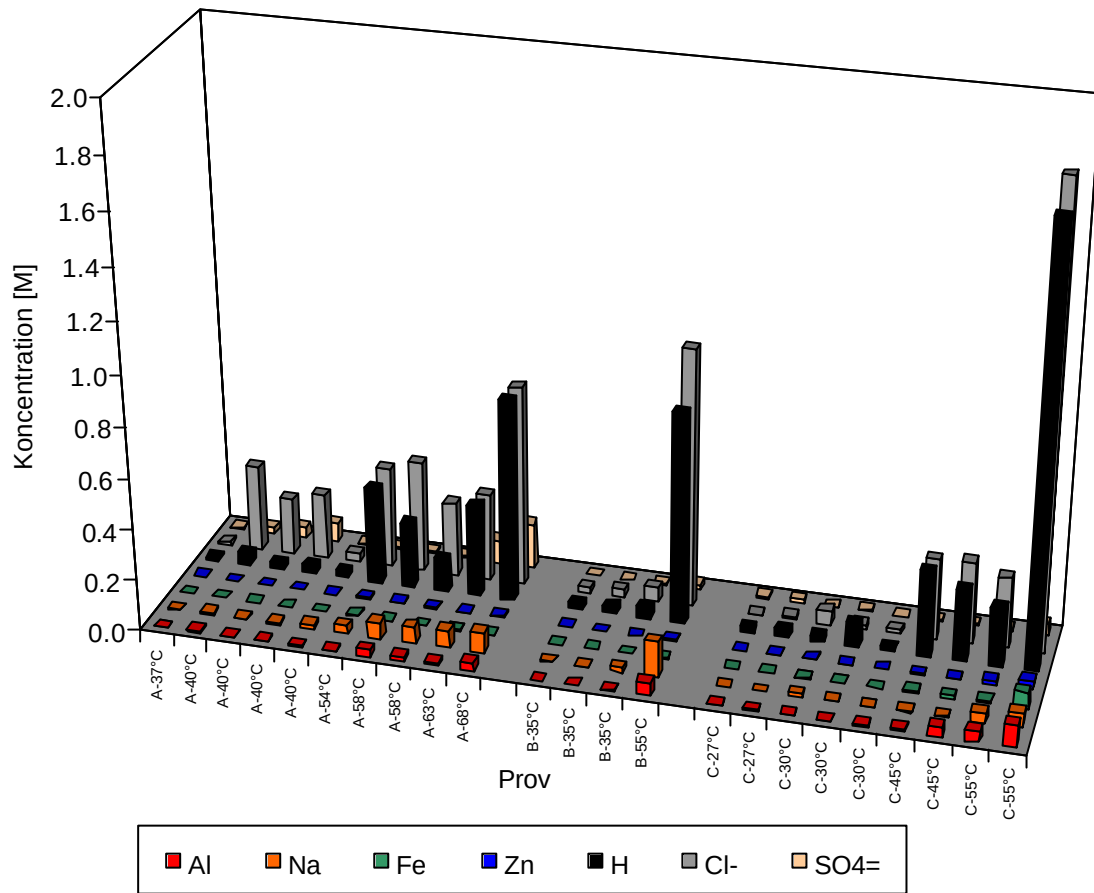
Figur 1. Schematisk bild av rökgaskylare

Kondensat extraherades i förbränningsanläggningarna vid de temperaturer som anges i tabell 1. Det visade sig att kondensat med märkbar volym inte kunde framställas vid de höga dagpunkter som indikerats främst i anläggningarna A och C. Uppenbarligen detekterade den mycket känsliga sonden dagpunkter där volymen hos kondensat var mycket liten. De högsta dagpunkterna ligger vid högre temperaturer än vad som förväntas för saltsyra och kondensation av svavelsyra är inte känd i anläggningar för förbränning av avfall av den aktuella typen. Orsaken till de höga dagpunkterna i anläggningarna A och C är inte känd för närvarande och det är oklart hur det kondensat som bildas vid dessa temperaturer påverkar korrosion hos rostfria stål.

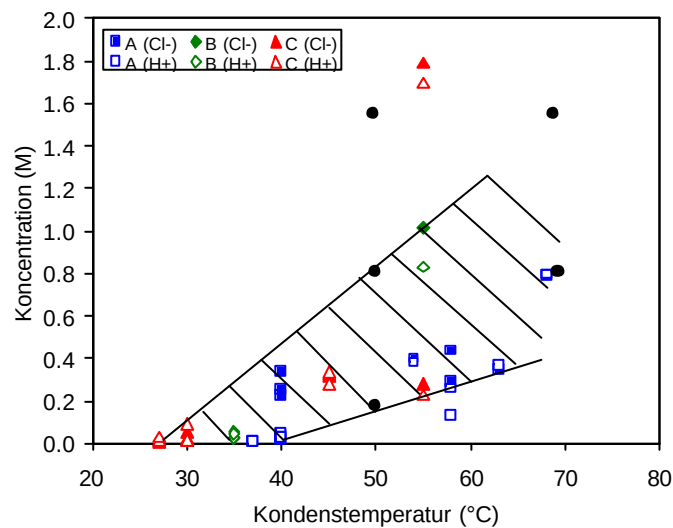
### Kondensatanalys

Analys av kondensatet från de tre olika sopförbränningsanläggningar gjordes dels med plasma masspektrometri (ICP-TOFMS =Inductively Coupled Plasma Time Of Flight Mass Spectrometry) för bestämning av metallhalter dels med jonkromatografi för anjonbestämning. Det är mycket tydligt från resultaten i figur 2 att kondensatet huvudsakligen består av saltsyra ( $H^+$  och  $Cl^-$ ), och att koncentrationen ökar med ökande kondensationstemperatur. Figur 3 visar halterna av enbart dessa två joner som funktion av kondensationstemperaturen. Utgående från dessa resultat har ett antal koncentrationer och temperaturer valts för beredning av simulerade kondensat att använda vid korrosionsprovning i laboratorium.





Figur 2. Analys av dominerande joner i kondensatet från de tre olika anläggningarna.



Figur 3. Koncentrationer av  $H^+$  och  $Cl^-$  som funktion av kondensstemperaturen för varje anläggning. Det skuggade området visar trenden för merparten av analyserna och de svarta fyllda cirkelarna anger betingelserna som valts för simulering av kondensat för laboratorieprovning.

## Korrosionsprovning

Korrosionsprovningen av fyra stålsorter genomfördes i simulerade kondensat. Luftmättad saltsyra vid olika temperaturer och koncentrationer (enligt figur 3) användes för framställning av kondensaten.

Prov av två duplexa stål, 2205 och SAF 2507, togs fram av AB Sandvik Materials Technology medan prov av två höglegerade austenitiska stål, 254SMO och 654SMO togs fram av AvestaPolarit AB. Stålsens nominella sammansättningar ges i Tabell 2.

Tabell 2. Stålsorter som användes för korrosionsprovningen.

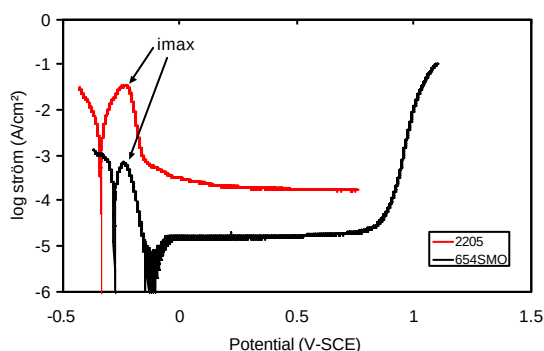
| Stålsort | Typ          | Chargenr.  | Tjocklek | Nominell sammansättning |      |    |     |     |
|----------|--------------|------------|----------|-------------------------|------|----|-----|-----|
|          |              |            |          | C                       | N    | Cr | Ni  | Mo  |
| 254SMO   | Austenitiskt | 811200-006 | 3mm      | 0.01                    | 0.20 | 20 | 18  | 6.1 |
| 654SMO   | Austenitiskt | H3175-032  | 2.3mm    | 0.01                    | 0.50 | 24 | 22  | 7.3 |
| 2205     | Duplext      | 455403     | 5mm      | 0.02                    | 0.17 | 22 | 5.7 | 3.1 |
| SAF2507  | Duplext      | 453453     | 5mm      | 0.02                    | 0.27 | 25 | 7   | 4   |

Provkuponger med dimensionerna 25 x 25 mm fixerades i en Avestacell så att endast en yta av 1 cm<sup>2</sup> exponerades för kondensaten. Korrosionspotentialen mättes under 5 minuter. Sedan togs en anodisk polarisationskurva upp med startpunkt vid 100 mV under korrosionspotentialen. Därvid höjdes potentialen mot mer positiva värden med en konstant hastighet av 20 mV/min under samtidig registrering av strömtätheten (A/cm<sup>2</sup>) genom provytan. Två exempel på erhållna polarisationskurvor som uppvisar strömtoppar ges i figur 4. Den högsta uppmätta strömtätheten ( $I_{\max}$ ) på polarisationskurvorna användes som mått på den maximala korrosionshastigheten och redovisas för samtliga kombinationer av material och miljöer i figur 5.

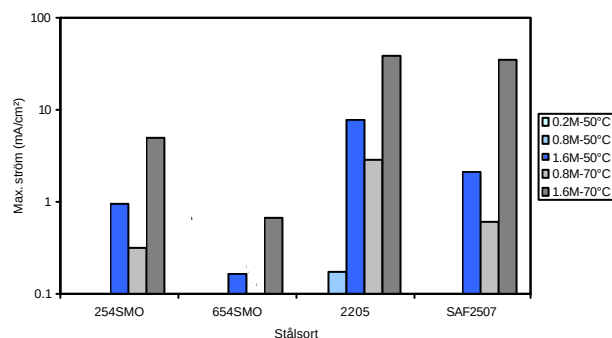
Alla fyra stålsorterna uppvisade en strömtopp som motsvarar aktiv korrosion ( $i_{\max}$ ) i de mest koncentrerade lösningarna. Passivt beteende, d.v.s. med kurvor utan strömtopp och med låga korrosionshastigheter, observerades vid lägre temperaturer/koncentrationer som var beroende av stålsorten. Den relativa rangordning av stålsorterna var densamma i samtliga fall, d.v.s.

(mest resistent) 654SMO > 254SMO > SAF2507 > 2205 (minst resistent)

Rangordningen innebär dock inte att det i samtliga fall var lika stor skillnad mellan alla närliggande stål på skalan.



Figur 4. Polariseringskurvor för 2205 och 654SMO i simulerat kondensat bestående av 1.6M HCl vid 70°C.



Figur 5.  $I_{\max}$  för alla undersökta material-miljö kombinationer. Där värden saknas var materialet passivt.

## ***Tolkning av uppnådda huvudresultat i förhållande till forskningens syfte/mål***

Resultaten av bestämningar av daggpunkter och kemiska sammansättningar hos kondensat som utförts i tre förbränningsanläggningar innebär att ett för projektet åsyftat steg har tagits mot karaktärisering av och ökad kunskap om den starkt korrosiva miljön som råder i våta reningssteg. Analysresultaten visar att den för korrosion huvudsakliga komponenten i kondensaten är saltsyra medan andra påverkande komponenter föreligger i avsevärt mindre omfattning. Kondensatens sammansättning, främst avseende saltsyrans koncentration, är dock starkt beroende av kondensstemperaturen och av det eldade avfallets sammansättning. Följaktligen måste man räkna med att material med olika grad av korrosionshårdighet måste väljas för våta reningssteg i olika förbränningsanläggningar.

Det har i praktiken visat sig att korta episoder med starkt förändrat bränsle t.ex. genom tillförsel av oväntat stor mängd PVC-plast har medfört svåra korrosionsskador på kort tid i våta reningssteg. För det övergripande energimålet, som förutsätter hög drifttillgänglighet, bedöms det därför vara av stor betydelse att man använder material som har en marginal ur korrosionssynpunkt jämfört med det behov av korrosionshårdighet som kan utläsas ur provningsresultat för ”normala” kondensat.

Kartläggningen av korrosionsmiljön har möjliggjort beredning av syntetiska kondensat som är representativa för olika temperaturer. De utförda elektrokemiska korrosionsundersökningarna som utfördes i fem saltsyralösningar med utvalda kombinationer av syrakoncentration och temperatur gav en relativ rangordningen av fyra provade höglegerade rostfria stål. Provningsresultaten förväntas bidra till utveckling och användning av optimala material för krävande miljöer med avseende på sura kondensat och därmed möjliggöra utökade livslängder för anläggningar.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Avfallsstationernas sopansamlingar innebär ett väsentligt hot mot miljön genom att förorena mark och vatten, men det finns också andra problem i form av lukt, skadedjur och risk för bränder orsakande giftiga gaser. Å andra sidan kan avfallet betraktas som en förnyelsebar energikälla om det förbränns i speciella kraftvärmeverk.

Rökgaser från avfall innehåller fler gifter och korrosiva ämnen än gasen från förbränning av kol och olja. Exempel på föroreningar i förbränningsgaser från avfall är HCl, HF, Hg-föreningar och dioxiner. Förbränningsgasen måste följaktligen renas mycket noggrant innan den avges från förbränningsanläggningen och våt rökgasrening är den mest effektiva metoden att åstadkomma detta. Efter att förbränningsgasen blivit tvättad kan den kylas till temperaturer under dess daggpunkt, vilket är ett mycket effektivt sätt att avlägsna HCl, Hg-föreningar och dioxiner. Ytterligare en fördel med detta steg är att kondensationsvärmen kan utnyttjas för att förbättra den termiska effektiviteten hos anläggningen ända upp till 20-30 %. Det är följaktligen ett tvåfaldigt intresse av att använda ett kondensationssteg.

På grund av innehållet i rökgaserna bildas det starkt korrosiva kondensat i våta reningssteg vilket ställer höga krav på konstruktionsmaterialen. Eftersom sammansättningen av förbränningsgasen

skiljer sig avsevärt från den hos fossileldade anläggningar, går det inte att utnyttja erfarenheterna från rökgasrening vid fossileldade anläggningar fullt ut när det gäller val av material med lämplig korrosionshårdighet.

Detta projekt har därför huvudsakligen riktat in sig på att utreda korrosionsförhållandena i anläggningar för avfallsförbränning konstruerade för våt rökgasrening.

## **Syfte och mål**

Projektets huvudmål har varit:

- Att kartlägga korrosiviteten i våta reningssystem för avfallsförbränning och att undersöka korrosionshårdigheten för olika rostfria stål i dessa system. Genom att kvantifiera graden av påverkan hos faktorer som är avgörande för korrosiviteten förväntades dessutom kunskapen inom området dagpunktskorrosion komma att utökas.
- Att bidra till utökat användande av rostfria stål i våta reningssystem som ersättning till andra material. Detta skulle uppnås genom att utnyttja resultaten avseende gränserna för olika rostfria ståls användbarhet erhållna i ovan angivna mål.

Övriga mål ur industriperspektiv har varit att bidra till utveckling av material för krävande miljöer med avseende på sura kondensat och därmed möjliggöra utökade livslängder för anläggningar. Detta skulle uppnås genom fastläggande av korrosionsdata för ett antal högpresterande rostfria stålsorter i för sopförbränningsanläggningar typiska kondensat.

De undersökningar som skulle ligga till grund för målen var:

- Dagpunktsbestämningar med en elektrokemisk sond i rökgaser i förbränningsanläggningar.
- Bestämning av kemisk sammansättning hos kondensat, som framställts genom att rökgas sugits ut ur befintliga anläggningar och fått kondensera vid lägre temperaturer i en inert kylare
- Laboratorieundersökningar genom elektrokemiska korrosionsprovningar av ett antal rostfria stål i simulerade kondensat som framställts med ledning av resultat som erhållits i tidigare momentet.

## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Behovet av alternativa energikällor samt nya regler för deponering gör det troligt att avfall kommer att utnyttjas som bränsle i starkt utökad omfattning. Detsamma gäller den våta reningen och rökgaskondenseringen, vars ökning av verkningsgraden i förbränningsanläggningen gör den till en fördelaktig teknik. De starkt korrosiva miljöer som uppstår i anläggningar för våt rening ställer emellertid höga krav på materialens korrosionshårdighet för att inte drifttillgängligheten skall äventyras. Framtagande av lämpliga och förhållandevis billiga material för förbränningsgaskondenserande miljöer skulle förbättra de ekonomiska förutsättningarna för anläggningarna än mer. I enlighet med projek-

tets syften förväntas resultaten av karakterisering av korrosionsmiljön och provningen av ett antal högvärdiga rostfria stål i karakteristiska kondensat bidra till en optimerad materialanvändning.

Endast ett fåtal avfallsförbränningsverk har idag våt rening inkluderande rökgaskondensering men ett växande antal kan förväntas. För undvikande av oplanerade driftstopp på grund av korrosionsskador måste man använda lämpliga material. Antag att 5 verk investerar i kondenseringsanläggningar, att en typisk anläggning producerar 150 GWh/år och att ett optimalt materialval ökar tillgängligheten i anläggningen med i genomsnitt 3 veckor per år (ca 6 %). Då blir energibesparingen  $5 \times \frac{3}{52} \times 150 \text{ GWh/år} = 43 \text{ GWh/år}$ .



|                                                                                                                                                |                                                                                          |                                                                                                                                                   |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins värmnings-,<br>bearbetnings- och materialpaket<br>1999-2003                                         |                                                                                          | <b>Projekt</b><br>43024 Höghållfasta rostfria stål i förband<br><input checked="" type="checkbox"/> Pågående<br><input type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>1 660 040 SEK                                                                                                                 | Tidplan, förväntade delrapporter<br>Start 2002-05-05, slut 2003-10-31, inga delrapporter |                                                                                                                                                   |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning AB<br>AvestaPolarit AB                                                          |                                                                                          | Avdelning/Institution                                                                                                                             |  |
| Adress<br>Drottning Kristinas väg 48, 114 28 Stockholm                                                                                         |                                                                                          |                                                                                                                                                   |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Tomas Forsman, tomas.forsman@simr.se                                       |                                                                                          |                                                                                                                                                   |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Fatigue properties of projection welds in high strength stainless steel,<br>Jernkontorets forskning, serie TO. |                                                                                          |                                                                                                                                                   |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Utmattningshållfastheten för presssvetsade förband i höghållfast rostfritt stål var likvärdig med den för traditionell motståndspunktsvetsning. Presssvetsning i kombination med en låghållfast tejp ökade utmattningshållfastheten markant.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Resultaten visar att presssvetsning är en svetsmetod med hög integritet som presterar lika bra vid utmattning som motståndspunktsvetsning gör. Jämfört med motståndspunktsvetsning har presssvetsning fördelen att den ena sidan av plåtförbandet förblir nästan opåverkad vilket ger en attraktiv yta.

