

Utveckling av stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper – Etapp 2

(Energimyndighetens projektnr. 30120-3)

Line Hallgren och Carl-Åke Däcker, Swerea KIMAB
Christer Nilsson, SSAB EMEA

Slutrapport JK 24054, utgiven 2013-12-20

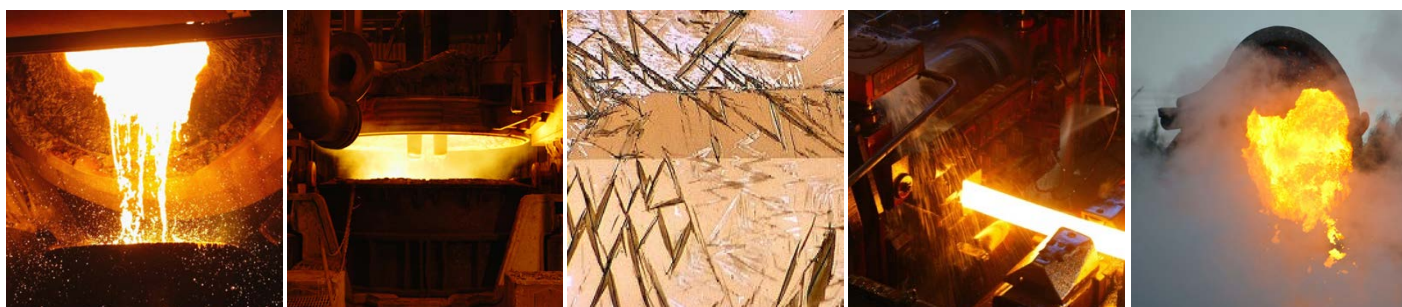


Foto: Stig-Göran Nilsson och Mats Hillert

Sammanfattning

Projektet är en fortsättning på ett tidigare projekt, JK24050, där mjukkyld kokill provades vid stränggjutning vid två svenska stålverk. I detta projekt har två fullskaleförsök gjorts vid SSAB EMEA i Luleå samt en mindre förstudie om sprayteknik av nickelpulver på koppar. Mjukkyllningen gjordes med en svetsad infälld kil av nickel i överdelen av en av breddsidorna på kokillen. Målsättningen med projektet var att:

- Verifiera det värmedämpande nickelskiktets hållbarhet.
- Kartlägga om en förbättring med avseende på ytsprickor kan uppnås för peritektiska stålsorter.
- Studera reglerbarheten vad gäller mjukkyllning; Sprickkänsliga, peritektiska stålsorter, gjuts i den mjukkyllande zonen som dämpar värmeflödet och minimerar risken för ytsprickor. Ferritstelnde stålsorter, med mjukt skal som kräver hård kylning, gjuts under den mjukkyllande zonen.

Vid verksförsöken gjordes dock all gjutning vid den mjukkyllande zonen eftersom processförutsättningarna hade ändrats jämfört med när projektet planerades och det var inte längre möjligt att ändra stålytans nivå i kokillen. Det planerade försöket med en helt mjukkyllande kokill kunde därför inte genomföras.

Slutsatserna från de två kampanjerna var:

- Det är inte lämpligt att gjuta ferritstelnde stålsorter, då skalhängningar uppstod på den mjukkyllda kokillsidan och man var nära genombrott två gånger.
- En klar förbättring angående mängden defekter på den breddsida som låg mot mjukkyllningen på de peritektiska stälarna noterades.

Då det är helt nödvändigt att kunna reglera mjukkyllningen, rekommenderas ytterligare försök med en annan nivåsensor och gjutning på två nivåer. Parallellt bör man också studera bättre tekniker för att applicera nickelskiktet då manuell svetsning, som gjordes i detta fall, blir alldeles för dyrt för att gjutning med mjukkyld kokill ska bli industriellt gångbart. Enligt förstudien om sprayteknik är det möjligt.

Projektet har finansierats av Energimyndigheten (projekt 30120-3) inom programmet Effektivisering av industrins energianvändning – forskning och utveckling, samt SSAB EMEA och Jernkontorets Teknikområde 24Gjutning och stelning

Sökord: Mjukkyld kokill, stränggjutning, peritektiska stål, nickel kil, gjutpulver

Abstract

The project was a continuation of a previous project, JK24050, where a soft cooled mould was tested at two steel works in Sweden. In this project two trials have been carried out at SSAB EMEA in Luleå and a small study about supersonic spraying of nickel alloyed powder on copper substrate. The soft cooling was made with a welded inset wedge of nickel in the upper part of the mould. The goals of the project were to:

- Verify the durability of the soft cooling nickel layer.
- Verify if it is possible to achieve an improvement regarding surface cracks for peritectic steel grades.
- Study the adjustability of the soft cooling effect; Crack sensitive, peritectic steel grades, will be cast in the soft cooling zone which dampen the heat flow and minimize the risk of surface cracks. Steel grades which solidify in a ferritic manner, with a soft shell with a need of strong cooling, will be cast beyond the soft cooling zone.

All castings had to be done within the soft cooling zone due to a change of the level sensor after the project was planned. It was not possible to change the level of the steel meniscus.

The conclusions from the two trials were:

- It is unsuitable to cast ferritic steel with a soft cooling mould since the initial solidifying shell got stuck to the soft cooled mould during the trial. This almost resulted in two breakthroughs during the casting of one heat.
- There was an obvious improvement of the surface quality on the side that was casted on the soft cooled side of the mould for the peritectic steels.

As it is absolutely necessary to be able to adjust the soft cooling it is recommended to make further trials with a level sensor that makes it possible to cast on two different levels. A parallel activity should be to explore better techniques for application of the soft cooled nickel layer while manual welding, which was made in this case, will be too expensive for making soft cooled casting an industrial alternative in the future. Accordingly to the study about supersonic spraying it is very much possible.

The project was financed by the Swedish Energy Agency (project 30120-3), SSAB EMEA and Technical area 24 Casting and solidification within Jernkontoret.

Keywords: : Soft cooled mould, continuous casting, peritectic steel, nickel wedge, casting powder

Innehåll

1.	INLEDNING	6
2.	”STATE OF THE ART” - METODER ATT MINSKA VÄRMEFLÖDET FRÅN STÅLSKAL TILL KOKILL – ”MJUKKYLD KOKILL”	6
2.1.1.	Gjutpulver med lågt värmefflöde	7
2.1.2.	Varierad kyleffekt i kokill	8
2.1.3.	Kokillmaterial med låg värmeledningsförmåga	8
2.1.4.	Räfflad kokill	8
2.1.5.	Ytbelagd kokill.....	8
2.1.6.	Meniskfri gjutning.....	9
2.1.7.	EMC (elektromagnetisk gjutning).....	9
3.	TIDIGARE ARBETEN MED MJUKKYLD KOKILL AV SWEREA KIMAB	10
4.	MÅL.....	11
5.	METOD.....	11
5.1.	Kokillen	12
5.1.1.	Utformning av den mjukkylande nickelkilen i kopparplattan.....	12
5.1.2.	Temperaturmätningar i kokillen.....	14
5.2.	Stål	14
5.3.	Gjutpulver	16
5.4.	Förstudie om sprayteknik av nickelpulver på koppar	19
6.	FORSKNINGSRESULTAT.....	19
6.1.	Försöksupplägg.....	19
6.2.	Försök A	19
6.2.1.	Processvariabler	20
6.2.2.	Stålsort.....	20
6.2.3.	Gjuttemperaturer	21
6.2.4.	Syning av slabs.....	21
6.2.5.	Gjutpulver och gjutslaggtjocklek	22
6.2.6.	Gjuthastighet	23
6.2.7.	Värmefflöde i kokill	24
6.2.8.	Temperaturmätningar i kokill.....	25
6.3.	Försök B.....	27
6.3.1.	Processvariabler	27
6.3.2.	Stålsort.....	27
6.3.3.	Gjuttemperaturer	27

6.3.4.	Syning av slabs.....	28
6.3.5.	Gjutpulver och gjutslaggtjocklek	29
6.3.6.	Gjuthastighet	30
6.3.7.	Värmeflöde i kokill	30
6.3.8.	Temperaturmätningar i kokill.....	31
6.4.	Resultat från förstudie om sprayteknik av nickelpulver på kopparplatta.....	33
7.	SLUTSATSER	33
8.	FÖRSLAG PÅ FORTSATTA FORSKNINGSINSATSER OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER	34
8.1.	Tidsram för implementering av mjukkylande kokill	34
8.2.	Förslag på fortsatt arbete.....	34
	TACK TILL	35
9.	REFERENSER	36
	Bilaga 1 – Projektorganisation och medverkande	38
	Bilaga 2 - En rapport har om sprayteknik av nickelpulver på koppar	39
	Experiments	39
	Test material	39
	Spray equipment and set-up.....	40
	Metallographic analysis	41
	Tensile adhesion test	44
	DISCUSSION	44
	CONCLUSIONS.....	45

1. INLEDNING

Vid svenska stålverk gjuts många olika stålsorter och det finns en trend som går mot att produktionen av högkvalitativa stålsorter ökar. Detta ställer ökade krav på gjutteknologin för att kunna gjuta stålämnen av hög kvalitet som kräver lite efterbearbetning och har låga kassationer.

Olika stålsorter kräver olika förutsättningar vid gjutningen för att kvaliteten på det gjutna ämnet ska bli bra. Vissa stålsorter, t ex stål som har ferritiskt stelrande, kräver hård kylning så att det bildas ett tjockt stålskal i kokillen, eftersom ferritiskt stelrande stål har låg hållfasthet vid höga temperaturer. Detta är ganska lätt att åstadkomma då stålet gjuts i kopparkokill som har ett högt värmeöverföringstal.

När det gäller stålsorter som i hög grad stelnar peritektiskt, sk peritektiska stål, är situationen annorlunda. Ytdefekter är ett stort problem för dessa stålsorter. Ytdefekter som innebär att stålämnen måste slipas, vilket är kostsamt energimässigt, eller ännu värre att hela stålämnen måste kasseras. När det gäller peritektiska stål är en del av problematiken att stålskalet stelnar ojämnt. Detta är ett resultat av att;

- a) Omvandlingen från ferrit till austenit skapar ett fyra gånger starkare skal [1,2]
- b) Den peritektiska omvandlingen ger en krympning på maximalt 0,5 vol- %.

Detta fenomen förstärks genom en frångrympning från kokill och ökat gasgap vilket ger upphov till stor skillnad i värmeflödet.

Utskiljning av respektive fas; ferrit och austenit, kan påverkas av stelningshastigheten. Detta har påvisats av Hasse Fredriksson bl. a. för rostfria stål[3]. I den undersökningen konstaterades att det bildades ferrit vid höga stelningshastigheter medan man vid lägre hastigheter fick en primär utskiljning av austenit. En minskad svalningshastighet dämpar de spänningar som ger upphov till ojämn skaltillväxt. En mjukkylande kokill skulle därför kunna innebära en stor förbättring när det gäller ytkvaliteten på stränggjutna ämnen.

2. "STATE OF THE ART" - METODER ATT MINSKA VÄRMEFLÖDET FRÅN STÅLSKAL TILL KOKILL – "MJUKKYLD KOKILL"

Vid tidigare arbete om mjukkylning i kokill har Carl-Åke Däcker skrivit en genomgående litteraturstudie av tidigare arbeten [4].

Vid genomgång av litteratur angående metoder att undvika ytfel vid stränggjutning av stål möts man ofta av rådet: "Undvik att gjuta stål med hög grad av peritektisk omvandling!"

Detta är naturligtvis också en fråga om materialdesign. Om vi skulle starta med dagens kunskaper och utveckla ett produktprogram för ett stålbolag med utgångspunkt från dess gjutbarhet så skulle man troligtvis undvika dessa stålsorter. De produkttegenskaper man eftersträvar går ofta att få fram med andra legeringskombinationer.

I verkligheten har dock utvecklingen ofta varit den motsatta, dvs. produktutvecklarna utvecklar ett stål utan större hänsyn till de problem det skapar vid ämnesframställningen. Detta är inget unikt för stålbranschen utan de flesta gjutare av komponenter upplever samma problematik, dvs. att produkter konstrueras utan hänsyn taget till gjutbarheten.

De flesta stålverk är dock nu inkörda på sina peritektiska stål och har små möjligheter att göra något åt detta utan man får lära sig att ”gilla läget”. Detta ställer därför extra stora krav på hög kompetens vid stränggjutningen vilket i och för sig höjer nivån på all övrig ämnesproduktion.

Behovet av att minska värmeflödet är således inte nytt och genom åren har ett stort arbete lagts ner på att finna metoder att dämpa och kunna styra värmeflödet för de peritektiska stålsorterna. Man kan indela de olika metoderna i följande huvudrubriker:

- Gjutpulver med låg värmetransportförmåga.
- Varierad kyleffekt i kokill.
- Kokillmaterial med låg värmeledningsförmåga.
- Räfflad kokill.
- Ytbelagd kokill.
- Meniskfri gjutning.
- EMC (Electro Magnetic Casting).

Om man vill läsa mer om de olika metoderna finns en bra redogörelse för dessa i den tidigare nämnda litteraturstudien. Nedan följer en kort sammanfattning om för och nackdelar för respektive metod

2.1.1. Gjutpulver med lågt värmeflöde

Med ledning av Manfred Wolfs rekommendation [5, 6] är den dominerande metoden att gjuta peritektiska stål idag användandet av gjutpulver som dämpar värmeflödet från det stelnde stålskalet till den vattenkylda kokillen. De egenskaper i slaggen som skapar en dämpning av värmeflödet är:

- Hög kristallisationstemperatur vilket medför ett tjockt stelnat slaggsikt.
- Hög grad av kristallinitet för att minimera värmeflödet genom strålning.

Även om kristalliserande gjutpulver idag är den dominerande metoden att dämpa värmeflödet så är denna ur processteknisk synpunkt inte kontrollerad, styrbar eller ens en pålitlig metod av följande skäl:

- Tjockleken, och därmed värmeflödet styrs med viskositeten och kristallisationsegenskaperna med mycket begränsade möjligheter. Dels måste viskositeten anpassas till att ge en lämplig smörjning i kokillen, dels kan inte kristallisationsgraden drivas för långt då det stelnade slaggsiktet blir för sprött.
- Hög kristallisationstemperatur medför också att det smälta slaggsiktet minskar i tjocklek vilket leder till försämrade smörjning i kokillen.
- Tjockleken styrs också främst av den spalt som bildas mellan kokill och skal vilket i sin tur är en funktion av gjuthastigheten. Lägre gjuthastighet ger tjockare skal, mera krympning och större spalt. Detta innebär att varierande gjuthastigheter leder till varierande värmeflöde.
- Gjutmaskinerna är ofta inte helt symmetriska utan av mekaniska skäl får man ett varierat tryck på olika kokillsegment. Detta leder till varierande tjocklek på gjutpulversiktet och som en konsekvens av detta ett varierat värmeflöde.

2.1.2. Varierad kyleffekt i kokill

Man kan tänka sig att det skulle vara möjligt att variera kylningen i kokill genom att variera kylvattenflödet i kokill eller variera tjockleken i kokillen. Praktiskt sett har detta inte funnit någon praktisk betydelse då påverkan på den totala kylningen inte är särskilt stor. Man kan ej heller köra med för låga flöden då detta medför ångbildning i kylkanalerna vilket leder till mycket dålig kylning med överhettade kokiller till följd. Detta medför kortare livslängd för kokillplattorna då koppar börjar mjukna redan vid 300 °C

2.1.3. Kokillmaterial med låg värmeledningsförmåga

Alla kokiller idag tillverkas av koppar då detta visats sig vara den mest ekonomiska lösningen då den dels leder värme bra dels är lätt att bearbeta. Koppar har dock begränsningen att den tappar i hållfasthet och hårdhet vid överhettning vilket medför ett ökat slitage. Praktiskt sett bör yttemperaturen på kopparen ej överstiga 300 °C. Nackdelen för peritektiska stål är att denna låga yttemperatur medför en för hög stelnings-/svalningshastighet.

Ett omfattande försök att designa och prova en kokill med en lågkonduktiv metallegering har gjorts av Akira Yamauchi på Kawasaki Steel Corporation och finns med i hans doktorsavhandling från KTH [7]. Som kokillmaterial valdes en nickelbaserad superlegering (718).

Resultatet från försök med den nickelbaserade superlegeringen som kokillmaterial var att värmeflödet minskade med ca. 40 % både i menisknivå och som medelvärde längs hela kokillen samtidigt som variationerna i värmeflödet minskade med ca. 75 %.

Ytkvaliteten på stålämnena blev markant förbättrad och detta återspeglade sig också beträffande andel längdsprickor som minskade kraftigt.

2.1.4. Räfflad kokill

Ett annat sätt att dämpa värmeöverföringen är att använda en kopparkokill med räfflad yta. På detta sätt kan framförallt luftgapets tjocklek ökas och värmeflödet dämpas genom luftens goda isolationsförmåga ($0.024 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ vid rumstemperatur).

Denna metod har provats i ett antal undersökningar[8-13]. Den allmänna uppfattningen var att räfflade kokiller gav lägre värmeflöde och något förbättrad ytkvalitet på ämnen och plåt. Den räfflade kokillen kunde även ge högre friktion ibland och resultatet påverkades av utformningen av räfflorna.