Presssvetsning i kombination med tejp kan tänkas ersätta den väl använda kombinationsmetoden limpunktsvetsning i detaljer som utsätts för vibration. Ett problem med limpunktsvetsning är att limningen kräver mycket av arbetsmiljön med exempelvis renrum och ventilation. Vid efterföljande svetsning bränns limmet bort i svetsens närhet vilket är just där spänningen kommer att vara som störst vid belastning.

Presssvetsning däremot, kan kombineras med i förväg placerad tejp då håltagning görs vid vårtornas position. Tejpen bränns inte bort vid svetsning och den ger även förbandet samma definierade tjocklek för hela överlappet. Dessutom finns vid presssvetsning möjligheten att svetsa flera punkter samtidigt nära varandra vilket kan förbättra hållfastheten.

De goda resultaten av projektet tyder på att fordonsindustrin kan utnyttja presssvetsning med och utan tejp vid sammanfogning av höghållfast rostfritt stål och därigenom nå förbättrad arbetsmiljö för svetsare, minskad vikt hos konstruktionen och ökad livslängd vid vibrationsbelastning.

# Projektpresentation

## Problemställning

Instabila austenitiska rostfria stål kan processtekniskt (kallsträckning, hårdvalsning, etc) ges mycket hög hållfasthet i kombination med tillfredställande duktilitet (formbarhet) upp till 1200 MPa i sträckgräns. Lastbärande element av så kallade ultrahöghållfasta rostfria stål skulle kunna vara upp till 50% lättare än motsvarande element av mjukglödgat material med 220-280 MPa i sträckgräns. En kritisk egenskap för höghållfasta stål är utmattningshållfastheten och i sammanhanget då speciellt utmattningshållfastheten för punktsvetsade förband. För kolstål gäller att utmattningshållfastheten är mer eller mindre oberoende av den statiska hållfastheten, det vill säga ett ultrahöghållfast stål har inte högre utmattningshållfasthet än ett mjukglödgat stål.

Olika metoder har utvecklats för att försöka förbättra utmattningshållfastheten för punktsvetsförband och den kanske intressantaste är limpunktsvetsning. Denna metod bygger på att punktsvetsning kombineras med limning och utmattningshållfastheten kan fördubblas. Problemet är dock att detta innebär ett extra tillverkningsmoment som kräver hög renlighet och blir kostsamt. Ett enkelt limförband har också mycket högre utmattningshållfasthet än en limpunktsvets. Limpunktsvetsning har därför ett mycket begränsat användningsområde i jämförelse med andra etablerade metoder om kostnad mot prestanda beaktas.

Ett alternativ till limpunktsvetsning kan vara att använda så kallad pressvetsning i kombination med en höghållfast tejp. Pressvetsning gör det möjligt att svetsa flera punkter samtidigt. Dessa punkter kan vara placerade mycket nära varandra och ge en effektivare lastupptagningsförmåga än en punktsvets. Genom att göra pressvetsarna mindre än traditionella punktsvetsar blir svetsmärket på plåten mycket mindre i och med att det blir en mindre värmepåverkan. Om dessa pressvetsar sedan kombineras med en tejp finns det indikationer på att utmattningshållfastheten kan förbättras påtagligt jämfört med en traditionell punktsvets.

Projektet inriktades på att utreda om pressvetsning (motståndssvetsning i överlapp där den ena plåten preparerats med ett antal vårtor för att ge kontakt) och pressvetsning kombinerat med tejp är praktiska svetsprocesser för att förbättra utmattningshållfastheten jämfört med motståndspunktsvetsning av höghållfast rostfritt stål. För att jämföra pressvetsmetoden med traditionell motståndspunktsvetsning tillverkades likadana förband med de två metoderna. För att vidare få en uppfattning om pressvetsningens möjliga fördelar tillverkades även förband med flera närliggande svetsar – något som är omöjligt vid motståndspunktsvetsning på grund av läckströmmar. För att synliggöra inverkan av tejp på utmattningshållfastheten användes en tejp som gav minimalt tillskott till den statiska hållfastheten. Tejp användes i två förband med olika antal svetspunkter.

## Syfte och mål

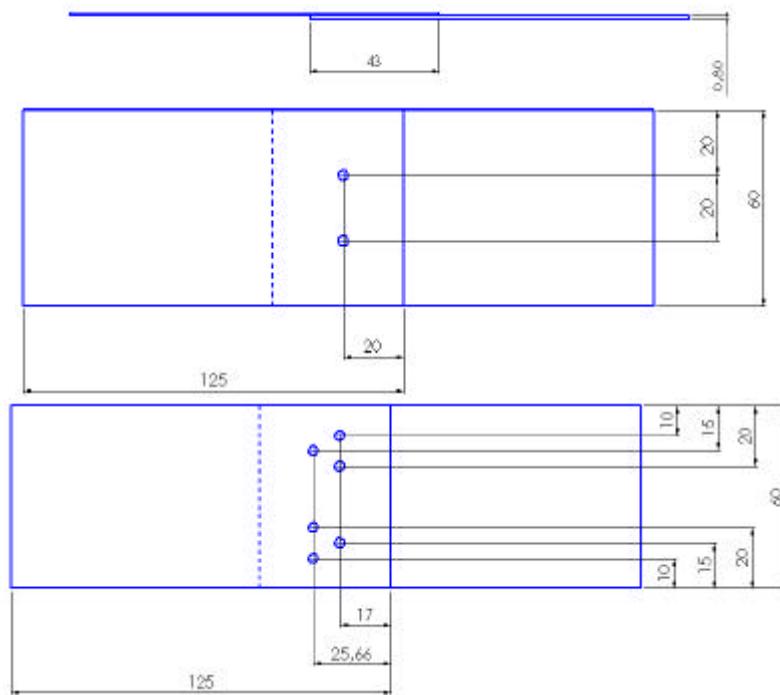
Framförallt i transportsektorn är fokuseringen på att bygga lättviktskonstruktioner mycket tydlig. Detta innebär att stålet som konstruktionsmaterial har fått en ökad konkurrens från framförallt aluminium. För att stålet ska kunna behålla sin position även i lättviktskonstruktioner måste det höghållfasta stålets "akilleshälar" förbättras, då främst utmattningshållfasthet i förband. Detta gäller även för rostfritt stål.

Syftet med projektet var att undersöka om pressvetsning med och utan tejp kan vara ett alternativ till punktsvetsning och limpunktsvetsning för att ge bättre utmattningshållfasthet och mer estetiskt tilltalande svetsar. En högre utmattningshållfasthet för förband skulle kunna möjliggöra ett bättre utnyttjande av höghållfasta stål och en viktninskning av sammanfogade konstruktionselement utsatta för utmattningsbelastning.

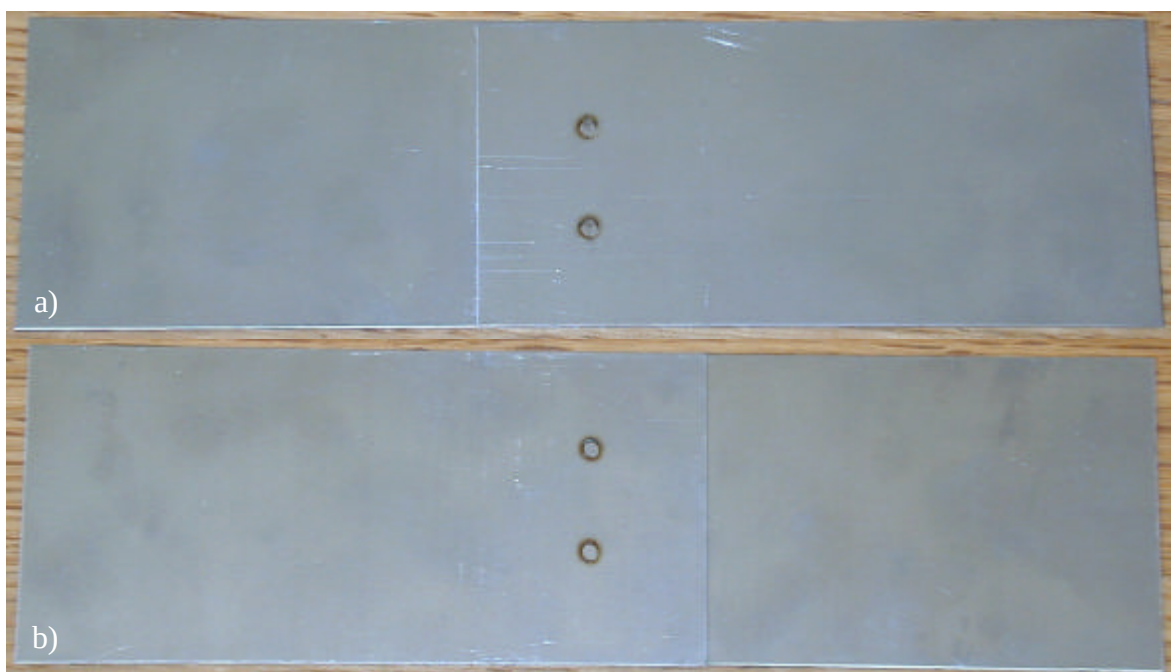
Målet med projektet var att det ska leda till att utmattningsbelastade konstruktioner i rostfritt stål kan ske med höghållfastare plåt med tunnare gods vilket skulle leda till energi- och råvarubesparingar.

## Metod

Efter omfattande processoptimering tillverkade AvestaPolarit 15 kopior av vardera av följande fem olika provstavsvarianter i stålsorten HyTens 1000: '2 punkt', '2 press', '2 press tejp', '6 press' och '6 press tejp'. Provstavarnas mått visas i figur 1 medan de olika varianterna syns i figur 2-6. I de presssvetsade varianterna gjordes vårtorna genom att trycka ett borrstål mot plåten liggande mot en dyna. Det visade sig vara möjligt att presssvetsa tre punkter samtidigt och erhålla tre likadana svetsar.

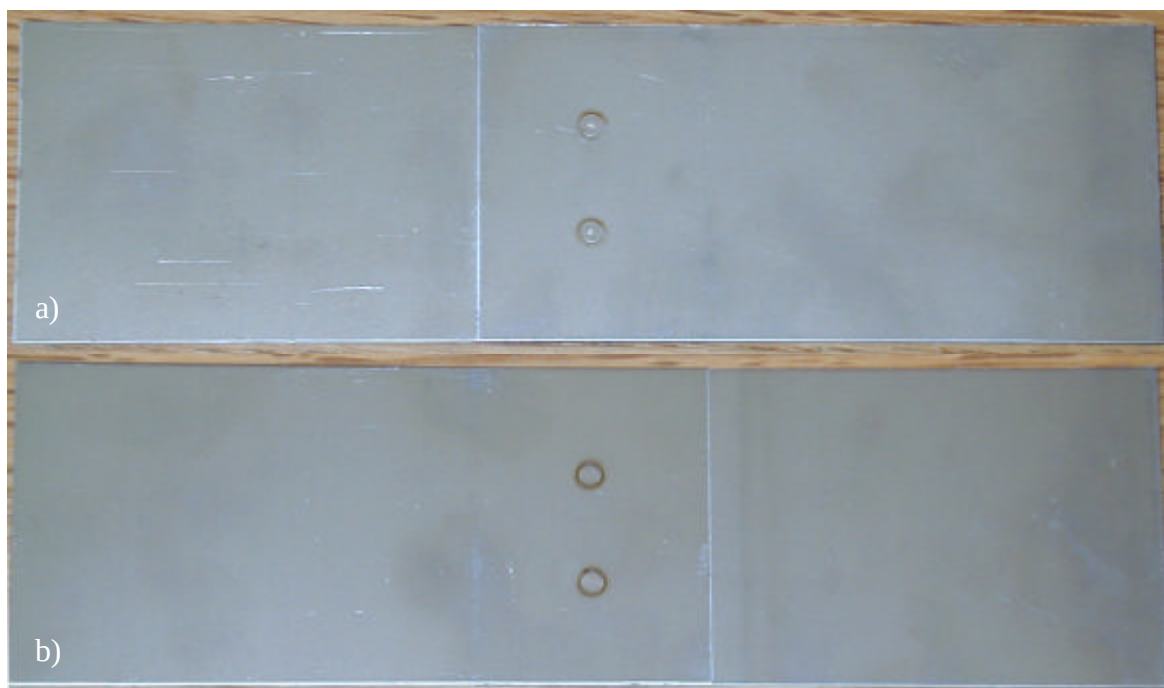


Figur 1. Utformning av provstavar med två respektive sex svetsar.

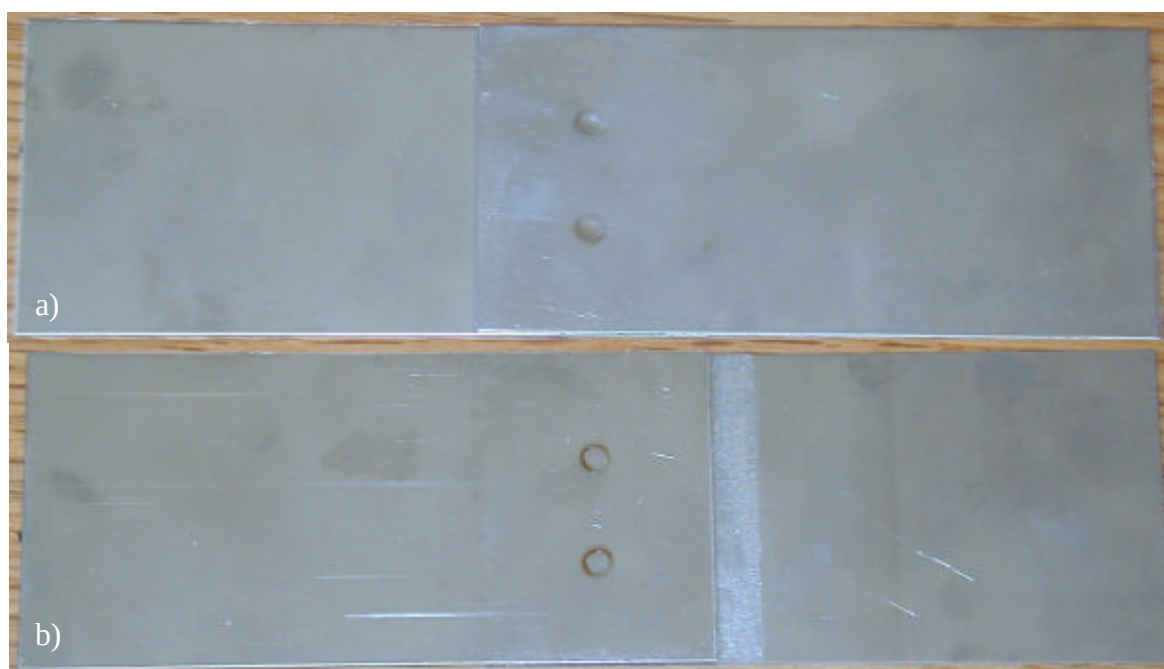


Figur 2. Provstav kallad '2 punkt' visad a) framifrån och b) bakifrån.

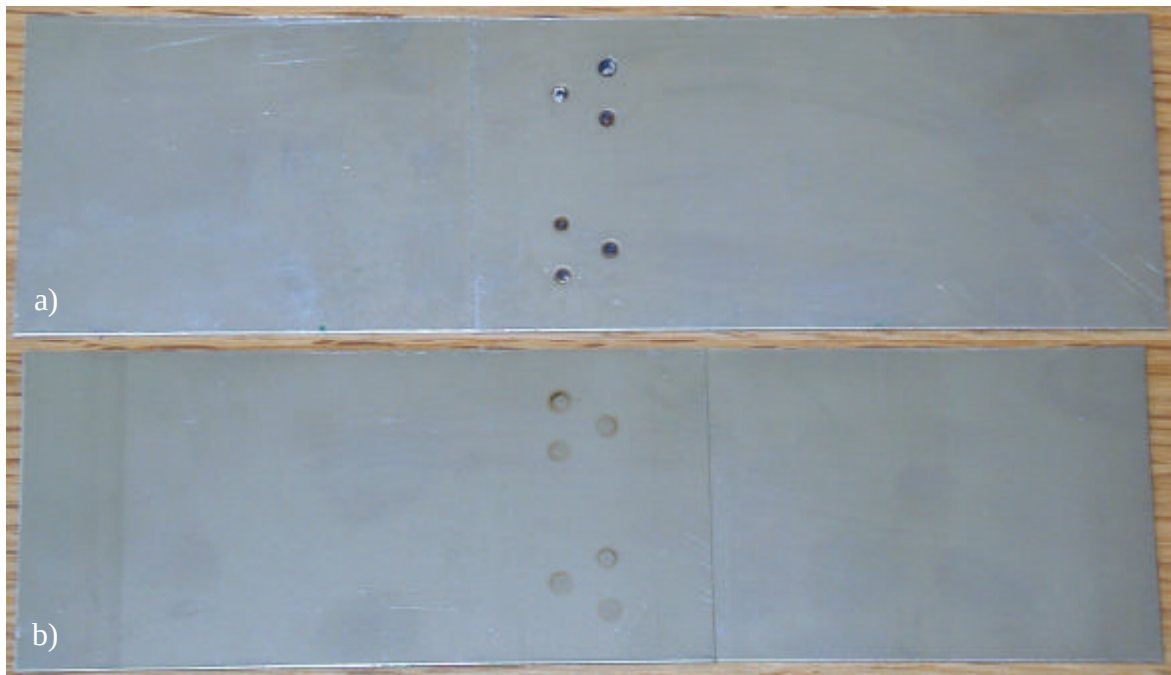




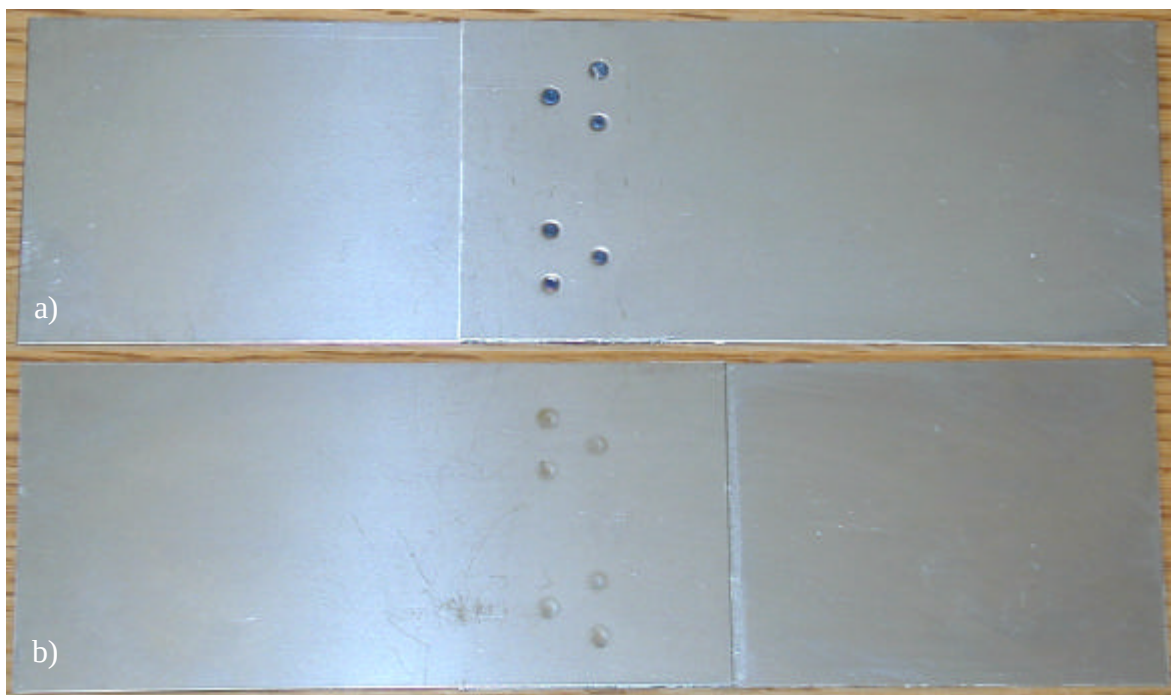
Figur 3. Provstav kallad '2 press' visad a) framifrån och b) bakifrån.