2.1.5. Ytbelagd kokill

Vid ytbeläggning av kokill har material som rostfritt stål, keramiskt material samt nickel testats. Det verkar dock vara så att nickelbaserade beläggningar har studerats mest. Anledningen till detta är att den används frekvent som slitageskydd och för att undvika att koppar tränger in i stållytan (rödskörhet). Vid dessa fall har inte mjukkyllning varit den främsta anledningen till försök och kokillens design har anpassats så att man ändå får liknande temperatur på kokillplattans yta som vid användning av kopparkokill. Nickelskiktet ger ändå en mjukare kylning av stålaskalet. Ett bra exempel med nickelbeläggning i kokillen är SSAB EMEA i Luleå. Ytdefekterna på stålämnena minskade drastiskt efter införande av kokill med nickelbeläggning 2012, se Tabell 1.

Tabell 1. Utveckling av ämnesytfel för stålkod 38422

		[%]		
Stålkod	2013	2012	2011	2010
38422	7,29%	9,90%	33,33%	35,92%

Metoden att använda ytbeläggning gav minskat värmefflöde i många fall och man fick också ett klart minskat djup på oscillationsmärkena. Svårigheten låg dock i att få tjockare skikt av beläggningen att tåla slitaget i kokillen då kraftiga sprickor uppstod i nickelskiktet vid menisken och det keramiska materialet var sprött och känsligt för termochock.

2.1.6. Meniskfri gjutning

Försök med meniskfri gjutning, med direkt koppling mellan gjutlåda och kokill, för tillverkning av runda ämnen har gjorts hos Sumitomo Metal Industries [14] med en mjukkylande keramisk kokill. Med meniskfri gjutning flyttas stelningsfronten från smältytan. Detta innebär följande fördelar:

- Nivåvariationer och skvalp inverkar inte negativt på stelningsfronten.
- Gjutpulverneddragningar och variationer i gjutpulverfunktion undviks.
- Inverkan av ytspänningsfaktorer undviks.

Med keramisk insats dämpas också värmefflödet och ett mycket lugnt stelningsförlopp uppnås.

Vid jämförande försök med de två keramiska insatserna samt en ren kopparkokill kunde man konstatera en betydligt lägre stelningshastighet utifrån utvärdering av sekundärarmsavstånd för dendriterna. Resultatet blev att en mycket jämn stelningsstruktur uppnås helt utan oscillationsmärken och makrosegringseffekter vilket i sin tur medförde helt defektfria ämnesytor.

Nackdelen man upplevde med den keramiska insatsen var att det stelnade stålskalet var mycket mjukt och känsligt för varmsprickbildning där hög friktion mot den keramiska kokillen säkert bidrar. Detta krävde utveckling av en speciell rörelsestrategi för kokillen i stegform till skillnad mot den normalt sinusformade kokillrörelsen.

I ett gemensamt projekt mellan IRSID och CRM har man vidareutvecklat meniskfri gjutning med kopparkokill och uppger sig ha nått bra resultat trots den snabba kylningen[15].

2.1.7. EMC (elektromagnetisk gjutning)

Elektromagnetisk gjutning, där man placerar en spole utanför kokillen för att påverka meniskbildningen har studerats främst i Japan. Denna teknik används för gjutning av aluminium och bevekelsegrunden för att överföra tekniken till stål-gjutning är att den påverkar meniskbildningen på två positiva sätt. Dels dras menisken in från kokillen och skapar en större spalt mellan kokill och stålskal vilket kan fyllas med gjutslag, dels värms menisken induktivt vilket minskar dess längd. Denna metod har provats i ett antal undersökningar[16-21].

3. TIDIGARE ARBETEN MED MJUKKYLD KOKILL AV SWEREA KIMAB

Detta projekt - *Utveckling av stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper – Etapp 2* - är en fortsättning av projektet *JK24050 Utveckling av stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper för gjutning av sprickkänsliga stål*. [22]

Målet med det tidigare projektet var att utveckla ett kokillkoncept, som medger en mjukare kylning av det först bildade stålskalet, vilket minskar risken för spänningar och sprickbildning, med ambitionen att kunna halvera energiförbrukningen för ämnesytfel. Det valda tekniska konceptet för detta ändamål var att fälla in ett värmedämpande skikt i överdelen av kopparkokillen bestående av en metall med låg värmeledningsförmåga som rostfritt stål eller nickel.

Projektet bedrevs under tiden 2006-12-06 till 2010-10-31 inom Stålindustrins Energiforskningsprogram 2006-2010. Projektet finansierades av Energimyndigheten med 4 miljoner kronor och av stålindustrin med 15 miljoner kronor. Forskningsutförare var Swerea KIMAB och de deltagande företagen var Outokumpu Stainless Avesta Works, Sandvik Materials Technology och SSAB EMEA Luleå och Oxelösund. Jernkontoret var administrativ koordinator.

De verksförsök som utfördes inom projektet var:

- Driftsförsök med en mjukkyld smalsida hos SSAB EMEA Oxelösund omfattande 9200 ton (42 charger).
- Driftsförsök med en mjukkyld breidsida hos SMT omfattande 3 charger rostfritt stål och 3 charger kolstål.
- Driftsförsök med en smalsida hos Outokumpu Stainless i Avesta med ett värmedämpande skikt applicerat med ”supersonic spray” teknik.

Inom projektet utfördes även modellering och design av det värmedämpande skiktet. Resultaten från projektet kan kortfattat sammanfattas enligt följande:

- Tekniken med mjukkylning i överdelen av kokillen kan reducera värmeflödet i denna del med ca. 20 % vid en tjocklek av det värmedämpande skiktet på 8-9 mm. Denna skiktjocklek resulterar i en yttemperatur på ca. 850 °C, vilket är utan risk om materialet består av värme-tåligt rostfritt stål eller nickel.
- Tekniken med mjukkyld kokill har potential att gjuta sprickkänsliga stålsorter med betydligt lägre variationer i värmeflöde genom att undvika starkt kristalliserande gjutslaggar och låta den mjukkylda kokillen stå för värmedämpningen.
- Det mjukkylda skiktet kan appliceras med svetsning vilket dock innebär att nickel måste väljas som värmedämpande material beroende på höga kopparhalter i svetsen. ”Supersonic spray” kan vara en alternativ beläggningsteknik, men ett misslyckat försök i Avesta med denna teknik påvisade vikten av processutveckling för att skapa fungerande skikt.

Fortsatta aktiviteter med mjukkyld kokill föreslogs genomföras vid SSAB i Luleå i ett fortsättningsprojekt med lågkristalliserande gjutslaggar och mjukkyld kokill för gjutning av sprickkänsliga peritektiska gjutsorter.

Anledningen till att fortsättningsprojektet skulle ske i Luleå vara att deras kokill är lång (900mm) och att man därför kan gjuta med stålmensken mellan 650 till 800 mm från den nedre kokillkanten. Detta gör det möjligt att gjuta både på ett eventuellt infällt skikt av

värmedämpande material samt under på kopparkokillen utan att man behöver byta kokill. På så sätt får man en kokill som har både hård- och mjuk kylning. Detta är en viktig aspekt eftersom detta gör det möjligt att skapa en flexibel kokill som kan anpassas till att gjuta både ferritiska och peritektiska stål i sekvens, dvs utan att behöva avbryta gjutningen.

För att bana väg för en snabb framtida implementering gjordes en feasibility study för SSAB EMEA i Luleå. Där kom man fram till att det skulle vara möjligt att ändra stålnivån i kokillen under gjutning.

4. MÅL

Projektets övergripande mål är att undersöka om det är möjligt att minska energianvändningen vid stränggjutning av stål med 40 GWh el/år genom att införa ett koncept med mjukkylande kokill i en slabskokill med en bredd om 1000 – 1600 mm genom att verifiera:

- Det värmedämpande skiktets hållbarhet under en kampanjlängd,
- Om en värmefflödessänkning på 25% kan erhållas i det mjukkylande segmentet
- Att det är möjligt att minska andelen ytsprickor för känsliga stålsorter som exempelvis mikrolegerade peritektiska stål.
- Reglerbarheten vad gäller den mjukkyllning som erhålls genom gjutning på olika nivåer i kokillen med varierande kontakt med det mjukkylda segmentet.

Fullskaleförsök skall i en första etapp utföras med en mjukkyld bredd hos SSAB EMEA i Luleå. Efter denna etapp utförs en analys av förutsättningarna att göra försök med en helt mjukkylande kokill. Försök med en sådan genomförs hos SSAB EMEA i Luleå om analysen av den första etappen visar att detta är möjligt.

Vad skall projektet leverera?

- Utveckling av en driftssäker och väl fungerande stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper i övre delen av kokillen.
- Utveckla en kokill med varierad kylning på olika nivåer i kokillen
- Utveckling av en processföring där en kombination av mjukkylande kokill och för ändamålet anpassad gjutslag medför att det först stelnade stålskalet får en optimal kylning och smörjning och därmed minimal risk för sprickbildning i ämnesytan.
- Om försöken anses vara lyckade skapa förutsättningar för implementering av konceptet mjukkylande kokill hos SSAB EMEA i Luleå och därmed skapa en demonstrationsanläggning som kan tjäna som inspirationskälla för övriga i projektet deltagande stålföretag (Outokumpu Stainless Avesta, Sandvik Materials Technology och SSAB EMEA Oxelösund).

5. METOD

Det finns många olika faktorer som påverkar utfallet vid stränggjutning. I de försök som har utförts inom detta projekt ligger fokus på att anpassa kokillen så att dess kylning blir optimal för den stålsort som gjuts. Även gjutpulvret är en mycket viktig del i gjutprocessen eftersom

den ger smörjning mellan kokill och stålskal, isolering av stålytan samt påverkar värmeöverföringen till kokillen.

5.1. Kokillen

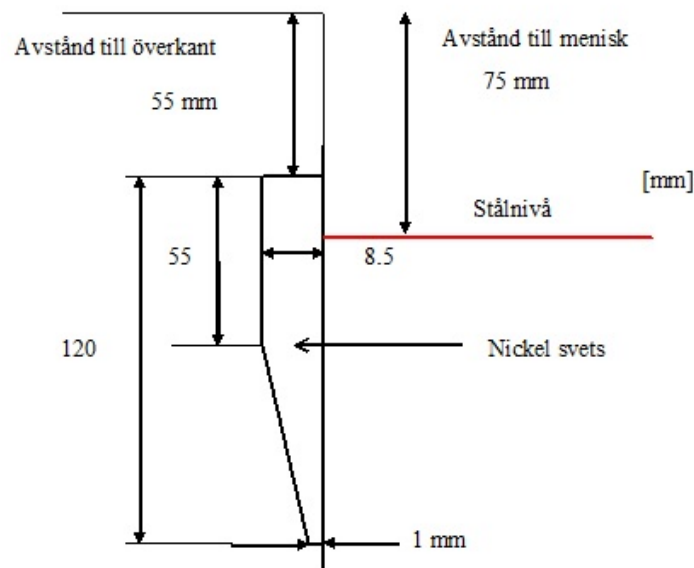
5.1.1. Utformning av den mjukkylande nickelkilen i kopparplattan

Kokillen som användes i försöken var en vanlig kokill, men kopparplattan på den lösa breddsidan, d.v.s. breddsidan mot den korta radien i gjutmaskinen, var i överdelen försedd med material med lägre konduktivitet. I detta fall användes nickel. Nickelkilen var infälld i kopparplattan längs med hela breddsidan som ett 120 mm brett band. Profilen på nickelkilen var utformad enligt Figur 1, och den var placerad i nivå med menisken.

Tillverkningen av kokillplattan började med att kokiltillverkaren KME fräste ut kilen ur kopparen på en kokillplatta. Sedan svetsades nickel i kilen hos SSAB EMEA i Oxelösund. Plattan slipades och monterades i kokillen hos SSAB EMEA i Luleå.

I Figur 2 och Figur 3 kan visas kilen i kokillen. Dessa bilder är tagna före det andra försöket men efter det första. Inget slitage kunde ses på kilen efter något av försöken.

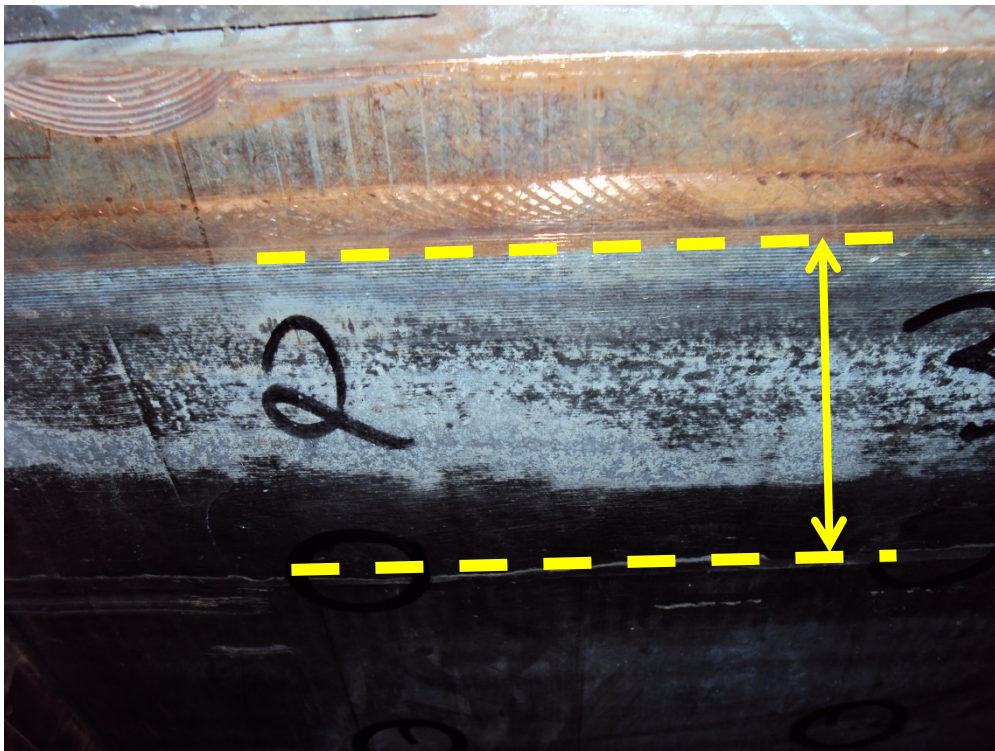
Vid försöken bildades dock en slaggrim som var ca 30-40 mm bred längs med hela kilen och ca 2-3 mm tjock. Den bildades antagligen pga den högre temperaturen i kokillytan.



Figur 1. Beskrivning av nickelkilens form och placering i kokillens kopparplatta.



Figur 2. Kokillplattan med nickelkil innan andra försöket (2013-11-21)



Figur 3. Närbild på kilen i kokillen (från rutan i Figur 2)

5.1.2. Temperaturmätningar i kokillen

Med hjälp av Mould Expert systemet mäts temperaturen i tre termoelementrader, 180 mm, 316 mm och 452 mm från kokillens överkant.

Inbörningsdjup: Man har en konvex (fastsida) och en konkav (lössida) breddsidesplatta som är ytbelagd med 2 mm nickel. På den konvexa plattan är termoelementen inbörade 12 mm. Man vet dock inte totaltjockleken på plattan (Cu+Ni), så de sitter (x-12 mm) från kokillytan. På den konkava plattan sitter termoelementen direkt an mot dennas utsida och är alltså på avståndet x mm från kokillytan. Termoelementen på smalsidan är i höjddled placerade 180 mm, 297 mm och 432 mm från smalsidans överkant. I breddled är de placerade 55 från breddsidan, d.v.s. med ett avstånd sinsemellan på 110 mm. De är inbörade 24 mm från bakplanet och befinner sig således x-24 mm från kokillytan. I Figur 2 kan man se var termoelementen är placerade på kokillplattan, då de är utmärkta med vita ringar.

I Tabell 2 ges matrisen för termoelementplaceringarna med beteckningar. Övre raden står för avståndet från centrum medan vänstra kolumnen står för avstånd från kokillens överkant.

Tabell 2. Termoelementbeteckningar från Mould Expert.

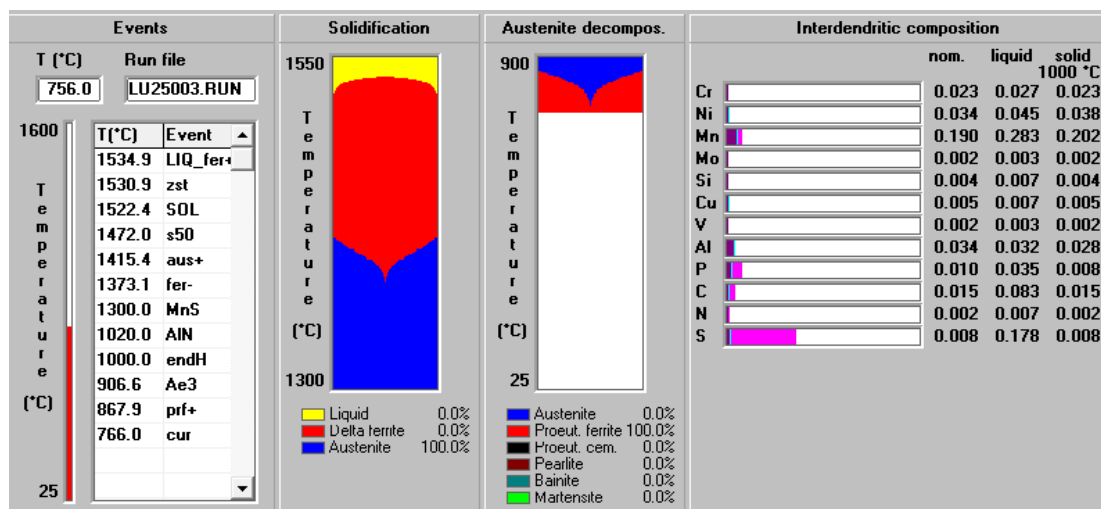
	-658	-470	-282	-94	94	282	470	658
180	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)
316	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)
452	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)

Då kokillbredden för försökschargerna ändrades under gjutningen, kunde vissa charger bli så smala att de hamnade innanför termoelement 1 och 8. Det kan även medföra att de yttre termoelementen har något lägre värde.