Figur 4. Provstav kallad '2 press tejp' visad a) framifrån och b) bakifrån.



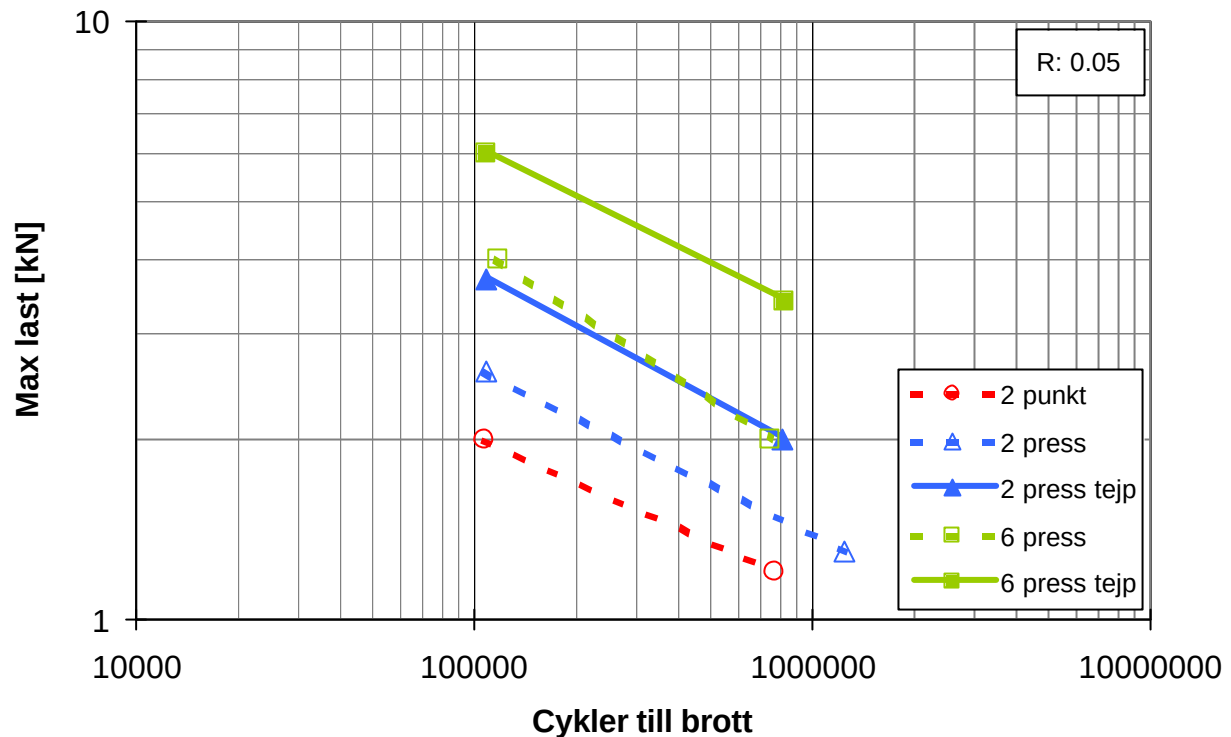
Figur 5. Provstav kallad '6 press' visad a) framifrån och b) bakifrån.



Figur 6. Provstav kallad '6 press tejp' visad a) framifrån och b) bakifrån.

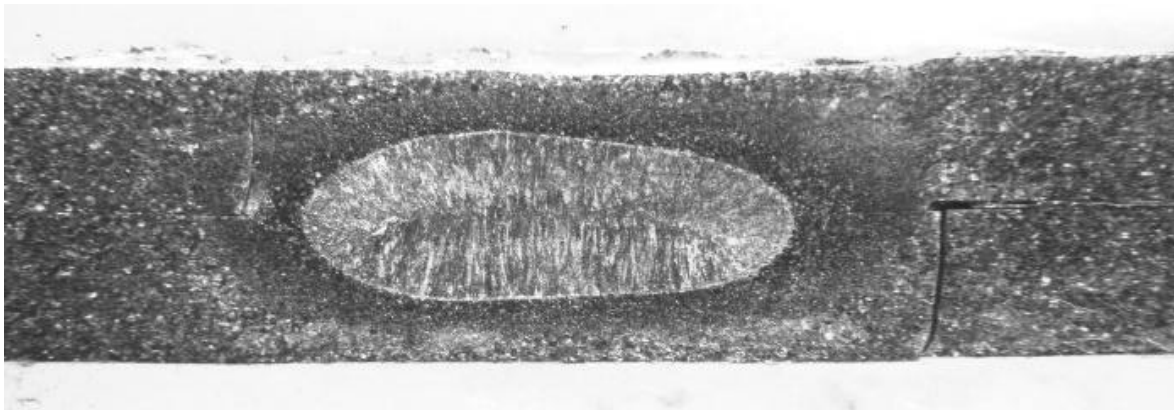
Analys av svetsarna och utmattningsprovning med efterföljande brottanalys utfördes på IM. Presssvetsarna skiljde i utseende från punktsvetsarna enbart vad gäller plåtens yta där presssvetsade prov har en sida som är plastiskt opåverkad. Själva svetslinsen såg likadan ut för de båda svetsmetoderna.

Utmattningsprovningen visade tydligt att de förband som på grund av flera svetspunkter och/eller en tejpad yta var styvare, också erhöll en högre utmattningshållfasthet. Utmattningsresultaten för de fem varianterna är samlade i figur 7.



Figur 7. Last som funktion av livslängd för de fem olika provstavsvarianterna.

Det förefaller från figur 7 som om '2 press' presterade bättre än '2 punkt' men denna skillnad kan förklaras helt och hållet av att '2 press' hade något större svetsdiameter. Det framgår tydligt att tejpens gav en ökning av utmattningshållfastheten för presssvetsade förband med 2 såväl som med 6 svetsar.



Figur 8. Tvärsnitt av svets från '2 press' efter utmattningsprovning.

Figur 8 visar tvärsnittet av en utmattningsprovad svets från ett förband av typen '2 press'. Utmattningsprickor har startat på båda sidor om svetslinsen i gränsen mellan de två plåtarna i det värmepåverkade området som omger svetslinsen. Spricktillväxten har sedan skett vinkelrätt mot belastningsriktningen och utåt mot plåtarnas yta. Sprickförloppet är likadant som för ett motståndssvetsat överlappsförband.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Projektet har visat att presssvetsning i kombination med tejp är en utmärkt sammanfogningsmetod som ger förbättrade utmattningssegenslager för höghållfast rostfri stålplåt. Detta kommer att ge en drivkraft att använda dessa stålsorter av allt högre hållfasthet för att spara vikt i fordonskonstruktioner. Användning av presssvetsning istället för punktsvetsning skulle medföra kraftigt minskad exponering för elektromagnetiska fält för svetsoperatörerna. Ingen skillnad vad gäller återvinning anses föreligga mellan punktsvetsade och presssvetsade förband.

Det totala materialbehovet genom utnyttjande av högpresterande material vid uppförande och användning av utrustningar i stålkonstruktioner (kolstål och rostfritt stål) beräknas idag vara ca 150 000 ton per år. Om man antar att det för produktion av ett ton stål går åt 4058 kWh så gäller följande:

Totalt energibehov för stål i konstruktioner:

$$150\,000\text{ ton} \times 4058\text{ kWh/ton} = 608,7\text{ GWh/år}$$

Energibesparingen ligger huvudsakligen i en halverad produktion av stål för en given lastbärande förmåga. Totalbesparingen är beroende av den volym höghållfast stål som kommer att användas. Den långsiktiga trenden både för kolstål och rostfritt stål är att de höghållfasta stålen ökar kraftigt. Exempelvis är volymökningen för de höghållfasta duplexa rostfria stålen ca 35% per år jämfört med 4% per år för standardstål. Med en blandning av skrotbaserad och malmbaserad ståltillverkning på 4300 kWh/ton och under förutsättning att 10000 ton/år mjukglödgat material ersätts med 5000 ton/år höghållfast för förband blir energibesparingen:

$$5000\text{ ton} \times 4300\text{ kWh/ton} = 21,5\text{ GWh/år}$$

En estetisk aspekt är att punktsvetsning ger upphov till fula märken på plåten om ytan inte ytbehandlas. Det är mest fördelaktigt att en rostfri plåt inte ytbehandlas eftersom det inte behövs ur korrosionssynpunkt och en ytbehandling ökar också konstruktionens vikt och därmed ökar även energiförbrukningen för tillämpningar inom transportsektorn.



|                                                                                                                          |                                                             |                                                                                                                                                  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins Värminns-,<br>Bearbetnings-, och Materialpaket<br>1999-2003                   |                                                             | <b>Projekt</b><br>43025 Duplexa rostfria stål i konstruktioner<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>3 189 600 SEK                                                                                           | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-09-15 – 2003-10-31 |                                                                                                                                                  |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Institutet för Metallforskning AB<br>AB Sandvik Materials Technology<br>AvestaPolarit AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                            |  |
| Adress<br>Drottning Kristinas väg 48, 114 28 Stockholm                                                                   |                                                             |                                                                                                                                                  |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Sten Wessman, sten.wessman@simr.se                   |                                                             |                                                                                                                                                  |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Duplexa rostfria stål i konstruktioner, Jernkontorets forskning, serie TO.               |                                                             |                                                                                                                                                  |  |

## Sammanfattning

Tidigare utnyttjades rostfria stål huvudsakligen i egenskap av korrosionsskydd och inte primärt som lastbärare i konstruktioner. Detta håller dock på att förändras tack vare insikten om fördelarna med en kombination av högt korrosionsmotstånd och högt förhållande hållfasthet/vikt. Ett antal applikationer har presenterats genom åren där de duplexa stålen har varit oerhört framgångsrika. Emellertid krävs för att få ett större genomslag för dessa material att ett bättre underlag för konstruktörer tas fram. Två olika aspekter har belysts i det här arbetet, dels en utvärdering av maximal användningstemperatur dels hur avspänningsglödning av konstruktioner i duplexa rostfria sorter påverkar de mekaniska egenskaperna.

De duplexa rostfria stålen 2205 (22Cr-5Ni-3Mo-0.17N), SAF 2507 (25Cr-7Ni-4Mo-0.27N) och SAF 2906 (29Cr-6Ni-2Mo-0.4N) undersöktes med avseende på hur de påverkas av värmebehandlingar och förhöjda drifttemperaturer som kan förekomma vid användande av dem som konstruktionsstål. Det innefattar försök med avspänningsglödningar i temperaturområdet 500-650°C och värmebehandlingar under lång tid vid 225-325°C för att utröna en maximal användningstemperatur. Inverkan av belastning till sträckgränsen och mindre plastiska deformationer upp till 10% och dess inverkan på egenskaperna efter avspänningsglödning har undersökts. De mekaniska egenskaperna undersöktes med slagseghetsprovning, CTOD- och CPT-provning och mikrostrukturen undersöktes med LOM och SEM.

Resultaten från projektet bidrar konkret till underlag för design av konstruktioner med duplexa stål. Energivinsten förväntas ske genom en minskning av det totala materialbehovet genom utnyttjande av högpresterande material vid uppförande och användning av utrustningar i rostfria konstruktioner.

## Uppnådda huvudresultat

### Utvärdering av maximal användningstemperatur

Rörmaterial av SAF 2507 Ø260mm t=13.5mm och SAF 2906 Ø114.3mm t=13.5mm användes i undersökningen. Även rörgods som TIG-svetsats med tillsatsmaterial undersöktes. Proverna värmebehandlades vid 225, 250, 275, 300 och 325°C från 1000 upp till 6000h. Slagseghetsprovning genomfördes på proverna vid rumstemperatur och -46°C. En del av resultaten presenteras nedan i Fig. 1 och 2.

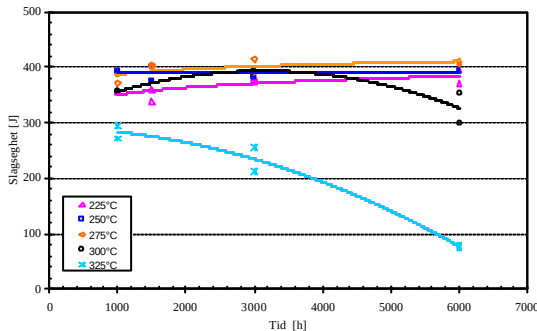


Fig. 1a. Slagseghetsprovning av SAF 2507 vid rumstemperatur.

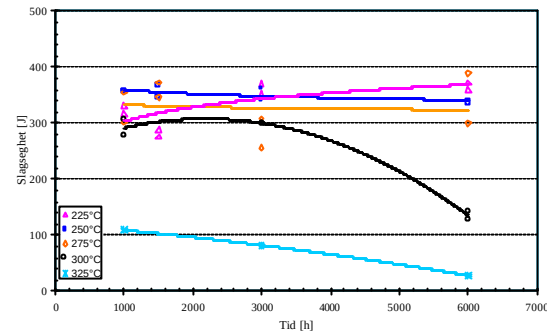


Fig. 1b. Slagseghetsprovning av SAF 2507 vid -46°C.

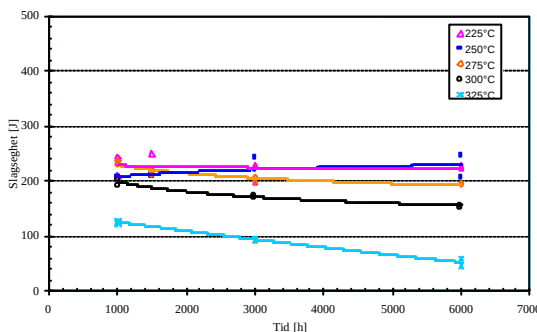


Fig. 2a. Slagseghetsprovning av SAF 2906 vid rumstemperatur.

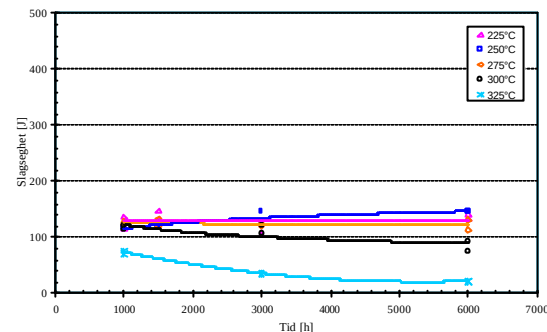


Fig. 2b. Slagseghetsprovning av SAF 2906 vid -46°C.

På SAF 2507 och SAF 2906 grundmaterial och svetsgods genomfördes brottseghetsprovning enligt CTOD-metoden. Dels på material leveranstillstånd och även på material värmebehandlat 20 minuter vid 1060°C och vattensläckt.

En fortsatt utvärdering vid längre tider kommer dock att vara nödvändig för förbättrad förståelse.

### Avspänningsglödning

Prover av 2205 deformerade 0, 2, 5 och 10% samt värmebehandlade 500, 550, 600 och 650°C upp till 30h och undersöktes med avseende på mikrostruktur, slagseghet och punktkorrosionsegenskaper. Exempel på hur mikrostrukturen ser ut visas i Fig. 3 och 4. Som figurerna visar ger längre tider och högre temperaturer en större mängd av observerbara utskiljningar i ferriten som är matrixfasen. Det är dock svårt att kvantifiera resultaten och bedöma egenskaperna enbart utgående från bilder på mikrostrukturen. En fortsatt undersökning gjordes därför med slagseghetsprovning och CPT-provning (Critical Pitting Temperature).



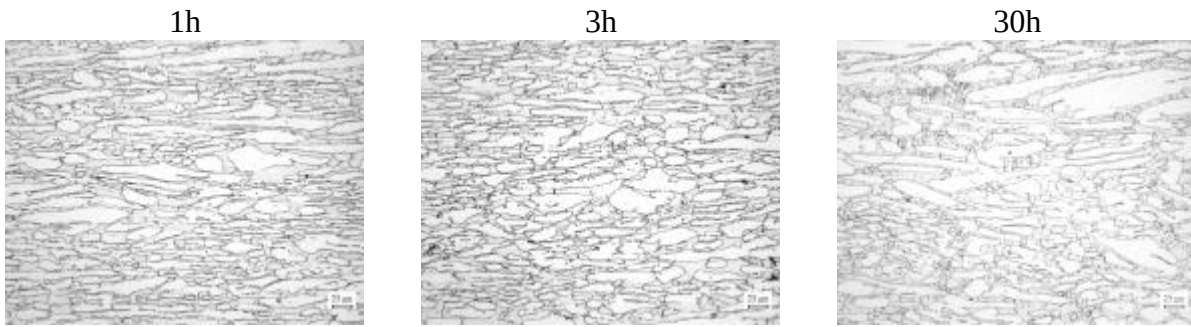


Fig. 3. 650°C och ingen deformation

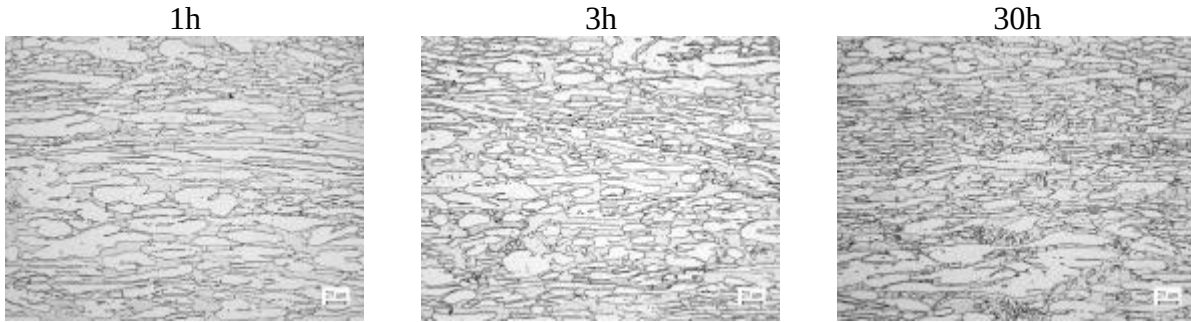


Fig. 4. 650°C och 10% deformation

Resultaten från slagseghetsprovningen redovisas i Fig. 5 där man har uppskattat vid vilken värmebehandlingstid som slagsegheten har sjunkit till 100J. Slagseghetsprovningen genomfördes vid rumstemperatur.