5.2. Stål

I det följande görs en analys av hur stelnandet av ferritiskt och peritektiskt stelnande stål ser ut och hur det påverkar de mekaniska egenskaperna.

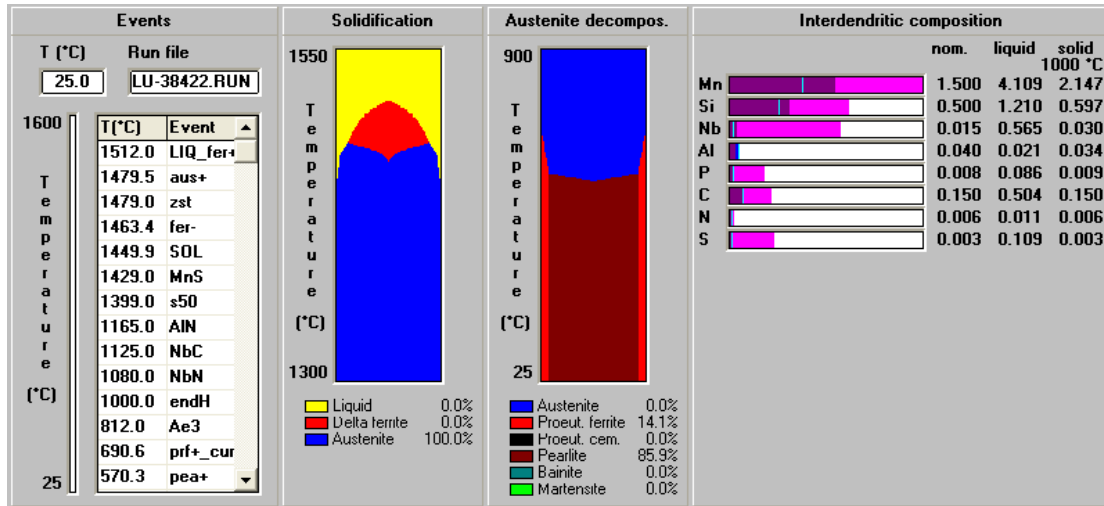
Simulering med IDS baserat på riktanalysen för ferritiskt och peritektiskt stelnande stål visas i Figur 4 och Figur 5.



Figur 4. Stelnings- och svalningsberäkning av internsort 25003 med IDS.

Kommentarer baserat på IDS-simuleringen Figur 4:

- Stålsorten steltnar initialt till δ -ferrit vid 1535 °C och fortsätter hela stelndet som ferrit ner till 1415 °C då en omvandling till austenit börjar, detta är dock ganska långt ner i kokillen så skalet är mjukt och trycks ut mot kokillplattan.
- Mikrosegringen är låg då diffusionen är snabb i den ferritiska fasen.



Figur 5. Stelnings- och svalningsberäkning av internsort 38422 med IDS.

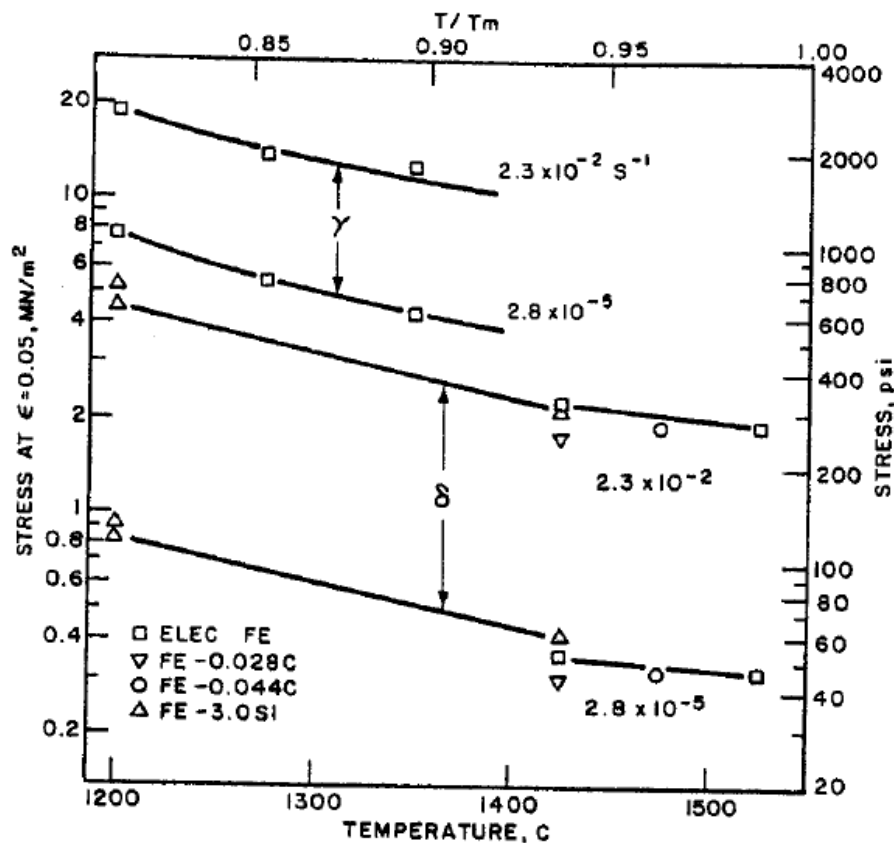
Kommentarer baserat på IDS-simuleringen Figur 5:

- Stålsorten steltnar initialt till δ -ferrit vid 1512 °C. Vid 1480 °C börjar den peritektiska reaktionen $L + \delta$ -ferrit \rightarrow austenit. Den peritektiska reaktionen är sedan mycket snabb och en total omvandling till austenit sker inom ett mycket kort temperaturintervall på 16 °C. Slutstelndet sker sedan till ren austenit
- Mikrosegringen är relativt kraftig p.g.a. den höga manganhalten och vid 1000 °C kommer Mn-halten mellan dendritarmarna att vara 43 % högre än nominell analys.
- Enligt beräkningarna kommer partikelutskiljningar att ske av MnS, AlN, NbC och NbN.
- Den proeutektoida fasomvandlingen till ferrit sker vid 691 °C och uppgår till 14 % innan perlitomvandlingen startar.

Wray studerade först varmhållfastheten för austenit i stål vid höga temperaturer (>1200 °C) och därefter varmhållfastheten för ferrit i stål. Detta gjordes på provstavar i en vacuumugn med inert atmosfär med olika dragtemperaturer och deformationshastighet. En sammanfattning av dessa två undersökningar ges i Figur 6. [1]

Baserat på dessa undersökningar gav Wolf [5, 6] följande förklaringar:

- Ferrit är ca. fyra gånger mjukare än austenit, vid dessa höga temperaturer.
- En maximal hållfasthet uppnås vid en kolhalt på ca. 0.10 % där stelningsintervallet fortfarande är litet och mikrosegringsgraden låg.
- Vid högre kolhalter ökar stelningsintervall och mikrosegringsgrad vilket åter ger ett svagare skal.
- Utifrån detta sker valet av optimal kylning av stålskalet i kokillen.



Figur 6. Sträckgräns ($\epsilon=0.05$) som funktion av temperatur och töjningshastighet för austenit och δ -ferrit.

5.3. Gjutpulver

Som gjutpulver användes tre olika gjutpulver, varav tre i det första och ett i det andra försöket. De gjutpulver som användes visas i Tabell 3.

- Sinthesis PS5 är det normala gjutpulvret för tillverkning av peritektiska stålsorter. Gjutpulvret ger en kristallin gjutslag som har låg värmeledningsförmåga, och på så sätt bidrar till en mjukare kylning i kokillen. Effekten av gjutslagen är dock ojämn över kokillsidorna och instabil då den ändras under gjutningens gång då det tar tid att bygga upp det slaggrim som finns vid menisken.
- ST-SP/222 är det normala pulvret för gjutning av ferritiska stål. Gjutpulvret ger en amorf gjutslag som har hög värmeledningsförmåga, som bidrar till en hårdare kylning av stålskalet.
- Scorialit SPH-SL 481/LC-LU är det gjutpulver som används till lågkolhaltiga ferritiska stål

De kemiska sammansättningarna är tagna ur produktbladen. I tabellen finns även beräknad basisitet, viskositet samt maximal teoretisk mängd cuspidinhalt (ett mått på hur kristallin/amorf gjutslagen är) i gjutslagen.

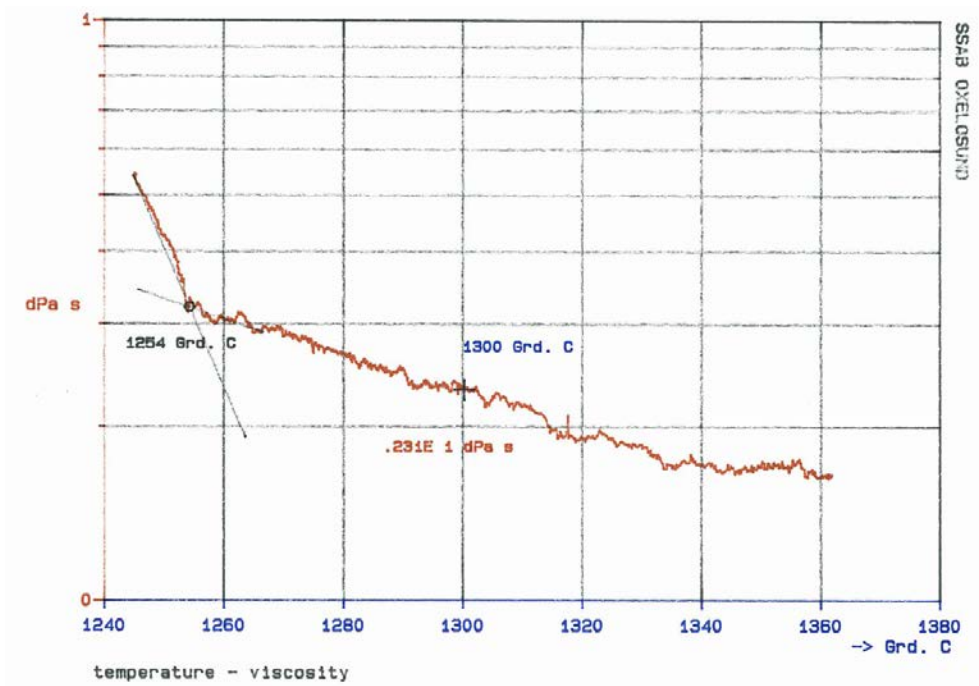
Tabell 3. Sammanställning av gjutpulver

	Sinthesis PS5 AT	ST-SP/222	Scorialit SPH-SL 481/LC-LU
SiO ₂	32,3	36,32	35,50
CaO	40,3	32,68	30,59
MgO	2,5	0,72	2,95
Al ₂ O ₃	3,3	4,11	4,00
Fe ₂ O ₃	0,5	1,11	0,75
Na ₂ O+K ₂ O	5,5	12,97	13,75
S	0,2	0,01	0,00
F	7,5	8,58	8,00
C _{tot}	6,0	6,01	4,00
C _{free}	4,3	4,00	1,50
H ₂ O	0,4		
IL	10,8		
CaO/SiO ₂	1,25	0,90	0,86
Max. teoretisk cuspidin halt	71,7%	46,9%	44,4%

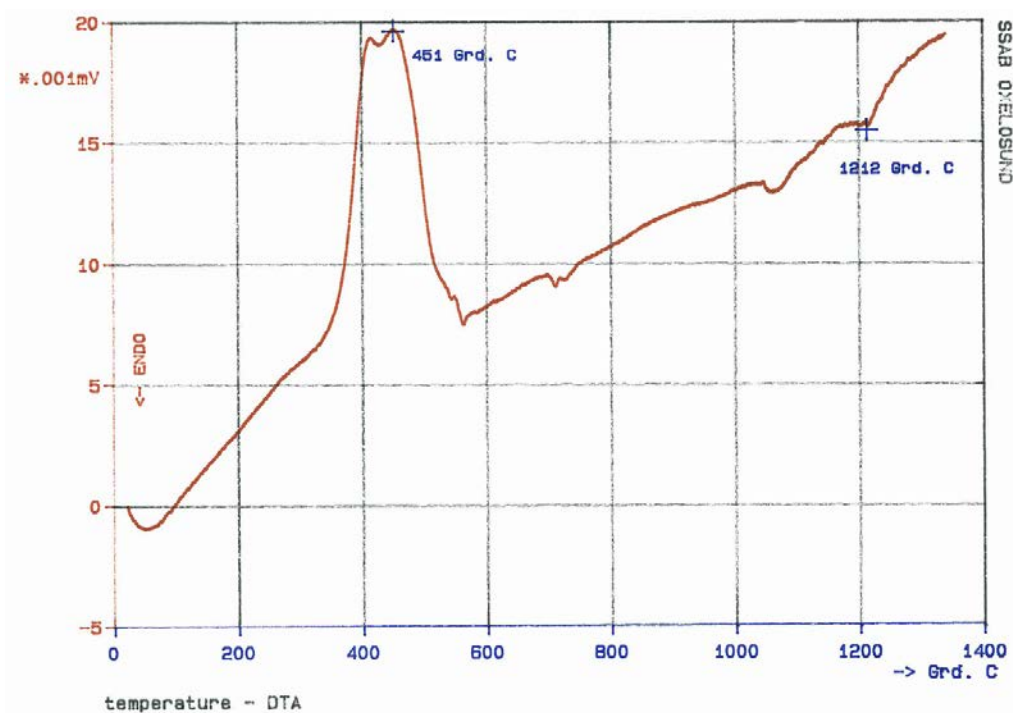
Tabell 4. Fysikaliska egenskaper för gjutpulver Sinthesis PS5 AT.

Smältegenskaper	Sinthesis PS5 AT	ST-SP/222	Scorialit SPH-SL 481/LC-LU
Mjukningstemperatur	1110-1130 °C	1060	1000
Smälttemperatur	1180-1200 °C	1105	1080
Flyttemperatur	1210-1230 °C	1140	1120
Beräknad viskositet (Riboud)			
1300 °C [Poise]	1.17	1,2	1,1
1400 °C [Poise]	0.72	0,75	0,7
1500 °C [Poise]	0.47	0,49	0,5

Vid en tidigare undersökning (2008-01-02) undersöktes det gjutpulver som används till peritektiska stål vid SSAB EMEAs laboratorium i Oxelösund varifrån viskositetskurvan i Figur 7 härstammar. I Figur 8 redovisas resultatet från DTA undersökningen som genomfördes vid samma tillfälle.



Figur 7. Uppmätt viskositet för gjutpulver Synthesis PS5 AT.



Figur 8. DTA för gjutpulver Synthesis PS5 AT.

Kommentarer:

- PS5 AT är ett högbasiskt gjutpulver som kombinerat med relativt högt fluorinnehåll medför hög kristallisationsgrad och en hög teoretisk cuspidinandel som också innebär en hög bryttemperatur på 1254 °C som ses i Figur 7.

- Hög basicitet medför också låg polymerisationsgrad och därigenom en låg viskositet med litet temperaturberoende. Uppmätt viskositet vid 1300 °C enligt Figur 7 är 1.45 Poise.
- Från DTA-kurvan i Figur 8 kan man utläsa att den fria kolhalten så gott som enbart består av kimrök som har en låg förbränningstemperatur.
- ST-SP/222 är ett lågbasiskt gjutpulver med amorf karaktär. Att använda detta pulver vid gjutning av peritektiska stål ger normalt dåliga ämnesytor eftersom slaggen leder värme bra, vilket ger en hård kylning. Nickelkilen gör det dock möjligt att använda en amorf gjutslag med goda smörjande egenskaper, då nickelkilen står för mjukkylningen. Däremot kan detta i denna försöksupställning ge sämre yta för bredsida på den fasta sidan då det är hårdare kylning med ordinarie kokillplatta.

5.4. Förstudie om sprayteknik av nickelpulver på koppar

Målet för förstudien av att undersöka om supersonic spray teknik kan användas till att belägga en kopparplatta med nickelpulver. I försöket användes en AC-HVAF, M3 (Activated Combustion High-Velocity Air-Fuel, Mach 3) spray system från UniqueCoat technologies.

Två olika typer av nickellegeringar användes vid försöket. Den ena kallas för hård nickel (Ni-Cr-Si-B legering) och den andra kallas för mjuk nickel i rapporten (Ni-Si-B legering). Den hårda nickel legeringen var en blandning med 40% aluminiumoxidpulver och hårt nickel pulver. I den mjuka nickel legeringen var inget aluminiumoxidpulver tillsatt. Aluminiumoxidpulvret fungerar som blästermedel under sprayning och ger förbättrad beläggning för pulver med relativt hög kromhalt.

Resultaten från försöken visar att vidhäftningen mellan kopparplatta och en 3 mm tjock nickelbeläggning är god (över 35 MPa). Detta gällde för både den mjuka och hårda legeringen. Porositeten var i storleksordningen 5-8%.