Resultaten från slagseghetsprovningen bekräftar vad man uppskatta i mikrostrukturbilderna. Högre temperaturer, längre tider och kraftigare deformationer ger fler och grövre utskiljningar. Minskningen i slagseghet med ökad deformation kan utläsas i Fig. 5a. Vid 550°C sjunker tiden provet kan hållas utan att underskrida 100J från cirka 11h till 8h, vid 600°C från cirka 2h till 0.8h och vid 650°C från knappt 1.1h till 0.6h. Som Fig. 5b visar kan vid 5% deformation provet hållas 10h vid 550°C utan att slagsegheten understiger 100J. Höjs temperaturen till 600°C sjunker tiden till 2h och vid 650°C endast en halvtimma. Vid 500°C kan provet hållas minst 30h utan att 100J slagseghet underskrids.

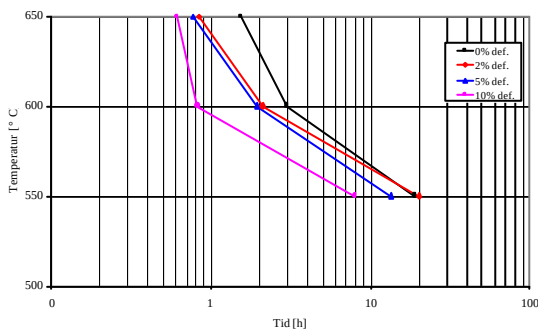


Fig. 5a. Värmebehandlingstemperatur [°C] mot tid [h]. Kurvorna anger när slagsegheten når 100J.

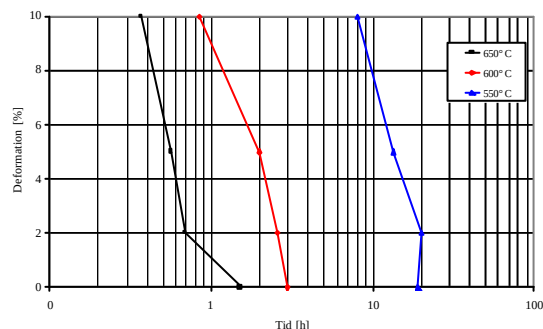


Fig. 5a. Deformation [%] mot tid [h]. Kurvorna anger när slagsegheten når 100J.

## **Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål**

Resultaten från projektet bidrar konkret till underlag för design av konstruktioner med duplexa stål. Data som har kommit fram inom projektet ger direkt svar på hur man kan använda materialet i en viss konstruktion och vilka värden på seghet som kan förväntas efter en viss tid och vid en viss termisk påverkan.

### **Utvärdering av maximal användningstemperatur**

- ❑ Slagseghets- och CTOD-data har tagits fram för direkt användning av konstruktören.
- ❑ Maximal användningstemperatur har utvärderats för både grundmaterial och svetsgods.

### **Avspänningsglödning**

- ❑ Data har tagits fram som visar hur materialet beter sig vid avspänningsglödning
- ❑ Ett processfönster har påvisats som ger möjlighet till en effektivare avspänningsglödning utan att äventyra materialets egenskaper.

## **Projektpresentation**

För den experimentella undersökningen valdes ett antal duplexa och superduplexa rostfria stålsorter, se Tabell 1. De har en struktur bestående av lika delar ferrit och austenit, vilket ger goda korrosionsegenskaper och en hög mekanisk hållfasthet. Tillsatsmaterialen som använts är de som normalt rekommenderas för svetsning och har en förhöjd nickelhalt för att uppnå en rimlig andel austenit i svetsgodset.

*Tabell 1. Nominell sammansättning (vikts-%)*

| Material | Krom | Nickel | Molybden | Kväve |
|----------|------|--------|----------|-------|
| 2205     | 22   | 5.5    | 3        | 0.17  |
| SAF 2507 | 25   | 7      | 4        | 0.27  |
| SAF 2906 | 29   | 6      | 2        | 0.4   |

### **Utvärdering av maximal användningstemperatur**

Rörmaterial av SAF 2507 och SAF 2906 användes i undersökningen. Dimensionerna var för SAF 2507 Ø260mm godstjocklek 13.5mm och SAF 2906 Ø114.3mm godstjocklek 13.5mm. Även material som TIG-svetsats med tillsatsmaterial undersöktes.

Värmebehandlingar genomfördes med temperaturer mellan 225-325°C och med tider från 1000 upp till 6000h. Längre tider upp till 24000h pågår men ligger utanför den här rapportens tidsramar.

Slagseghets- och brottseghetsprovning genomfördes för att utröna de mekaniska egenskaperna.

### **Avspänningsglödning**

2205 i plåtform användes för att bestämma effekten av kortare värmebehandlingar på egenskaperna hos materialet efter värmebehandlingar 500-650°C under tider 1-30 timmar. Effekten av mindre plastiska deformationer 2, 5, och 10% och effekten av att lasta materialet till sträckgränsen undersöktes även. Syftet är att finna lämpliga tider och temperaturer för avspänningsglödningar och även att se vad effekten blir av oavsiktliga termiska cykler.

Slagseghets- och korrosionsprovning genomfördes för att utröna materialets egenskaper.



## **Problemställning**

Tidigare utnyttjades rostfria stål huvudsakligen som korrosionsskydd och ej som lastbärare. Detta håller snabbt på att förändras. Superduplexa stål har utvecklats för att ge en kombination av högt korrosionsmotstånd och samtidigt uppvisa ett högt hållfasthet/vikt förhållande. Innebörden av detta är att materialen i högre grad än förr kommer att utnyttjas som konstruktionsmaterial och behovet av underlag för moderna dimensioneringsmetoder ökar. Ett antal applikationer har presenterats genom åren där de duplexa stålen har varit oerhört framgångsrika. Emellertid krävs för att få ett större genomslag för dessa material att designunderlag för konstruktion tas fram. Minst två olika aspekter bör belysas, dels materialens tendens till spinodlat sönderfall och 475°C-försprödning dels genomförandet av avspänningsglödning av konstruktioner i duplexa rostfria sorter.

Vid förhöjd temperatur, i intervallet från 250°C och upp till cirka 475°C, har ferriten i duplexa stål en tendens till att sönderfalla och bilda dels en kromrik ferrit och dels en järnrik ferrit. Sönderfallet kan ske utan kärnbildning om kombinationen av sammansättning och temperatur ligger inom spinodalen i den blandningslucka som uppträder i systemet järn och krom. Om förhållandet mellan sammansättning och temperatur ligger utanför spinodalen men inom blandningsluckan så sker normal kärnbildning och tillväxt. Detta leder till utskiljning av kromrika partiklar, s.k. alfaprim partiklar och ger samma resultat som efter långvarig åldring av ett material inom spinodalen. Försprödningsfenomenet kan studeras dels med hårdhetsprovning och dels med slagseghetsprovning och kan med fördel utnyttjas för mekanismstudier och att finna maximal användningstemperatur för stålen. Dessa metoder ger dock inget underlag för dimensionering, varför projektet även inriktas mot framtagning av brottseghetsdata.

Ett högt motstånd mot spänningskorrosion är en annan framträdande egenskap hos duplexa rostfria stål. Austenitiska sorter kan drabbas av kloridinducerad spänningskorrosion. Ett inte alltför ovanligt förekommande fall är vattenkondensat i ångsystem system eller i konstruktioner i marin atmosfär. Ofta kan problemet lösas i sin helhet genom att ersätta materialen med duplexa sorter. Duplexa sorter är emellertid inte immuna mot kloridinducerad spänningskorrosion. Således är det önskvärt att inte bygga in egenspanningar i konstruktioner. Egenspanningar är dessutom ogynnsamt om konstruktionen utsätts för utmattningspåkänningar. Det traditionella sättet att eliminera egenspanningar är avspänningsglödning. Avspänningsglödning är mer komplicerat för duplexa stål än för austenitiska stål av två skäl. Dels har de en låg varmhållfasthet vid 1000°C och högre temperaturer vilket leder till att de tappar sin form och dels har de duplexa stålen har en snabb kinetik för bildning av försprödande fasen och spinodalt sönderfall, se ovan. Processfönstret blir därför begränsat och ju högre legerat ett duplext stål är desto kortare tider kan utnyttjas för avspänningsglödningen. Det område som idag utnyttjas för avspänningsglödning ligger kring 600°C, dvs. över TTT nosen för 475°C-försprödningen, men under nosen för utskiljning av intermetalliska fasen.

## **Syfte och mål**

Projektet syftar till att förbättra designunderlaget vid konstruktion med högpresterande duplexa rostfria stålsorter. Vidare undersöks möjligheterna till avspänningsglödning för höglegerade rostfria stålsorter och ett processfönster i tid och temperatur med rimlig förlust i seghet föreslås. En övre temperaturgräns för användning av duplexa stål föreslås.

Projektet målsättning ur industriperspektiv är att bidra till användandet av material för krävande tillämpningar och därmed möjliggöra höjda prestanda för konstruktioner i rostfritt stål. Detta uppnås genom att tillställa verkstadsindustrin och andra aktörer underlag som stödjer konstruktion och design.

AvestaPolarit AB:

Genom projektet kommer avspänningsglödning vid lägre temperaturer att utredas. Genom detta kommer bättre rekommendationer angående avspänningsglödning för duplexa stål att kunna ges och användningen av dessa stål också att öka till applikationer där avspänning krävs.

Sandvik Materials Technology:

Superduplexa rostfria stål har utvecklats för att möta kraven för material med högt korrosionsmotstånd och hög kvot hållfasthet/vikt. Emellertid har brottseghet betydelse för moderna dimensioneringsmetoder. Projektets syften är att öka kunskaperna om materialens brottseghet och maximal användningstemperatur, att komplettera databaser för materialen för att stöda applikationer och eventuellt utveckling av nya legeringar med förbättrad seghet och höjd användningstemperatur.

Övrig målgrupp:

Kemisk industri, petroleum, offshore, papper o massa. Dessutom små och medelstora företag som konstruerar i rostfritt stål där kunskaperna kring användandet av dessa sorter innebär en konkurrensfördel eftersom produktens korrosionsmotstånd och prestanda i förhållande till vikt kan förbättras.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

En positiv effekt kan på sikt förväntas eftersom material med förbättrade korrosionsprestanda bör leda till ökad livslängd på konstruktioner i aggressiva miljöer. Från 1999 när projektet påbörjade till 2003 har användningen av duplexa rostfria stål ökat med cirka 50%.

Energivinsten förväntas ske genom en minskning av det totala materialbehovet genom utnyttjande av högpresterande material vid uppförande och användning av utrustningar i rostfria konstruktioner. Exempelvis så ger en minskning av 1500 ton producerat stål en besparing enligt:

$1500\text{ton} \times 4058\text{kWh/ton} = 6,0\text{ GWh/år}$

Det finns även positiva effekter ur miljösynpunkt:

Om exempelvis 100 000 ton 2205 ersätter austenitiska 316-stål reduceras CO<sub>2</sub> emissionen i samband med tillverkning med 0.2Mton.



|                                                                                                                                                                                                    |                                                              |                                                                                                                                                              |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                                                                             |                                                              | <b>Projekt</b><br>44095<br>Oförstörande bedömning av materialegenskaper<br><input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>2 390 355 SEK                                                                                                                                                                     | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-11-08 -- 2003-10-31 |                                                                                                                                                              |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS, SSAB Tunnpå, Wirsbo<br>Stålrör, Scania, SKF, Erasteel<br>Kloster, Outokumpu Copper,<br>CSM Materialteknik, Sandvik<br>Materials Technology, Ovako<br>Steel, |                                                              | Avdelning/Institution                                                                                                                                        |  |
| Adress<br>Box 812, 97125 Luleå                                                                                                                                                                     |                                                              |                                                                                                                                                              |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Jan Levén, jan.leven@mefos.se                                                                                                  |                                                              |                                                                                                                                                              |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Oförstörande provning av materialegenskaper, Jernkontorets forskning, serie TO                                                                                     |                                                              |                                                                                                                                                              |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

En marknadsundersökning har gjorts för att finna instrument lämpliga för oförstörande mätning av materialegenskaper. Sökningen visade att utveckling pågår inom detta teknikområde och att ett antal mer eller mindre färdigutvecklade instrument finns.

Fyra företag har tagit fram materialprover med väldokumenterade materialegenskaper. Proverna var tagna från fyra olika typer av tillverkning och de egenskaper som skulle mätas var:

- Avkolningsdjup på rör av mjukglödgat kullagerstål
- Hållfastheten (R<sub>m</sub>) på varmvalsade band
- Hållfastheten (R<sub>p02</sub>) på kallvalsade band
- Härd djup på cylindriska sätthärdade provstavar

Tre virvelströmsinstrument och ett ultraljudsinstrument har utvärderats med hjälp av de framtagna materialproverna.

Utvärderingarna visar att instrumenten i flera fall kan mäta den efterfrågade egenskapen. För något fall uppnås den noggrannhet som krävs medan noggrannheten för andra fall inte är tillräcklig.

Deltagande företag uppger att om ett tillförlitligt instrument finns att tillgå så kan installationen av ett sådant leda till signifikanta energibesparingar.

### ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Projektets mål var att finna ett fungerande instrument för oförstörande mätning av inre materialegenskaper hos en produkt. Projektresultaten visar att något sådant instrument inte ännu finns allmänt tillgängligt men att utveckling pågår och att prestanda på de instrument som finns tillgängliga närmar sig vad som krävs för industriell användning.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Metallografisk undersökning av material för att bestämma dess egenskaper kräver viss tid för uttag av provmaterial och beredning av detta samt är dessutom tidskrävande i sig. Detta innebär att denna form av undersökning blir relativt dyrbar samt att möjligheterna till styrning av pågående process är begränsad. Utförda litteraturundersökningar visar på att oförstörande metoder i allt större omfattning har visat sig experimentellt användbara för tillförlitlig bedömning av olika materialegenskaper.

### ***Syfte och mål***

Genom mätning av en produkts egenskaper under produktion fås en säkrare och snabbare kontroll av tillverkningsprocessen så att kassationer och returerna kan undvikas. Detta innebär högre utbyten och mindre recirkulation av material vilket sparar energi.

Förutom de energivinster som görs genom att tillverkning av sekunda eller osäljbart material minimeras leder detta även till att man får ett nytt verktyg för optimerad styrning av tillverkningsprocessen vilket ger utbytesvinster samt säkrare och högre kvalitet på levererade produkter.

### ***Val av mätmetod***

Projektarbetet ledde till kontakter med ett tiotal forskningsinstitut och företag. Inget företag hade en färdig produkt som man kunde garantera att den fungerade för den sökta tillämpningen. Samtliga metoder bygger på kalibrering mot provbitar med kända egenskaper.

Kommittén beslöt att låna eller hyra några av de virvelströmsinstrument som finns på marknaden och i första hand prova dem i lab-miljö på provbitar som tagits fram för detta ändamål. Dessa instrument bygger på att man med växelström genom en spole inducerar virvelströmmar i det aktuella provmaterialet. Virvelströmmarna i sin tur inducerar ett magnetfält som instrumentet kan avläsa genom en mätspole. Provmaterialets elektromagnetiska egenskaper påverkar virvelströmmarna och bestämmer fasvridning och amplitud hos det magnetfält som virvelströmmarna ger upphov till. Fasvridning och amplitudförändring ger utslag i signalen från mätspolen och redovisas av instrumenten som koordinater i ett impedansplan. Varje prov erhåller en x- och en y-koordinat.

Mot slutet av projektet blev IMs ultraljudsutrustning (LUS) tillgänglig och kommittén beslöt att även låta göra laboratorieprov med detta instrument. Proven vid IM avser mätning av

frekvensinnehållet för en ultraljudspuls som skickas genom provmaterialet. Ultraljudet induceras genom att en kraftig laserpuls skjuts av mot materialet. Ljudpulsen avläses på ett annat ställe på provmaterialet också det med laserteknik. Även ultraljudsutbredningen i materialet har visat sig ha samband med materialets egenskaper vilket utnyttjas med denna mätmetod.

## Provmaterial

Fyra företag har tagit fram materialprover med väldokumenterade materialegenskaper. Proverna var tagna från fyra olika typer av tillverkning och de egenskaper som skulle mätas var:

- Avkolningsdjup på rör av mjukglödgat kullagerstål
- Hållfastheten ( $R_m$ ) på varmvalsade band
- Hållfastheten ( $R_{p0.2}$ ) på kallvalsade band
- Härddjup på cylindriska sätthärdade provstavar

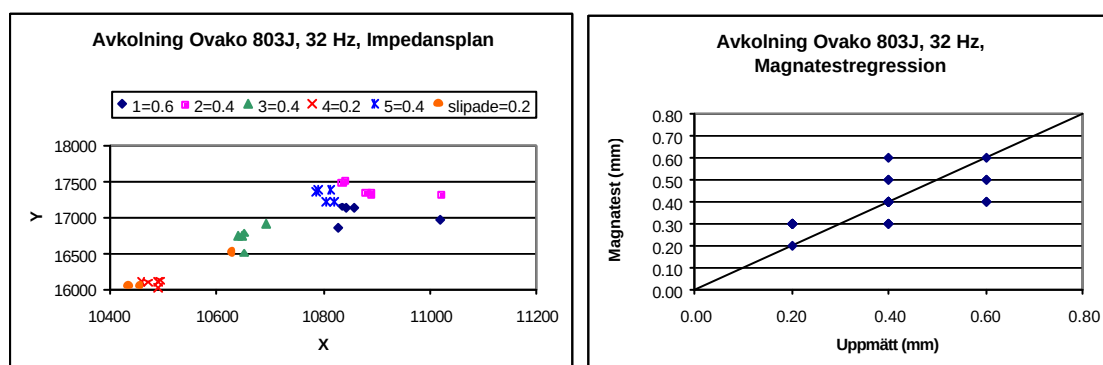
## Provning

Provningen genomfördes enligt följande:

- MEFOS utförde provning med Dr Försters Magnatest- instrument och med Rohmanns Elotest-instrument.
- CSM Materialteknik utförde provning med K.J.Laws Verimet-instrument.
- IM utförde prov med sitt LUS- instrument.
- Scania tog i egen regi kontakt med instrumenttillverkare och genomförde provning på eget provmaterial.