6. FORSKNINGRESULTAT

Man har ofta problem med stålsorter med en kraftig peritektisk reaktion då sprickor uppkommer i hörnen och 100-150 mm in på bredsida. Sprickorna återfinns ofta i oscillationsmärkena och upptäcks endast av k-drag som sedan tas bort med syrgashyvlning. I syfte att förebygga dessa defekter genomfördes försök med en kokillplatta som ger mjukare kylning vid menisken i kokillen. I försök A testades även att gjuta lågkolhaltigt stål med ferritiskt stelnande.

Chargevikten vid SSAB i Luleå är ca.130 ton och gjutröret som användes är ett MgO-förstärkt tvåhålsrör (60*80 mm) utan kopp med argonspolning (4-5 nl/minut), 400-1000 mBars tryck.

6.1. Försöksupplägg

Försöken utfördes i två etapper:

- A. 7 Charger den 30 jan 2013
- B. 8 Charger den 21 nov 2013

Chargerna göts i sekvens.

6.2. Försök A

Den ursprungliga planen för försöket var att gjuta de ferritiska stålen under nickelkilen och det peritektiska stålet på nickelkilen för att få mjukkylning endast för det peritektiska stålet.

Strax innan försöket upptäcktes att detta inte var möjligt. Nivåsensorn i kokillen hade ersatts med en ny sensor efter det att feasibility studien för SSAB EMEA i Luleå i det tidigare projektet (JK24050) hade genomförts. Den nya sensorn mätte inte på samma sätt och kunde inte mäta stålnivån lika djupt ner i kokillen som den gamla. Eftersom det inte gick att sänka stålnivån till under kilen göts även de ferritiska chargerna med mjukkylning. Detta för att undersöka hur det skulle fungera i verkligheten, eftersom det är viktigt ur produktionsplaneringssynpunkt att kunna gjuta alla gjutsorter med samma kokill.

Försöket gick även ut på att testa hur mjukkylningen passar med olika gjutpulver samt hur gjuthastigheten påverkar utfallet.

6.2.1. Processvariabler

- Gjutpulver: Ordinarie gjutpulver för peritektiska stålsorter: Sinthesis PS5 AT, Ordinarie gjutpulver för ferritiska stål ST-SP/222 samt gjutpulver för lågkolhaltiga ferritiska stål Scorialit SPH-SL 481/LC-LU.
- Stålsorter: Internkod: 38462 (peritektiskt), 38466 (peritektiskt), 25003 (ferritisk, låg kolhalt)
- Gjuthastighet 1,2 och 1,35 m/min.
- Kokilldimension: från 1480 till 980*220 mm
- Försöksschema se Tabell 5.

Tabell 5. Sammafattning av alla parametrar för försök A.

Chargenr	Ståltyp	Gjuthastighet		Gjutpulver
		1,35 m/min	1,20 m/min	
X0300	Peritektisk		X	Högkristallint
X0301	Peritektisk	X		Högkristallint
X0302	Peritektisk		X	Amorft
X0303	Peritektisk	X		Amorft
X0304	Ferritiskt 1	x*)		Amorft
X0305	Ferritiskt 1	x*)		Amorft
X0306	Ferritiskt 1	x*)		Amorft

x*) Högre gjuthastigheter upp till 1,5 m/min kan förekomma, beställd bredd är avgörande

6.2.2. Stålsort

Vid försöket göts tre olika stålkoder, varav två med peritektisk stelning (38462 och 38466) och en med ferritiskt stelning (25003).

38462

Tabell 6. Sammansättning för de uppföljda chargerna (vikt-%).

Chargenr	C	Si	Mn	V	P	S	N	Al	Nb
X0300	0,075	0,06	1,34	0,018	0,013	0,004	0,0054	0,045	0,046
X0301	0,075	0,06	1,29	0,01	0,01	0,004	0,0047	0,059	0,047

38464

Tabell 7. Sammansättning för de uppföljda chargerna (vikt-%).

Chargenr	C	Si	Mn	V	P	S	N	Al	Nb
X0302	0,072	0,24	1,72	0,02	0,017	0,004	0,0048	0,051	0,059
X0303	0,073	0,25	1,67	0,016	0,017	0,004	0,0058	0,048	0,061

25003

Tabell 8. Sammansättning för de uppföljda chargerna (vikt-%).

Chargenr	C	Si	Mn	V	P	S	N	Al	Nb
X0304	0,015	0	0,19	0,002	0,01	0,008	0,0017	0,034	0
X0305	0,018	0	0,2	0,003	0,008	0,008	0,0014	0,024	0
X0306	0,019	0	0,2	0,002	0,007	0,007	0,0018	0,03	0

6.2.3. Gjuttemperaturer

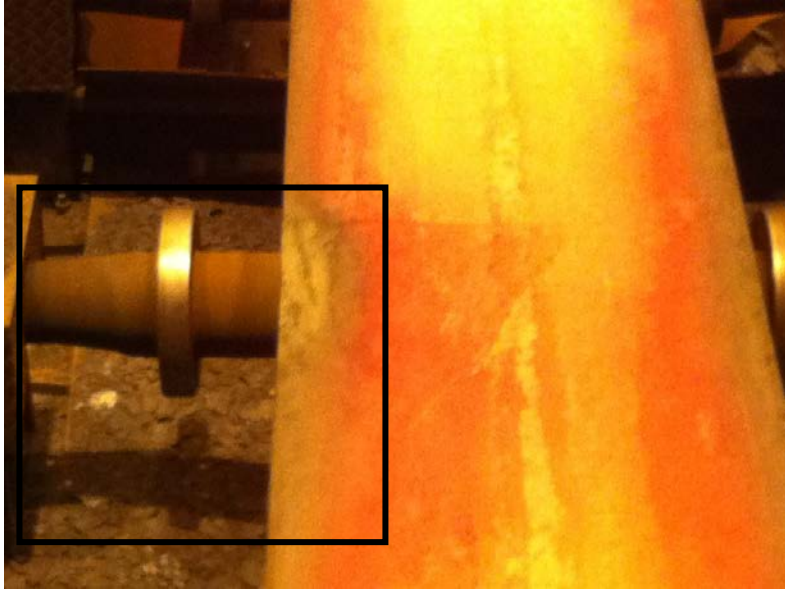
Rikttemperatur i gjutlådan för 38462 och 38464 är 1534 °C resp 1535 °C. För stålsorten 25003 är smälttemperaturen 1535 °C och rikt i gjutlådan är 1546 °C. Uppmätta temperaturer från försöken framgår av Tabell 9 där man kan konstatera en genomgående god temperaturträffsäkerhet.

Tabell 9. Gjutlådetemperaturer (A)

Charge	1	2	3	4	5	6	Medeltemp. °C	Rikttemp. °C
X0300	1527	1539	1541	1535	1525		1530	1538
X0301	1534	1538	1536	1536	1529	1527	1533	1538
X0302	1549	1550	1549	1543	1538		1546	1535
X0303	1539	1544	1532				1538	1535
X0304	1555	1566	1571	1565			1558	1546
X0305	1552	1548	1539				1546	1546
X0306	1550	1544	1543	1539	1538		1543	1546

6.2.4. Syning av slabs

Ytskyning av slabsen skedde vid båda tillfällena. Vid det första försöket fann man inga defekter, men inga k-drag utfördes på ämnena. Vid syning såg ytan ut som det brukade, dvs varken bättre eller sämre än i vanliga fall. Dock fann man skalhängningar på de ferritiska slabsen i den mjukkylda sidan, se Figur 9, vilket Mould Expert också varnade för.