## Resultat

Figur 1 visar resultat från försök att mäta avkolningsdjup på varmvalsade rör av kullagerstål med ett virvelströmsinstrument.



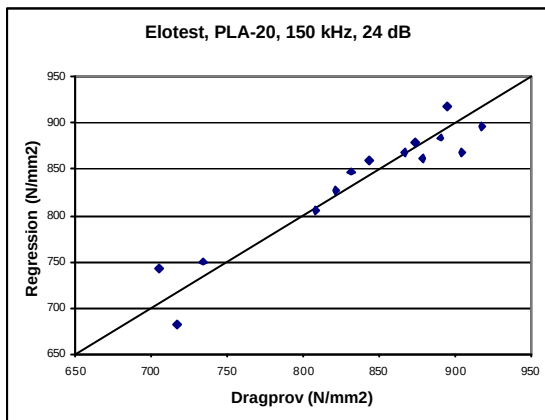
Figur 1. Virvelströmsmätning på rör av kullagerstål

Det vänstra diagrammet visar hur signalen från respektive rörprov placerar sig i impedansplanet. Som framgår är varje kategori av prover (punkter med samma färg och form) väl samlade vilket visar att signalvariationen för rörprover av samma kategori är liten.

Genom regression gjordes ett försök att utifrån placeringen i impedansplanet beräkna avkolningsdjupet. Det högra diagrammet visar sambandet mellan regressionsfunktionens beräknade avkolningsdjup och verkligt uppmätt avkolningsdjup. Spridningen från den ideala linjen är för stor för att mätmetoden ska vara användbar.

Rörprovernas grova yta gjorde att mätning med ultraljus inte var möjlig.

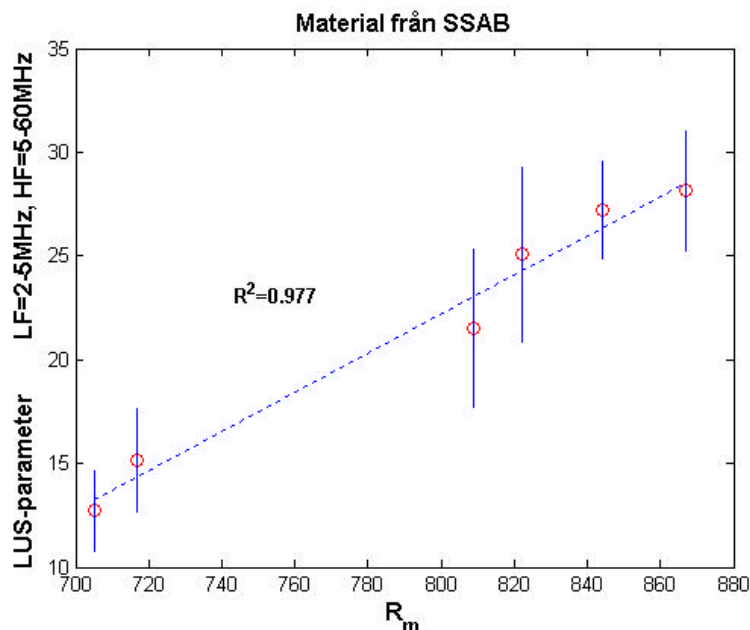
Figur 2 visar resultat av mätning av brottspänning ( $R_m$ ) på varmvalsade band med ett virvelströmsinstrument.



Figur 2. Virvelströmsmätning av brottspänning på varmvalsade band.

På samma sätt som för rörproverna har en regressionsfunktion räknats fram vilken predikterar bandprovets brottspänning som funktion av provets uppmätta placering i impedansplanet enligt virvelströmsinstrumentet. Verklig brottspänning hade för varje prov uppmätts med dragprovning. Diagrammet visar jämförelsen mellan regressionsfunktionens beräknade värde och dragprovsvärdet. Noggrannheten med 95 % konfidens är  $\pm 43 \text{ N/mm}^2$  vilket inte är tillräckligt för praktisk användning. Till detta krävs en noggrannhet ned mot  $\pm 10 \text{ N/mm}^2$ .

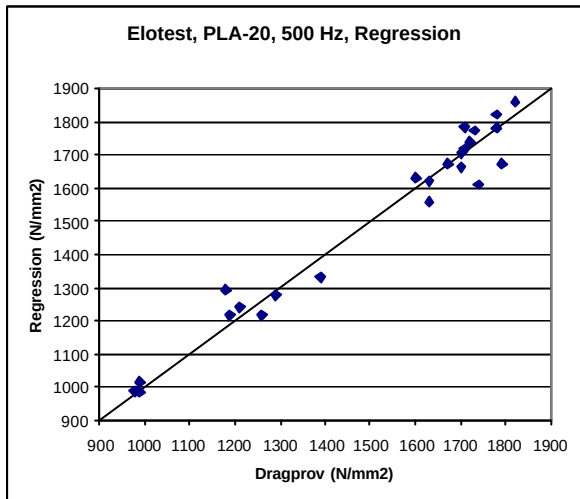
IM redovisar resultat från ultraljudsprovning för en delmängd av de varmvalsade bandproverna. De prover som var bäst dokumenterade valdes ut. Den valda analysmetoden var att bilda en kvot mellan energiinnehållet för höga respektive låga frekvenser hos laserpulsens sedan den passerat genom materialet. Denna kvot ansågs vara beroende av materialets kornstorlek vilken i sin tur är en viktig faktor bakom hållfastheten. Figur 3 visar kvotparametern  $Q$  som funktion av hållfastheten hos de analyserade proverna.



Figur 3. Ultraljudsprovning av brottspänning på varmvalsade band.

Varje LUS-mätning visar medelvärde på 50 uppmätta spektra tillsammans med 95% konfidensintervall på detta resultat. Sambandet mellan  $R_m$  och LUS-parameter är starkt med en korrelationsfaktor på 0.977. Frekvensintervallet som användes här var 2-5MHz samt 5-60MHz.

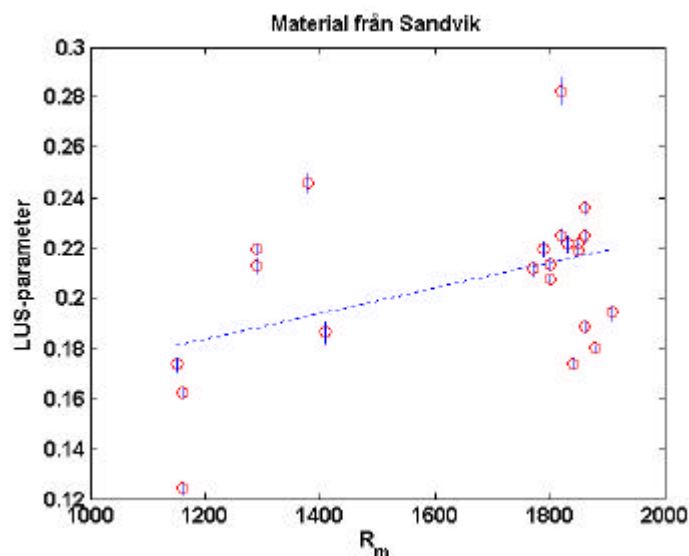
De kallvalsade provbitarna hade en stor spridning i hållfasthet. Den term som användes vid utvärderingen var sträckgräns ( $R_{p02}$ ) som varierade mellan 990-1820 N/mm<sup>2</sup>. Figur 4 visar ett av virvelströmsinstrumentens regressionsvärden som funktion av dragprovsvärden på samma sätt som i Figur 2.



Figur 4. Virvelströmsmätning av sträckgräns på kallvalsade band.

Standardavvikelsen är 54,5 N/mm<sup>2</sup> vilket innebär att det rätta värdet med 95 % sannolikhet ligger inom  $\pm 109$  N/mm<sup>2</sup> från det uppmätta värdet. Trots att sambandet är tydligt är spridningen för stor för att mätsystemet med dessa prestanda ska kunna vara praktiskt användbart "on-line". För att instrumentet ska vara användbart bör spridningen minskas åtminstone till mindre än hälften.

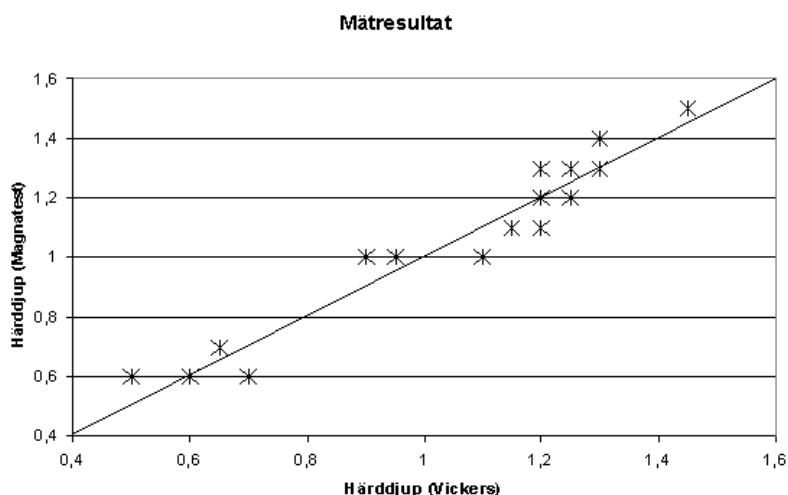
Figur 5 visar LUS-parametern  $Q$  plottad mot brottgränsen för samtliga Sandvik-prover. Varje LUS-mätning visar medelvärdet på 50 uppmätta spektra tillsammans med 95% konfidensintervall på detta resultat. Varje mätning är reproducerbar som framgår av de mycket små 95% konfidensintervallen men spridningen i relation till hållfastheten är stor (korrelationskoefficienten = 0.40).



Figur 5. Ultraljudsprovning av sträckgräns på kallvalsade band.

Man måste konstatera att det som huvudsakligen styr hållfastheten i dessa kallvalsade material inte är detekterbart i LUS-mätningarna. Sannolikt har dislokationsstrukturer och inre restspänningar en överordnad roll och dessa påverkar bara svagt på absorption av ultraljud.

Försök har slutligen gjorts att mäta härddjupet på cylindriska provstavar. Avsikten var att kontrollera härdresultatet vid sätthärdning. Provning är utförd med 49 provstavar där härddjupet varierar mellan 0,5 och 1,5 mm



Figur 6. Mätning av härddjup med virvelström.

Korrelationsgraden 97% erhöles mellan härddjup som uppmätts vid vickersmätning och med virvelströmsinstrumentet. Det största absoluta skillnaden mellan virvelströmsmätningen och vickersmätningen är 0,1 mm. Detta är fullt tillräckligt för den tänkta applikationen och företaget i fråga har beslutat gå vidare och inköpa ett instrument.

## Slutsatser

Projektets resultat kan kortfattat summeras i följande slutsatser:

- Utveckling av instrument för oförstörande mätning av materialegenskaper pågår vid ett flertal institut och företag.
- Det finns ingen generell metod för mätning av egenskaper utan mätmetoden måste anpassas efter applikationen.
- Prover med befintliga virvelströmsinstrument visar att det är möjligt att mäta hållfasthet med dessa metoder men att de inte ännu uppnått den tillförlitlighet och noggrannhet som krävs.
- Den nya LUS-tekniken visade sig potentiellt användbar i endast ett fall i detta projekt men användarna anser sig ha lärt sig mycket om hur tekniken kan optimeras och till vad den är mest användbar.
- Den dag ett tillförlitligt instrument för mätning av materialegenskaper "on-line" finns tillgängligt så är det möjligt att göra signifikanta energibesparingar per tillverkad prima produkt.



## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

### ***Industrinytta och energibesparingsaspekter***

Ett företag uppger att projektet gav en möjlighet till inblick i olika mätmetoder och vad som är möjlig att åstadkomma i dagsläget med oförstörande bedömning av materialegenskaper.

Ett annat företag hade som mål för deltagande i rubricerat projekt att erhålla kunskap om en oförstörande provningsmetod i allmänhet och speciellt för att mäta härddjup på cylindriska provstavar och att få en bredare kunskap om de mätmetoder som kan bli aktuella att använda i framtiden. Projektet har bedömts varit till nytta så till vida att man fått reda på lämpliga leverantörer av mätsystem och att man inom projektets ram kunnat prova ett par modeller och fått underlag för inköp.

Investering i ett mätsystem kommer att leda till signifikanta kostnadsbesparingar för provberedning, underhåll och energianvändning.

Eftersom mätmetoderna som provats inte ännu uppfyller de krav på noggrannhet som erfordras finns ingen verifiering av de vinster som skulle kunna uppnås med ett fungerande instrument. Ett företag bedömer att en total vikt ca 10-20 000 ton produkter per år skulle lämpa sig för provning med någon av de mätmetoder som testats i detta projekt. Ca 0,5 % av detta material kasseras p g a felaktiga materialegenskaper. Den genomsnittliga energiförbrukningen är 3 kWh/kg vilket innebär att det felaktiga materialet kostat 0,15-0,30 GWh att tillverka. Om man under tillverkning kan detektera materialegenskaper skulle det vara möjligt att ändra i processen så att rätt materialegenskaper uppnås. En halvering av kassationerna genom tidig detektering kopplat till åtgärder skulle sålunda ge en årlig energibesparing på 0,075-0,150 GWh.

Ett annat företag anger att energi- och miljömål med projektet är att produktionstiden kan minskas med 3-5% genom processoptimeringar och ökade möjligheter till förebyggande underhåll. Detta leder till en minskning av energiförbrukningen med 210-360 MWh per år.



|                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins, Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                                         |                                                             | <b>Projekt</b><br>51044, Effektivare energianvändning i ämnes-<br>värmningsugnar genom förbättrad styrning<br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>6 530 000 kr                                                                                                                                   | Tidplan, förväntade delrapporter<br>1999-07-01 – 2003-09-30 |                                                                                                                                                                                              |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>SSAB Oxelösund AB<br>SSAB Tunnpå AB<br>AvestaPolarit AB<br>Ovako Steel AB<br>Rautaruukki Oy                            |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                                        |
| Adress<br>Box 812, 97125 Luleå                                                                                                                                  |                                                             |                                                                                                                                                                                              |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Bo Leden, bo.leden@mefos.se                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                                              |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Effektivare energianvändning i ämnesvärmningsugnar genom förbättrad styrning –<br>slutrapport. Jernkontorets Forskning, serie D |                                                             |                                                                                                                                                                                              |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Under perioden januari 1999 till mars 2003 har en genomsnittlig energibesparing på 4-5 % för ämnesugnarna #1 och #2 vid SSAB Oxelösund AB uppmäts. Genomförd kvalitetssäkring och utvecklad teknik för samkalibrering av värmningsmodellen för flera prov för ugnsstyrsystemet FOCS-RF har starkt bidragit till detta resultat. Under perioden har också produktionen i valsverket ökat, vilket hanterats väl av ugnsstyrsystemet FOCS-RF. Den erhållna energibesparingen i ämnesugnarna #1 och #2 uppgår till 11 GWh/år motsvarande en kostnadsbesparing av 2 Mkr/år.

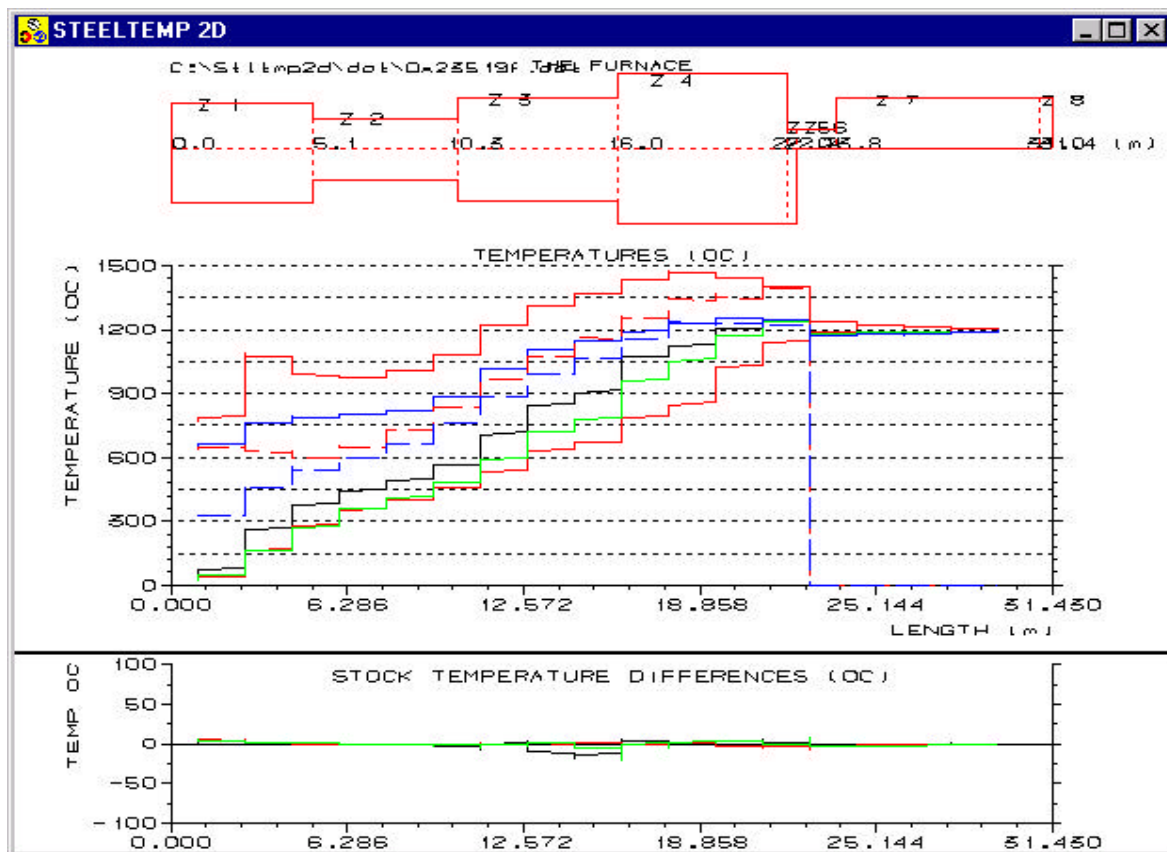
Genom att införa pådragsberoende konvektionstal och flamstrålningsbidrag, en hårdmodell, som beskriver värmeutbytet mellan den fasta ugnshärden och ämnet, samt ändra placeringen av vissa indikerande termoelement i ugnens bottenzoner från sidoväggarna till ugnsbotten kan ytterligare energibesparingar erhållas. Den totala potentiella energibesparingen för samtliga i projektet deltagande företag har beräknats till ca 113 GWh/år. Besparingen i form av minskad glödska-bildning på 39 GWh/år, inkluderad i de 113 GWh/år, är ej verifierad.

## Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Uppnådda resultat är väl i linje med projektets mål att genom bättre kontroll vid värmning av ämnen i valsverkens ämnesvärmningsugnar erhålla energibesparingar och därmed minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

## Projektpresentation

Inom projektet har nya tekniker provats ut att genom bättre styrning erhålla en effektivare energianvändning. Inledningsvis utfördes en kvalitetssäkring av ugnsoptimeringssystemet FOCS-RF för plåtverksugnar # 1 och # 2 vid SSAB Oxelösund AB, se Figur 1. Kvalitetssäkringen omfattade bl a uppdatering av den ugnsspecifika databasen för FOCS-RF och omprogrammering av rutiner för beräkning av ugnstemperaturen ovanför och under ämnena. Inom projektet har olika möjligheter att vidareutveckla värmningsmodellen i FOCS-RF studerats för att erhålla bättre styrning av dragningstakten för ämnena och temperaturskillnaderna mellan deras över- och undersidor. Studier med STEELTEMP<sup>®</sup> 2D har gjorts för att klarlägga hur värmningsmodellens noggrannhet påverkas om pådragsberoende konvektionstal, flamstrålningsbidrag införes samt av härdaareatäckningen.



Figur 1 - Resultatet av STEELTEMP<sup>®</sup> 2D kvalitetssäkring av värmningsmodellen i FOCS-RF-system för genomskjutningugn #2 vid SSAB Oxelösund AB.  
Övre del: Ugnen och dess FOCS-zoner.  
Mittersta delen: Beräknade ämnestemperaturer i mätpunkter belägna på 25 (svart), 50 (röd) and 75 (grön) % djup av testämnets tjocklek och ugnstemperaturerna (röd/blå heldragen/bruten kurva motsvarar gas-/väggtemperaturerna i övre respektive undre ugnszonerna).  
Nedre delen: Avvikelser mellan beräknade och mätta ämnestemperaturer.

I ugnar med plan härd i utjämningszonen sker ett värmeutbyte mellan härden och ämnena, som befinner sig i utjämningszonen. I STEELTEMP<sup>®</sup> 2D kalibreringsmodellerna har detta värmeutbyte beskrivits genom att ett delproblem införts med vars hjälp härden i utjämningszonen kan inkluderas i strukturen. Det nya delproblemet aktiveras automatiskt, då avståndet på ämnets undersida till härden blir noll.

De utvecklade modellerna har utvärderas mot ett flertal prov för att deras relevans skall kunna säkerställas. Därför har ett optimeringsprogram STEELOPT till STEELTEMP<sup>®</sup> 2D utvecklats, som gör det möjligt att finna de värden på ett valbart antal parametrar i värmningsmodellen, som minimerar avvikelserna mellan mätta och de av STEELTEMP<sup>®</sup> 2D beräknade ämnestemperaturerna för proven.

I samband med installationen av konventionella brännare i ämnesugn # 1 snedvalv mellan mörk- och värmningszonen har möjligheter erhållits att studera hur ämnenas värmningsförlopp och produktiviteten förändras i samband med en sådan installation.

En nyutvecklad metod provades för att registrera ugnstryck, O<sub>2</sub>-, CO-, SO<sub>2</sub>- och NO<sub>x</sub>-halterna i rökgaserna på ämnets översida under dess värmning i ugnen. Inconellrör fästade i ämnet sammankopplades med en gasanalysator utanför ugnen. Mätvärden från gasanalysatorn ger värdefull information om rökgassammansättningen, falskluftinläckningen, oförbrända kolväten och NO<sub>x</sub>-bildningen i ugnen.

## **Problemställning**

I dag ställs allt högre krav på energiutnyttjandet i valsverkens omvärmningsugnar. Vid SSAB Oxelösund AB har nya tekniker provats att erhålla en mer kontrollerad värmning av ämnena. De två ämnesugnarna # 1 och # 2 i plåtverket styrs av ett ugnsstyrssystem FOCS-RF [1] med radtaktning för kontroll av ugnstakten. Takten styrs i huvudsak av beräknade avvikelser mellan ämnenas temperaturer i respektive positioner och specificerad ideal värmningskurva samt uppehållstid över viss temperatur för ämnen med särskilda krav. Styrningen syftar till att ge ämnen inom samma produktgrupp likartad temperatur och temperaturjämnhet i dragningspositionen. Dessa storheter beräknas on-line med hjälp av värmningsmodellen i FOCS-RF [1]. Det är därför viktigt att denna modell är kvalitetssäkrad och att kritiska delar i modellen vidareutvecklas så att en förbättrad styrning av ugnen och minskad energiförbrukning erhålls.

Idag värms ämnena i kampanjer till tre olika måldragningstemperaturer 1150, 1170 och 1245 °C beroende på slutvalsningstjockleken och stålqualitén. Härden i utjämningszonen har en stor värmetröghet, vilket innebär att vid byte av måldragningstemperatur kommer de första ämnena i den nya kampanjen att värmas eller kylas av härden. Detsamma inträffar vid igångkörning av produktionen efter ett längre driftstopp. Detta får till följd att temperaturskillnaderna mellan ämnenas över- och undersidor kommer att variera med produktionen. Detta ger upphov till skidspetsar på ämnena, när de valsas, vilket försvårar valsningen avsevärt. För att studera detta förhållande har en möjlighet att inkludera härden i utjämningszonen i beräkningen införts i STEELTEMP<sup>®</sup> 2D.

## **Syfte och mål**

Målet med projektet är att erhålla en förbättrad kontroll av ämnenas värmning i ugnen och därmed lägre energiförbrukning och högre utbyten.

Genomförandet av projektet förväntas ge

- energibesparingar genom förbättring av värmningsmodellen i ugnsstyrssystemet FOCS-RF
- nya kunskaper om hur värmningsförloppet och temperaturjämnheten i ämnena förändras, när en befintlig omvärmningsugn kompletteras med konventionella brännare i ugnens snedvalv mellan mörk- och värmningszonen
- en vidareutveckling av värmningsmodellerna i STEELTEMP® 2D
- ny teknik för kalibrering av värmningsmodellen i STEELTEMP® 2D för flera prov

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Studier med STEELTEMP® 2D som gjorts för att klarlägga hur värmningsmodellens noggrannhet påverkas av hårdareatäckningen har lett fram till en rekommendation om hur de indikerande och reglerande termoelementen i FOCS-RF skall placeras. Dessa termoelement skall i största möjliga utsträckning placeras i ugnsvälv och ugnsbotten i stället för i sidoväggarna, när hårdareatäckningen varierar kraftigt, för att erhålla en noggrann beräkning av ämnestemperaturen.

Genom en jämnare temperaturfördelning i ugnarna och en förbättrad styrning av ämnenas värmningsförlopp skattas en energibesparing erhållas på ca 3 %. I dag värms ca 6 200 kton i de fyra deltagande svenska verkens omvärmningsugnar. Med en energiåtgång i omvärmningsugnen på 400 kWh/ton blir den potentiella energibesparingen

$$0,03 * 6\,200\,000 \text{ ton/år} * 400 \text{ kWh/ton} = 74 \text{ GWh/år.}$$

Genom att värma effektivare så att en ökad produktivitet erhålls blir glödskaalsbildningen mindre, vilket uppskattas ge en höjning av utbytet på ca 0,1 %. Med en energiåtgång på 6350 kWh/ton för framställning av band eller plåt från malm fås följande potentiella besparing

$$0,001 * 6\,200\,000 \text{ ton/år} * 6\,350 \text{ kWh/ton} = 39 \text{ GWh/år.}$$

Den totala potentiella energibesparingen blir således 113 GWh/år. Detta leder till minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

### ***Referens***

- [1] Leden B: "A control system for fuel optimisation of reheating furnaces", Scand. Journal Metallurgy 15, (1986), nr 1, sid 16-24.



|                                                                                                                                                                 |                                               |                                                                                                                                        |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                                         |                                               | <b>Projekt</b><br>51045 Intelligent larmhantering<br><input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>15 387 954 SEK                                                                                                                                 | Tidplan, förväntade delrapporter<br>1999-2003 |                                                                                                                                        |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Control Technology Centre,<br>Manchester, Advanced Process<br>Control, Chester, SSAB Tunnpå, Borlänge, AvestaPolarit,<br>Avesta |                                               | Avdelning/Institution                                                                                                                  |  |
| Adress<br>AvestaPolarit, 774 80 Avesta                                                                                                                          |                                               |                                                                                                                                        |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Björn Jönsson, bjorn.jonsson@avestapolarit.com                                              |                                               |                                                                                                                                        |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Intelligent Larmhantering, Jernkontorets Forskning serie D                                                                      |                                               |                                                                                                                                        |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Resultatet visar på metoder att genom sensorvalidering övervaka och detektera fel hos t.ex. temperaturgivare i värminingsprocesser. Energivinster finns i) direkt genom korrekt (lägre) värminingstemperatur. ii) samt indirekt genom färre omarbetningar pga felvärmining.

Dessutom visas på metoder att övervaka utsläppsnivåer (t.ex. NO<sub>x</sub>) från värminingsugnar utan mätning. Miljövinster pga bättre kontroll av utsläpp förväntas.

En metod för övervakning och förenklad analys av energiförbrukningen som funktion av körsättet hos en värminingsugn rapporteras också. Möjligheter att spara energi genom snabbare identifiering av felaktiga driftstillstånd förutses.

En fjärde applikation riktade sig mot en syragenereringsanläggning för förutsägande av kvalitet på bildad järnoxid. Resultatet av detta delprojekt är oklart pga problem med materialprovanalysresultaten.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Om man ser till att arbeta med felfria temperaturgivare kan man spara energi både direkt genom att rätt temperatur (igen övervärmining) används, och indirekt som följd av att omarbetning pga. fel värmining undviks.

Möjligheten att övervaka emissioner (NO<sub>x</sub>) från värminingsugnar via tillståndskontroll av många ingående signaler ger möjligheter att på ett tidigt skede ge larm om befarade höga utsläppsnivåer som en följd av t ex drift i sensorer.

Snabbare återföring om energiförbrukningen på 8-timmars skiftnivå är normal, vilket annars är komplext och tidsödande att reda ut.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Värmnings- och värmebehandlingsugnar inom stålindustrin är i hög grad automatiserade med avancerade styrsystem som ser till att materialet värms eller värmebehandlas till rätt temperatur och kvalitet på ett ekonomiskt sätt med hög produktivitet. Automationen av dessa komplexa system bidrar dock till problem för operatörer att effektivt övervaka olika delar av processerna.

Operatörsvägledning för kritiska eller komplexa situationer finns ofta inte inbyggt i automationssystemen, istället måste åtgärder vidtas på grundval av långa larm- och händelselistor vilket ibland ställer mycket stora krav på operatörernas förmåga.

Automatisering av övervakning med analys av sammansatta feltillstånd och felsökningshjälp blir ett nödvändigt instrument för att klara framtidens allt hårdare krav på kvalitetssäkring.

### ***Syfte och mål***

Syftet med projektet har varit att genom en förbättrad larmhantering minska energiåtgången per producerad enhet och därmed också minska vidhängande emissionsnivåer.

### ***Metoder och angreppssätt***

Ett datorprogram, MonitorMV, för bearbetning av mätta signaler från processindustrin har utnyttjats inom projektet. MonitorMV som bygger på de senaste teknologierna inom processövervakning och processanalys (dynamisk processmodellering med PCA/PLS), är ett hjälpmedel som ger en klarare bild över vart processen är på väg, var ev. fel finns och hur de kan åtgärdas.

Installation av programmet och utvärderande försök har gjorts on-line hos stålverken i Borlänge och Avesta.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Detta projekt har klart visat på reella möjligheterna till energibesparingar och minskad miljöpåverkan. Genom sensorvalidering och analys av komplexa signaltillstånd kan felaktiga drifttillstånd i processer undvikas vilka skulle ha lett till undermåliga produkter vilka måst ha ersatts/omarbetats med energi/miljöpåverkan som följd.



|                                                                                                                                          |  |                                                                                                                                                 |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                                   |  | <b>Projekt</b><br>51046, 51047<br>Högtemperaturförbränning<br><input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>8 583 020 SEK (51046)<br>3 589 971 SEK (51047)                                                                          |  | Tidplan, förväntade delrapporter<br>1999-2003                                                                                                   |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>SSAB Tunnpå Borlänge,<br>MEFOS, KTH, Jernkontoret                                                        |  | Avdelning/Institution                                                                                                                           |  |
| Adress<br>Box 1721, 111 87 Stockholm                                                                                                     |  |                                                                                                                                                 |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Birgitta Lindblad, birgitta.lindblad@jernkontoret.se                 |  |                                                                                                                                                 |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Performance of reheating furnaces equipped with highly preheated air,<br>Jernkontorets Forskning serie D |  |                                                                                                                                                 |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

The long time test of a pair of regenerative burners in a oil-fired furnace shows a very good reliability and that the necessity of maintenance on the installation has been low. The test shows also that it is possible to run this burner more than a year without cleaning the ceramic ball in the heat exchanger without any significant loss of performance. It is certain that the heat recovery ratio and temperature efficiency are almost not affected with cycling time for this type of regenerator.

A comparison with an ordinary recuperative burner system gives that the fuel savings is approx 12% due to the higher heat recovery ratio. The one pair of regenerative burners has been modelled to increase the productivity in the furnace with 2%. The measurement of the contents of nitrogen oxides in the flue gases in the vicinity of the HPAC (Highly Preheated Air Combustion) burners also showed that the pair of HPAC burners did not contribute any extra to the total amount of nitrogen oxides in the flue gases.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

The results gave a good correspondence with the expected decrease in energy consumption and increase in productivity. The need for cleaning of the ceramic balls in the regenerator was much less than expected and also the life time of burner nozzles and quarks.



# Projektpresentation

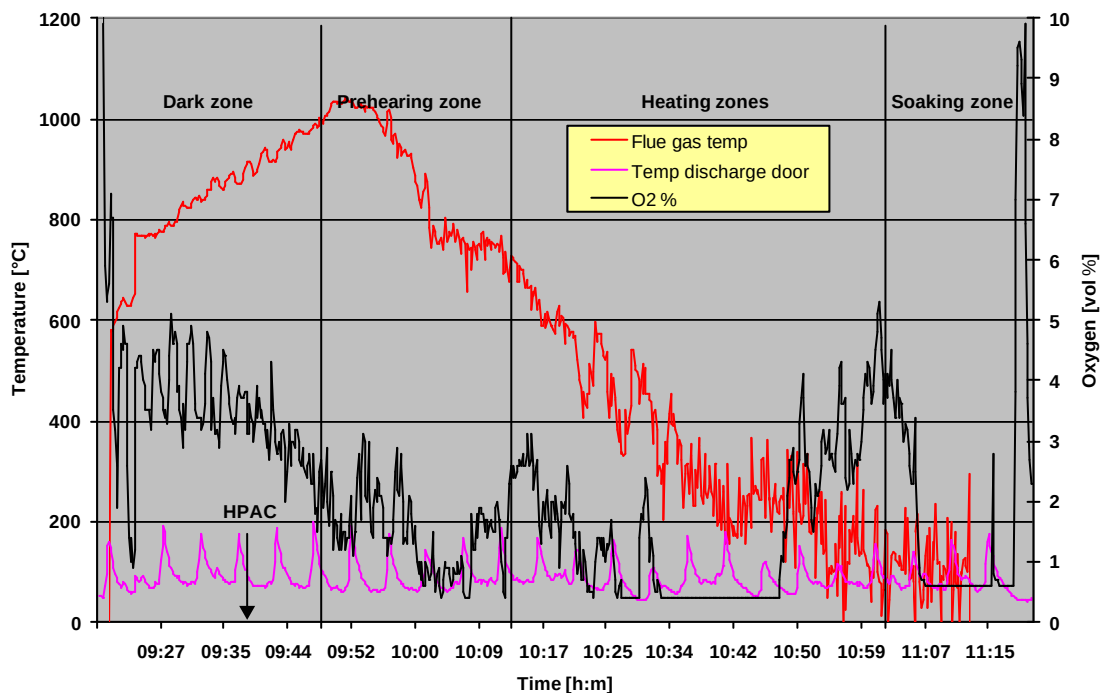
## Problemställning

Despite advances in casting and rolling technology the requirement to reheat steel products is likely to remain an integral part of the steel industry's process route in the foreseeable future. Increasingly stringent product quality requirements, the need to maximise production and minimise costs, and legislation limiting gaseous emissions into the environment, is placing high demands on reheating furnace design and operation.

Burner using highly preheated air combustion (HPAC) technology and designed to produce low  $\text{NO}_x$  emissions, have characteristics that are different to those of conventional burners. This has potential implications for the performance of steel reheating furnaces.

A long time test with one pair of regenerative burners in a 300 t/h walking beam furnace at SSAB Tunnsplåt, Borlänge has been carried out complemented with slab test and computational fluid dynamics (CFD) -modelling at MEFOS.

The results of the measurements of the  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  contents in the flue gases and the furnace temperature on the bottom surface of the test slab can be seen in the figure. The diagram shows clearly the influence on the flue gas temperature and  $\text{O}_2$  contents from the changeover of the HPAC burners between combustion and regenerative mode. The oxygen contents in the flue gases vary up and down around 4 vol %  $\text{O}_2$  with a time period of 2 min, before the test slab has reached the HPAC burners. Then the fluctuation ceases. However, the fluctuations in the flue gas temperatures can be seen in almost the whole dark zone, caused by the radiation from the flames of the burners.



## ***Syfte och mål***

The main objectives of the project have been to confirm and demonstrate the possibility of technological innovation in which both high thermal efficiency and low nitric oxides emission can be achieved simultaneously and to demonstrate the reliability and effectiveness when HPAC technology is used. The test should also give some estimates of the maintenance efforts and the reliability for the burner and the regenerator

## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

The consumption of oil and gases for reheating and heat treatment furnaces was 3,7 TWh during 2002. If regenerative burners can be installed in furnaces with ca 50% of this consumption the energy saving will be between 200 and 300 GWh. A drawback with these burners is the investment cost. The decreased costs for energy can rather seldom alone compensate the higher investment cost. Therefore higher productivity in the furnace and lower emission of nitrogen oxides are important factors.



|                                                                                                                                       |                                                                  |                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                               |                                                                  | <b>Projekt</b><br>51048 Matematisk modellering <input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>2 800 000 SEK                                                                                                        | Tidplan, förväntade delrapporter                                 |                                                                                                                                  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>KTH                                                                                                   | Avdelning/Institution<br>Institutionen för Energi och ugnsteknik |                                                                                                                                  |
| Adress<br>100 44 Stockholm                                                                                                            |                                                                  |                                                                                                                                  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Wlodzimierz Blasiak, blasiak@mse.kth.se                           |                                                                  |                                                                                                                                  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Mathematics Modelling for High Temperature Air Combustion (HiTAC),<br>Jernkontorets Forskning serie D |                                                                  |                                                                                                                                  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Mathematical modelling of the High Temperature Air Combustion process is the only reliable way to scale up the combustion process from laboratory to industrial implementation. In this way a high combustion temperature process can be optimally designed for different applications, for example for different types of furnaces. Therefore the main objective of this project was to develop and experimentally verify mathematical model which is able to predict correctly at first a single fuel jet in conditions of High Temperature Air Combustion and next use the model to predict performance of a semi-industrial (HiTAC) test furnace. Modelling was planned to be verified carefully against results of experiments.

In this work the following activities were performed:

1. Evaluation of the existing turbulence-chemistry interaction and mixing models,
2. Evaluation of the heat transfer models,
3. Mathematical modelling development for simulations of the HiTAC furnaces,
4. Verification of mathematical modelling against results of measurements.

Evaluated, developed and verified mathematical modelling tools allow now to perform computer simulation of an industrial furnace equipped with HiTAC technology.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

Results were obtained according to the planned activities at the beginning of this project and the project was performed according to plan.

# Projektpresentation

## ***Problemställning***

Design of modern combustion chamber is based on properly placed highly preheated air jets and separated from them fuel jets. High-velocity, high-temperature air jets create recirculating flows of flue gases, which determine distribution of oxygen. Into this environment characterised by decreased oxygen concentration and temperature level above fuel auto-ignition temperature the fuel jets are injected. The way of fuel injection is of primary importance for combustion efficiency, temperature uniformity and NO<sub>x</sub> formation. Therefore, understanding of aerodynamics and combustion of the single fuel jet in these conditions is of primary importance for optimal designing of High Temperature Air Combustion processes. In order to model properly the whole furnace at first a single fuel jet injected directly into combustion chamber has to be numerically simulated. This is so called Fuel Direct Injection, which is basic technique for the High Temperature Air Combustion technology. The single fuel jet modelling must be followed by numerical modelling of the HiTAC furnace. The HiTAC furnace at KTH was used for verification of the numerical modelling results.

## ***Syfte och mål***

Main objective of this work was:

- to develop interpretative and/or predictive models and scaling up tools necessary for successful application of the High Temperature Air Combustion in industrial furnaces,

## ***Metoder och angreppssätt***

Work was performed by means of numerical modelling tools. Existing already models were evaluated and modified to conditions of High Temperature Air Combustion. The models were used to simulate a two type of furnaces:

- a single flame laboratory furnace,
- a HiTAC test furnace equipped with industrial burners working according to the High Temperature Air Combustion technology.

## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

The High Temperature Air Combustion (HiTAC) is a new combustion technology, which has the potential to save fuel (thus reduce CO<sub>2</sub>), increase product quality, increase production rate, and keep very low emissions of NO<sub>x</sub>. Research and industrial tests have shown that when this technique is applied to gas or oil fired reheating furnaces the following results could be achieved:

- ❑ Reduction of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions by 30%,
- ❑ Reduction of NO<sub>x</sub> emission by 50%,
- ❑ Uniform in-furnace temperature distribution
- ❑ Downsizing of the furnace or higher production rate.

The HiTAC technology has already been applied in gas and oil fired furnaces, and during last years it has been extended towards solid fuels like coal, wastes and biomass. At present industrial demonstration projects are planned. In these projects the already developed mathematical modeling tool will be used to implement properly High Temperature Air Combustion.



|                                                                                                                                                                                                                                |                                                             |                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålintustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                                                                                       |                                                             | <b>Projekt</b><br>51049 Automatisk syreöverskottsstyrning av<br>värminingsugnar<br><input type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>5 475 000 SEK                                                                                                                                                                                                 | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-01-01 – 2003-10-30 |                                                                                                                                                                      |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>SSAB Tunnplåt AB, Borlänge<br>Ovako Steel AB, Hofors<br>Fundia Bygg A/S, Mo I Rana<br>Rautaruukki Oyj, Brahestad<br>Avesta Polarit AB, Avesta<br>AGA AB, Lidingö<br>SSAB Oxelösund AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                                                |
| Adress<br>Box 812, 97125 Luleå                                                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                      |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>John Niska, john.niska@mefos.se                                                                                                                            |                                                             |                                                                                                                                                                      |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Automatic excess oxygen control in steel reheating furnaces – Final Report<br>Jernkontorets Forskning serie D                                                                                  |                                                             |                                                                                                                                                                      |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

En ny mätteknik sk diodlaser eller TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) för syreöverskottsstyrning har undersökts mha pilotförsök och driftförsök. Två olika fabrikat diodlaser för gasanalys har provats under dessa försök, en tillverkad i Sverige av Siemens och en annan tillverkad i Norge av NEO. Båda instrumenten fungerade bra i pilotförsök för enbart syremätning. Driftförsöken har stött på olika problem, t ex instrument begränsningar vid simultan syre- och temperaturmätning. Pilotförsöken visade på ett ökat arbetsområde vid lågt syreöverskott med extern gastemperatur, och på möjlighet att införa automatisk syreöverskottsstyrning i en stegbalksugn med mätsignalen ifrån diodlasern (se Figur 1). Syreöverskottssignalen från diodlasern jämfördes med konventionella zirkonia mätinstrument och överensstämmelsen var mycket bra under jämna driftförhållanden i ugnen och högt syreöverskott (2-4 % O<sub>2</sub>). Skillnader i mätresultat är troligtvis kopplat till en ojämnare ugnsatmosfär vid lågt syreöverskott, eftersom en punkt mätning med zirkonia-sonden jämförs med ett genomsnitts värde ifrån diodlasern.

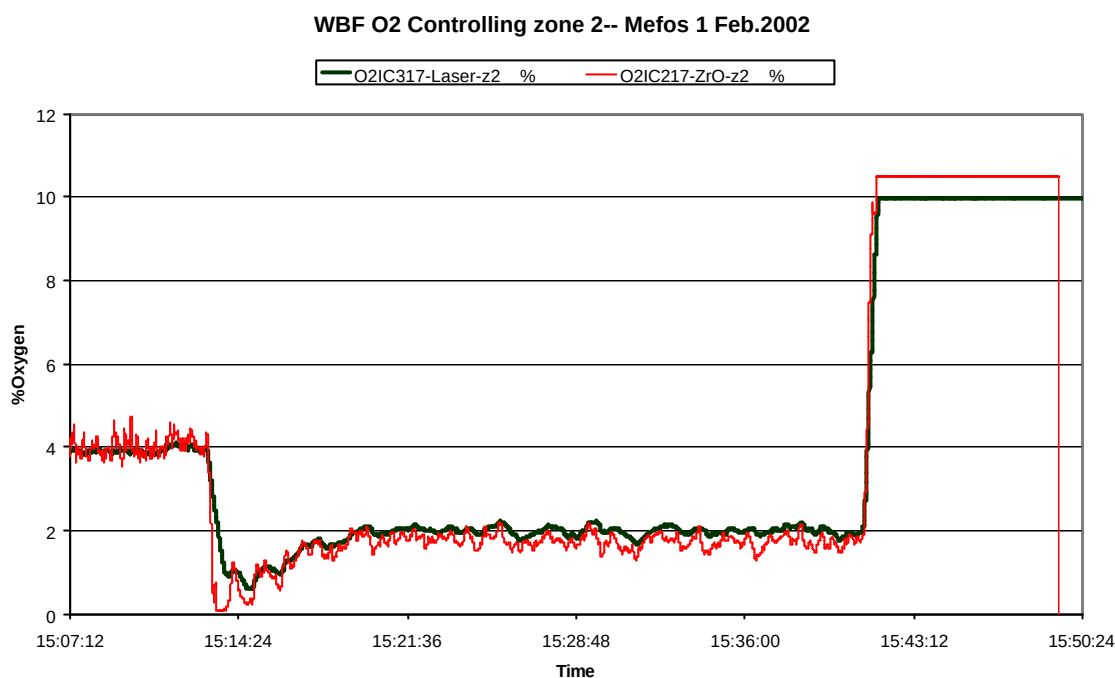


Fig. 1 Automatisk syreöverskottsstyrning med TDLAS i MEFOS stegbalksugnen.

Löpande resultat har rapporterats till en styrkommitté från valsverksföretagen, dessutom har tekniken presenterats på flera konferenser och genom tekniska artiklar [1-3].

### ***Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål***

Automatisk syreöverskottsstyrning har provats i pilotförsök, och tekniken ser lovande ut för styrning av stora industriella värmningsugnar. Försök med automatisk styrning i industriell skala försejades mycket främst p g a ett instrumentfel och påföljande mycket tidskrävande reparation hos leverantören. Instrumentet fungerade sämre efter reparationen p g a installation av en svagare diodlaser. Fortsatta forskning inom tekniken är ännu mycket intressant men nivån beror mycket på företagen och framtida forskningsbudget.

## **Projektpresentation**

### ***Problemställning***

Luft-bränslekvoten styrs vanligtvis idag av en flödesmätning i valsverkens omvärmningsugnar. Felmarginalen vid flödesmätning gör det svårt att hålla ett konstant lågt syreöverskott i ugnarna. Luftöverskottet kan därför svänga p g a mätfel vid olika brännarpådrag och brist på kontrollkalibrering av börvärde med ärvärde. Svängningarna medför risk för sämre stålqualität p g a sämre glödsjalsrensning och en högre avkolning vid ett för lågt syreöverskott eller högre energiförbrukning och större materialförlust p g a för högt syreöverskott. Problemet är välkänt och olika lösningar har provats med både in-situ och extraktiv syreöverskottsmätning där elektrokemisk, magnetisk eller infraröda (IR) analysatorer används. Extraktiva metoder som kräver gasbehandling som termomagnetiska, magnetodynamiska och IR-analysatorer har problem med höga underhållskostnader. Zirkonia elektrokemiska sonder behöver inte en dyr gasbehandling och finns som in-situ sonder lämpliga för ugnszoner med temperaturer upp till 1250 °C. Dessa har sedan länge tillämpats för punktvis analys, t ex hade SSAB Tunnsplåt (fd Domnarvret) 1978 6 st Thermox O<sub>2</sub>-analysatorer i deras gamla 100 ton/hr genomskjutningsugn för atmosfärskontroll [4]. Nästa steg i utvecklingen är att få en signal som är tillräckligt bra för att styra syreöverskottet i ugnen. Zirkonia-punktmätningssmetoden fungerar bra för automatisk syreöverskottsstyrning i ugnszoner med några få brännare. I t ex MEFOS pilotugn har det fungerat bra med zirkoniamätning i valvet för värmningszoner med 2 brännare som styrs gemensamt. Punktmätning av syret för ugnstyrning har också provats i

industriella tillämpningar, t ex BFI rapporterar användning av 12 mätpunkter för styrning av 18 brännarzoner i en ämnesvärmningsugn [5].

Projektet har undersökt in-situ optisk gasanalys med diodlasern för ämnesvärmningsugnar med målet att styra bränsle-luftkvoten till brännarna mha en mätsignal istället för flödessignaler (principen visas i Figur 2). Optisk teknik ger en genomsnittsanalys som borde ge en bättre styrsignal än tidigare gasanalysmetoder som är punktvisa. Ett TDLAS instrument är dyrare än en konventionell zirkoniasond, men underhållet bör vara mindre.

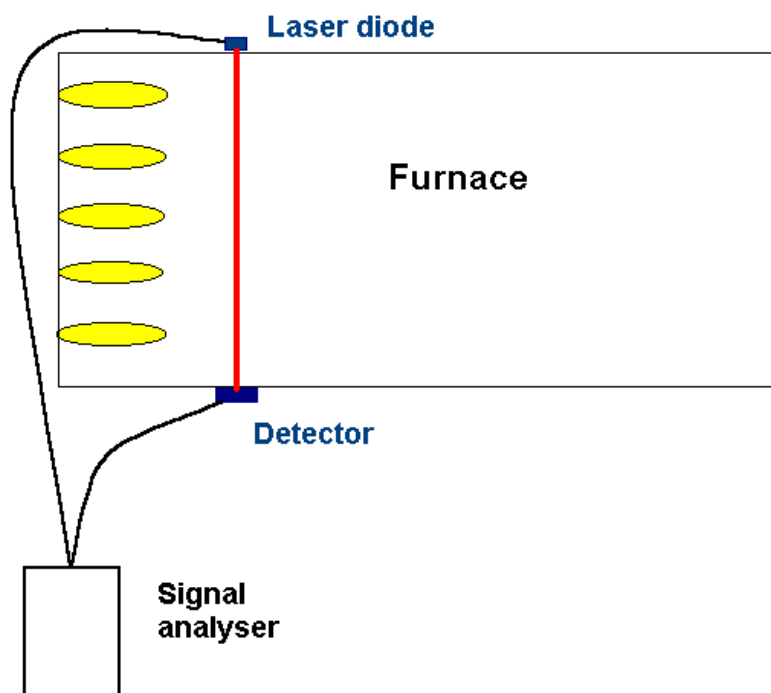


Fig. 2 Skiss av teknik för tillämpning av diodlaser gasanalys i värmningsugnar.

### **Syfte och mål**

Automatisk syreöverskottsstyrning i ämnesvärmningsugnar har provats med en ny optisk in-situ gasanalysteknik, diodlaser, med målet att sänka energiförbrukningen, förbättra produktiviteten och minska glödskalets förluster och utsläpp av avgaser.

### **Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.**

Det finns möjligheter för förbättring av nuvarande reglerpraxis av luftöverskott i rökgaserna från förbränningsugnar med hjälp av in-situ mätningar av syreöverskott i direkt anslutning till förbränningen. Tanken med detta projekt har varit att låta testa om de tilltänkta teknikerna är tillräckligt mogna för industriell tillämpning, dvs om de är tillräckligt flexibla, robusta och tillförlitliga över längre tidsperioder.

Det finns ett antal potentiella energisparåtgärder inom området ämnesvärmningsugnar som vi kan implementera med hjälp av ett nytt exaktare sätt att styra förbränningen, nämligen:

- minskad mängd primär avbränna p g a lägre  $O_2$ -halt i ugnsatmosfären.
- minskade  $CO_2$ -utsläpp per producerat tonnage p g a lägre bränsleförbrukning.
- minskade  $CO$  utsläpp p g a säkrare reglering av  $O_2$ -halten i ugnsatmosfären.

Avbränning av ämnesytan till primärt glödskalet uppskattas kunna minska med 0.05 % med den nya tekniken p g a möjligheten att hålla ett lägre syreöverskott, d v s materialutbytet kan förbättras med

0.05 %. Räknat på tonnaget 5 Mton/år blir det 2,5 kton stål. Energibesparingen med 6 350 kWh/ton från malm till varmvalsat band blir då:

$$2\,500 \text{ ton/år} \times 6\,350 \text{ kWh/ton} = 16 \text{ GWh/år.}$$

Ett lägre syreöverskott med den nya gasanalystekniken kopplad till styrningen av ugnen uppskattas kunna sänka bränsleförbrukningen med 2,5 %. Med 400 kWh/ton blir det en energibesparing på:

$$0.025 \times 400 \text{ kWh/ton} \times 5 \text{ Mton/år} = 56 \text{ GWh/år}$$

Total energibesparingspotential: 72 GWh/år

Siffrorna anger energiförbrukningen per ton färdig produkt. Driftstopp och andra störningar ger en ökad osäkerhet i siffrorna över korta perioder, men över längre perioder bör dessa fördelar vara signifikanta.

Tekniken kan ge produktivitetsökning p g a en högre värmeöverföring vid lågt luftöverskott och ökad brännarkapacitet när luften begränsas. Glödskalets egenskaper påverkas av syreöverskottet och ugnstemperaturen, och därmed glödskalets rensning. Sämre glödskalets rensning på stålet ger en sämre kvalitet med lägre pris på produkten och skrot.

## Referens

- [1] Niska, J. and Rensgard, A., "TDLAS for combustion gas analysis in a steel reheating furnace", MEFOS, MEF01073, 010906 and presented at the 2001 Joint AFRC Int'l Combustion Symposium, Sept. 2001, Kauai, USA.
- [2] Niska, J., "Laser diode gas analysis for reheating furnaces", Steel Times, V 229, no 7/8, July-August, 2001, p. 251 and MEFOSNews April 2001.
- [3] Sandström, L.; and Malmberg, D., "On-line and in situ monitoring of oxygen concentration and gas temperature in a reheating furnace utilizing tunable diode-laser spectroscopy", SPECTROCHIMICA ACTA PART A, Vol 58, 2002, pp 2449-2455.
- [4] Leden, B., "Gasanalys i värmugnar", Jernkontorets Forskning serie D nr 264, 1979, s. 26.
- [5] BFI Annual Report 1997/98 BFI Betriebsforschungsinstitut, Dusseldorf, s. 33.





|                                                                                                                                   |                                                                  |                                                                                                                                                          |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värmnings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket<br>1999-2003                            |                                                                  | <b>Projekt</b><br>51050 Värmeåtervinning från svalbäddar<br><input checked="" type="checkbox"/> Pågående<br><input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |  |
| Total kostnad<br>18 620 700 SEK                                                                                                   | Tidplan, förväntade delrapporter<br>Delrapport lämnad 2001-07-13 |                                                                                                                                                          |  |
| Universitet/Högskola/Företag<br>Hofors Energi, Ovako Steel,<br>SSAB Tunnpå, Luleå                                                 |                                                                  | Avdelning/Institution                                                                                                                                    |  |
| Adress<br>Hofors Energi, 813 82 Hofors                                                                                            |                                                                  |                                                                                                                                                          |  |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>Jan Nilsson, jan.nilsson@hoforsenergi.se                      |                                                                  |                                                                                                                                                          |  |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Värmeåtervinning från svalbäddar inom järn- och stålindustrin. Jernkontorets<br>Forskning serie D |                                                                  |                                                                                                                                                          |  |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

De genomförda försöken med återvinning av värme från järn- och stålindustrins svalbäddar hos OVAKO i Hofors och Hällefors samt av återvinning av värme från forcerad kylning av ämnen hos SSAB i Luleå, demonstrerar att det är möjligt att återvinna värme i form av uppvärmt vatten för användning i fjärrvärmenät och/eller för intern uppvärmning/varmvattenberedning.

Återvinning kan ske med relativt enkel utrustning av typ VVS-installationer, som marginellt riskerar påverka produktion, löpande tillsyn, reparationer och underhåll.

Återvinning från svalbäddar genom en kombination av konvektions- och strålningsvärme eventuellt i kombination med värmeväxling av restvärmes i den avkylda med fortfarande varma kylsluft från en svalbädd mot tilluft, skulle kunna tillvarata upp mot 50% av energiinnehållet i avsväljande stål dvs upp mot 75 kWh/ton stål.

### Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål

De uppnådda resultaten verifierar att syftet med försöken uppnåts.

Resultaten indikerar också att kollektorer för återvinning av värme från svalbäddar kan utvecklas vidare för ökad effektivitet.

# Projektpresentation

## ***Problemställning***

Järn- och stålindustrin liksom andra producenter av metaller omsätter stora energimängder vid framställning och vidareförädling.

Svalning på svalbäddar har varit och är fortfarande en delprocess där energi normalt kyls bort utan att återvinnas.

Många försök har gjorts med att återvinna värme från svalbäddar, men försöken har förr eller senare alltid misslyckats på grund av att produktionen inte accepterat nödvändiga installationer eller på grund av att ansvariga inte kunnat motivera en reinvestering i återvinningsutrustning efter det att den utsatts för produktionens hårda villkor.

## ***Syfte och mål***

Syftet med genomförd demonstration har varit att visa att värme från svalbäddar kan återvinna med enkla och billiga installationer som ej påverkar produktionen och ej heller försvårar löpande tillsyn, reparationer och underhåll dvs accepteras av produktionen.

Målet är att visa att detta också kan ske med rimlig ekonomi.

## ***Metoder och angreppssätt***

Metoden för att visa att syftet/mål uppnås har varit att i samråd med produktionen installera moduler av en tänkt fullstor återvinningsanläggning i produktionsflödet och låta dessa vara i drift under lång tid under skiftande förhållanden och därvid mäta den värme som återvunnits samtidigt som aktuellt tonnage noterats liksom eventuella invändningar från produktionen. Försöken har genomförts vid följande anläggningar

1. Norra svalbädden vid valsverket i Hofors – konvektionsvärme
2. Södra svalbädden vid valsverket i Hofors – strålningsvärme
3. Svalbädden vid valsverket i Hällefors – strålningsvärme
4. Forcerad kylning vid stränggjutningen vid SSAB Tunnplåt, Luleå

Försöks-/demonstrationsanläggningarna har utförts med moduler uppbyggda av på marknaden förekommande konventionella komponenter. Erfarenheter från solvärmeteknik har använts vid försök med strålningsvärme.

## ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Återvinning från svalbäddar genom en kombination av konvektions- och strålningsvärme eventuellt i kombination med värmeväxling av restvärmes i den avkylda med fortfarande varma kylsluft från en svalbädd mot tilluft, skulle kunna tillvarata upp mot 50% av energiinnehållet i avsväljande stål dvs upp mot 75 kWh/ton stål. In en förstudie framkom att ca 5 Mton varmt material kyls på svalbäddar där värmeåtervinning är möjlig. Energisparpotentialen blir då ca 375 GWh per år. En viktig förutsättning är dock att det finns motsvarande värmebehov i företagen och omgivande bebyggelse.



|                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                             |                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forskningsprogram</b><br>Stålindustrins Värminings-,<br>Bearbetnings- och Materialpaket,<br>1999-2003                                                                                                                                                            |                                                             | <b>Projekt</b><br>51051 Temperaturmätning i valsverkens ugnar<br><br><input type="checkbox"/> Pågående <input checked="" type="checkbox"/> Avslutat |
| Total kostnad<br>3 080 463 SEK                                                                                                                                                                                                                                      | Tidplan, förväntade delrapporter<br>2000-01-01 – 2003-10-30 |                                                                                                                                                     |
| Universitet/Högskola/Företag<br>MEFOS<br>Ugnsbolaget Tabo<br>AvestaPolarit<br>SSAB, Borlänge<br>Jernkontoret<br>Det Danske Stålvalseværk<br>SSAB Tunnpå AB, Borlänge<br>SSAB Oxelösund AB<br>Ovako Steel AB, Hofors<br>AGA AB<br>AB Sandvik Materials Technology AB |                                                             | Avdelning/Institution                                                                                                                               |
| Adress<br>Box 812, 971 25 Luleå                                                                                                                                                                                                                                     |                                                             |                                                                                                                                                     |
| Fullständigt namn och E-post till forskningsledare/kontaktperson<br>John Niska, john.niska@mefos.se                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                     |
| Slutrapport, namn och förlag<br>Temperature measurement techniques for rolling mill furnaces - Final Report<br>Jernkontorets Forskning serie D                                                                                                                      |                                                             |                                                                                                                                                     |

## Sammanfattning

### Uppnådda huvudresultat

Forskning inom området kontinuerlig gastemperaturmätning för värminingsugnar har visat att kontinuerlig mätning av gastemperaturen är genomförbar, och därför värd vidare forskning för att erhålla en bättre ugnsstyrning. Två nya mättekniker har främst studerats inom projektet. Den första mättekniken som har studerats är en diodlaser eller TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) som kan mäta syreöverskottet och temperaturen tvärs genom ugnsrummet. Tekniken har testats i omfattande pilotförsök hos MEFOS och i industrimiljö genom driftförsök hos SSAB, Borlänge med stöd av andra projekt. Driftförsöken har stött på olika problem, t ex instrumentbegränsningar vid simultan syre- och temperaturmätning vid lågt syreöverskott. Mätningar har visat på intressanta data, t ex att gastemperaturen svänger mycket snabbare än väggtermoelement-signalen (se Figur 1). Dagens ugnstyrningssystem kräver en gastemperatur för ämnestemperatur-beräkningar som idag måste uppskattas mha väggtemperaturen i saknad av en bra gastemperaturmätning.

Den andra nya mätmetoden är en IR gastemperaturpyrometrar (eller rökgaspyrometer). Dessa pyrometrar är typiskt byggda för att mäta CO<sub>2</sub> strålning vid en viss våglängd, t ex vid 4,3 eller

4,5 mikrometer. Inom projektet har LANDs CD1 rökgaspyrometer provats i driftförsök hos Sandvik Steel och SSAB (se Figur 2). Pyrometern fungerade bra, och visade på att kontinuerlig gastemperatur- mätning är möjlig, för en rimlig kostnad.

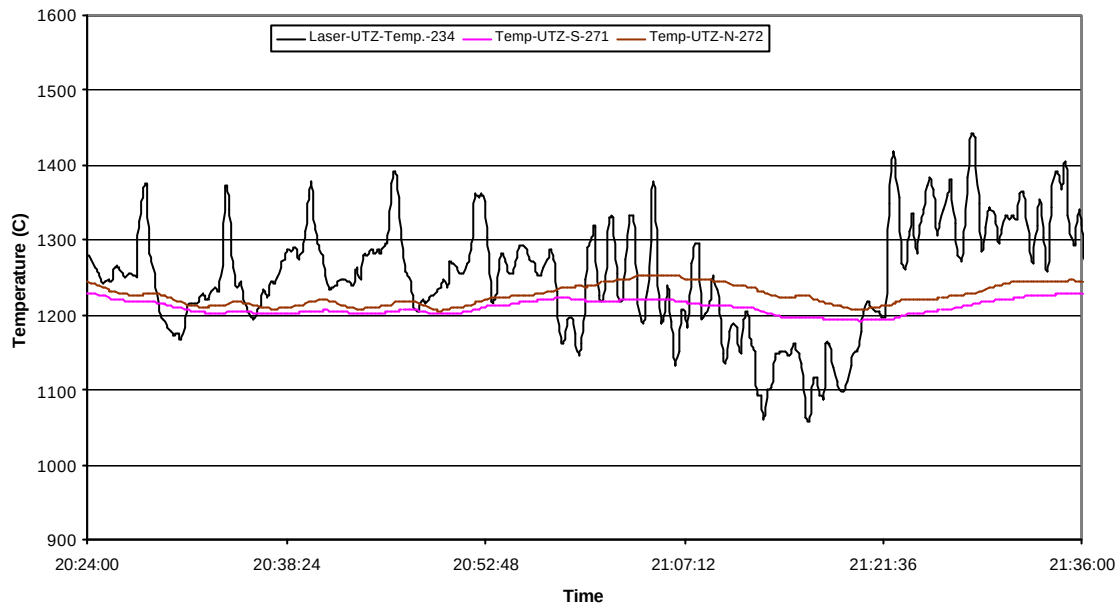


Fig. 1 Gastemperaturmätning med Siemens TDLAS i SSABs stegbalksugnen zon 5 (diodlaser signalen har snabba svängningar jämfört med tak termoelement signalen).

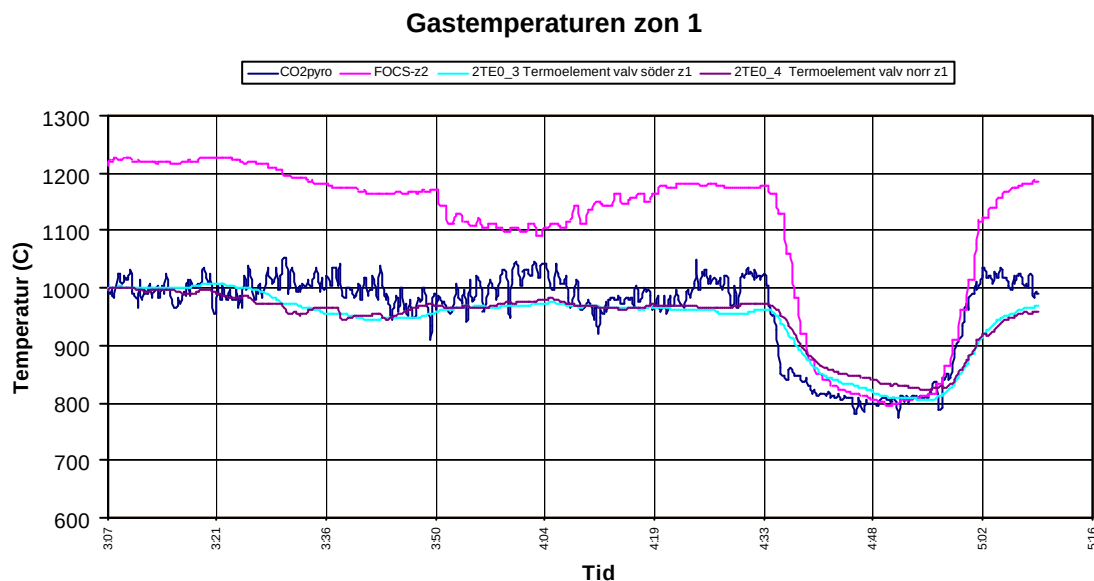


Fig. 2 Gastemperaturmätning med Land CD1 gastemperatur IR-pyrometer i SSABs stegbalksugnen zon 1 (kurvan med snabba svängningar).

Löpande resultat har rapporterats till en styrkommitté med medlemmar från valsverksföretagen, och diodlaser tekniken har presenterats på flera konferenser och i ett flertal artiklar [1-3].

### **Tolkning av dessa i förhållande till forskningens syfte/mål**

Forskningsprojektet har haft flera delmoment. Det första var en probleminventering för att identifiera mätproblem och registrering av rökgastemperaturer visade sig vara ett stort mätproblem. Nästa steg var att karlägga betydelsen av en god temperaturmätningsteknik, och varför det idag inte finns någon rökgastemperaturmätning i fasta installationer i svenska varmvalsverk. Ugnstysystemen måste uppskatta rökgastemperaturen mha väggtemperaturer, och en bättre reglering av ämnestem-

peraturen bör vara möjlig med mätningar. Det sista delmomentet har varit tester av de nya temperaturmätningsskema, där två nya optiska metoder testades. Fortsatta forskning inom teknikerna är ännu mycket intressant men insatsen beror mycket på företagets vilja och framtida forskningsmedel.

## Projektpresentation

Projektet har undersökt in-situ optisk gastemperaturmätning med diodlasern och IR pyrometer för ämnesvärmningsugnar med målet att styra gastemperaturen i ugnsstyrssystem, t ex FOCS, mha en mätsignal istället för en beräknad gastemperatur (diodlaser principen visas i Figur 3). Optisk teknik ger ett genomsnittsvärde som borde ge en godtagbar styrsignal.

## Problemställning

Temperaturmätning i värmnings- och värmebehandlingsugnar har stor betydelse för produktkvalitet och energianvändning för slutprodukter. Detta har i slutändan även en koppling till miljöbelastning. Genom att processtyrssystem används i allt större utsträckning har behovet av en god temperaturmätning ökat markant. Bättre och mera ändamålsenlig temperaturmätning bedöms kunna medföra bättre förutsättningar för optimal processtyrning.

Projektets arbetsprogram inkluderades två litteraturundersökningar [4,5], diodlaserförsök och slutligen utfördes försök med IR rökgaspyrometern.

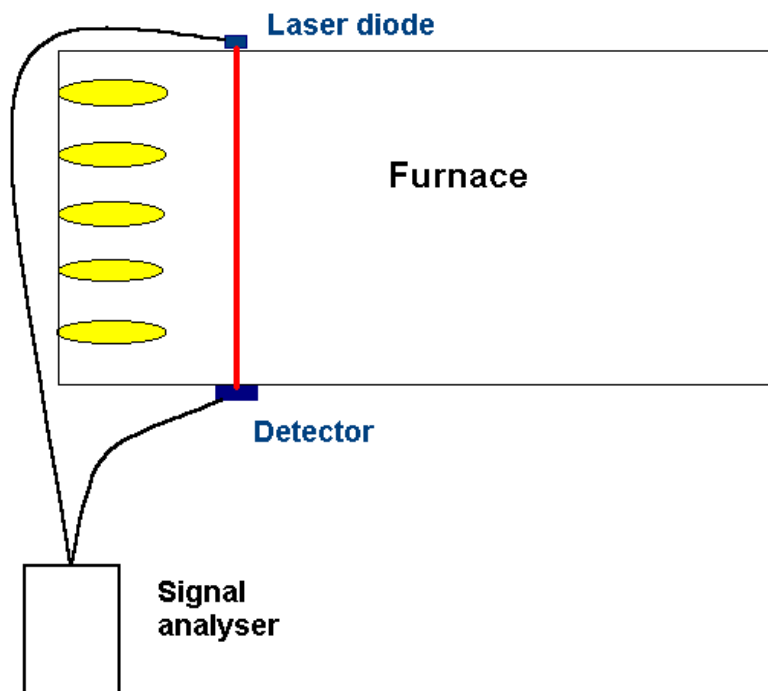


Fig. 3 Skiss av teknik för tillämpning av gastemperaturmätning mha diodlaser i värmningsugnar.

## Syfte och mål

Målet sattes så att forskningens tyngdpunkt inriktades mot optiska metoder med TDLAS som ett exempel. Målet delades upp i flera segment:

- Att utifrån "kedjan" från temperaturgivare till styrsignal eller indata till simuleringsmodell, identifiera problem i olika delar av kedjan.
- Att kartlägga och kvantifiera betydelsen av god temperaturmätningsteknik för energianvändning, högre produktkvalitet, minskad kassation, mm i olika typer av processer och för olika produkter.

- Att granska temperaturmätningssmetoder med tyngdpunkt på optiska metoder, och prova den mest lovande i någon värmningsugn hos valsverken.

### ***Förväntad nytta med forskningen i relation till Energimyndighetens uppdrag att ställa om energisystemet.***

Det finns möjligheter för förbättring av nuvarande reglerpraxis inom ämnesvärmning med hjälp av kontinuerlig gastemperaturmätning. Tanken med detta projekt har varit att låta testa om de tilltänkta teknikerna är tillräckligt mogna för en industriell tillämpning, dvs om de är tillräckligt flexibla, robusta och tillförlitliga. Det finns ett antal potentiella energisparåtgärder inom området ämnesvärmningsugnar som vi kan implementera med hjälp av ett nytt noggrannare sätt att styra ugnen och därvid sänka den genomsnittliga ämnestemperaturen, nämligen:

- minskad mängd primär avbränna med en lägre ämnestemperatur.
- minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp per producerat tonnage p g a lägre bränsleförbrukning.

Energibesparing genom bättre temperaturmätning och därmed en effektivare uppvärmning uppskattas kunna sänka bränsleförbrukning med ca 0,5 %. Med ett lågt räknat 350 kWh/ton värmningsbehov, blir det en energibesparing för 5 Mton/år stål på:

$$0.005 \times 350 \text{ kWh/ton} \times 5 \text{ Mton/år} = 9 \text{ GWh/år}$$

Total energibesparingspotential: 9 GWh/år

En ökad produktkvalitet och mindre kassationer är värt mycket mer än värdet av energibesparingen, vilket borde ge företagen motivation för implementering av denna relativt nya teknik.

## **Referens**

- [1] Niska, J. and Rensgard, A., "TDLAS for combustion gas analysis in a steel reheating furnace", MEFOS, MEF01073, 010906 and presented at the 2001 Joint AFRC Int'l Combustion Symposium, Sept. 2001, Kauai, USA.
- [2] Niska, J., "Laser diode gas analysis for reheating furnaces", Steel Times, V 229, no 7/8, July-August, 2001, p. 251 and MEFOSNews April 2001.
- [3] Sandström, L. and Malmberg, D., "On-line and in situ monitoring of oxygen concentration and gas temperature in a reheating furnace utilizing tunable diode-laser spectroscopy", SPECTROCHIMICA ACTA PART A, Vol 58, 2002, pp 2449-2455.
- [4] Niska, J., "Recent advances in temperature measurement techniques applicable to steel rolling mill furnaces - A short review", MEF02015, MEFOS, Luleå, 2002.
- [5] Mörtberg, M., "Review of techniques for measurements of gas temperatures and temperature gradients in steel rolling mill furnaces", Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.

## **DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION**

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör utbildning, handelspolitik, forskning och utveckling, standardisering, energi och miljö samt skatter och avgifter. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stål-forskningen. 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](mailto:office@jernkontoret.se) · [www.jernkontoret.se](http://www.jernkontoret.se)