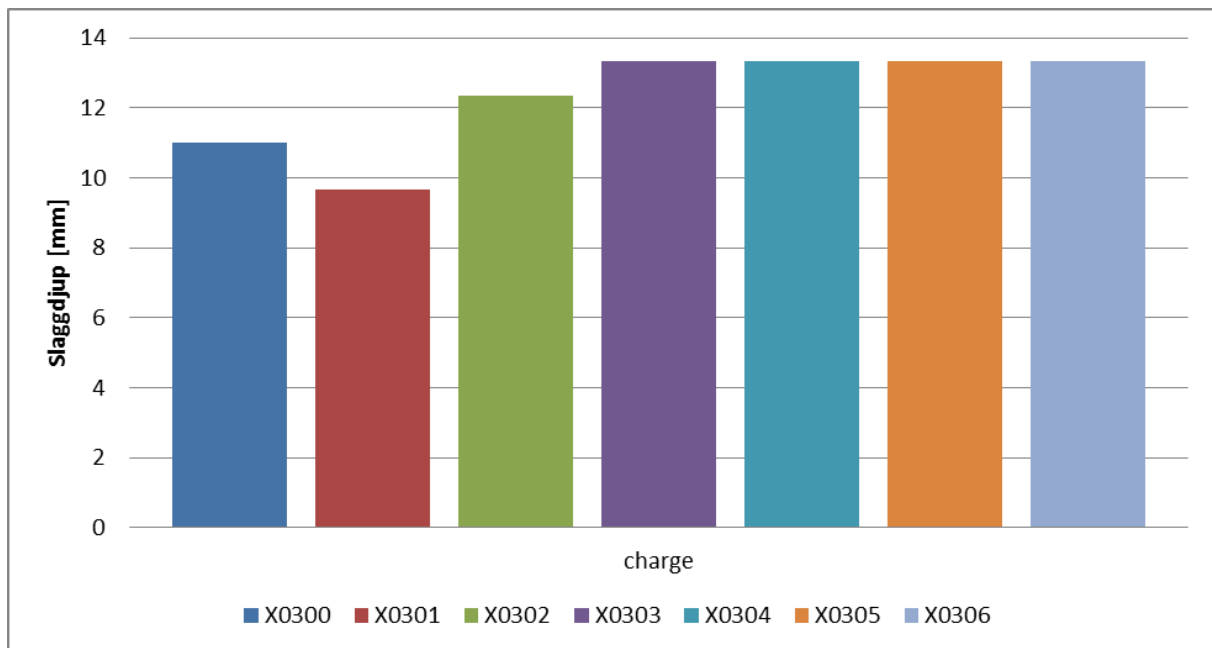
Figur 9. Fastbränna på ett ferritiskt slabs

Från detta drar vi slutsatserna att:

- Den mjukkylande kokillplattan gav liknande ämneskvalitet som ordinarie gjutning av det peritektiska stålet.
- Att gjuta ferritiska stål med mjukkylning är inte att rekommendera, p.g.a. förekomsten av fastbrännor i kokillen, vilket ökar risken för genombrott.

6.2.5. Gjutpulver och gjutslaggtjocklek

Påläggning av det granulerade gjutpulvret skedde med automatisk pulvermatare. Mätning av slaggens tjocklek gjordes. Tre mätningar utfördes per charge och medelvärdet av dessa ses i Figur 10. Diagrammet visar att gjutslagen är något mindre för de första chargerna men att den sedan stiger till en högre stabil nivå.

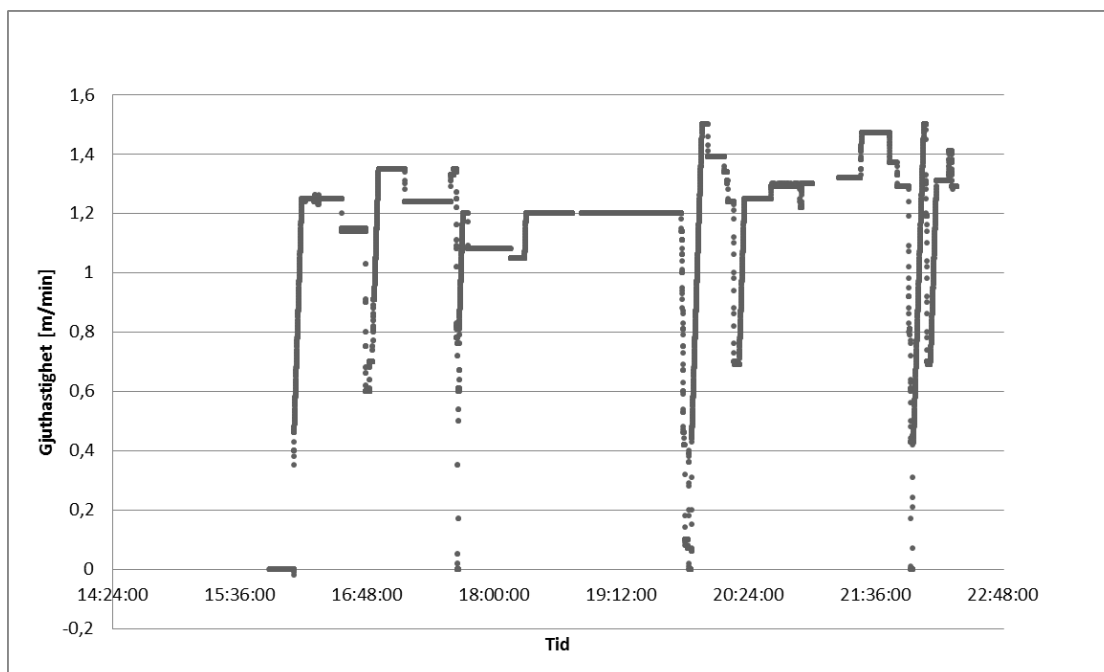


Figur 10. Medelvärden från mätning av gjutpulver- och slaggdjup; försök A.

Generellt har man i allmänhet inga problem med smälthastigheten av gjutpulvret i Luleå tack vare höga ståltemperaturer och hög strömningshastighet i kokillen pga. hög gjuthastighet.

6.2.6. Gjuthastighet

Ytterligare en faktor som påverkar förutsättningarna i kokillen är gjuthastigheten. Vid försöken har man försökt att hålla en viss hastighet och har också lyckats med det för det mesta. Det finns dock avikelser då gjuthastigheten måste anpassas till gjutprocessen på olika sätt. Om t ex stålets temperatur är för hög eller om slabsbredden är bred måste gjuthastigheten sänkas för att undvika risk för genombrott likaså om gjutningen går för snabbt och man måste invänta efterföljande charge. Gjuthastigheten sänks även under gjutningen vid byte av gjutlådan samt vid simulerad gjutlådeväxling. Vid slutet av första försöket är de tre sista hastighetssänkningarna resultat av fastbrännelarmet. Vid det sista larmet bröts försöket då risken för genombrott var för stor, se Figur 11.

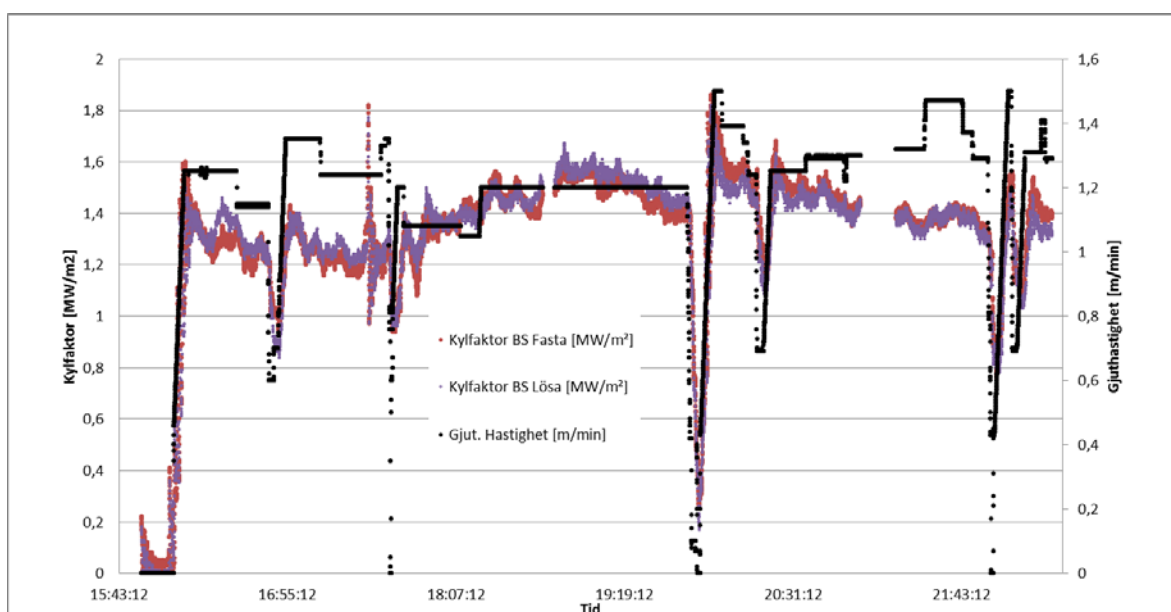


Figur 11. Gjutningshastigheten under hela gjutsekvensen under det första försöket

6.2.7. Värmeflöde i kokill

Värmeflöde i kokill för försöket visas i Figur 12. Man kan se att värmeflödet påverkas mycket av gjuthastigheten, men det kan även påverkas av slabsbredden och val av gjutpulver. Det är därför svårt att dra några slutsatser om detta har påverkats av den mjukkylda kokillen. Det är även svårt att jämföra värmeflödet för de båda bredsidoerna eftersom kokillen är böjd och bredsidoerna utsätts för olika belastning under gjutningen.

Man kan dock se en liten förändring mellan de två första chargerna och de som göts efteråt, då värmeflödet är något lägre i början för att vara högre för det sista fem chargerna. Detta beror på att de fem sista chargerna göts med amorft gjutpulver som leder värme bättre än den mer kristallina gjutslagen för peritektiska stål.

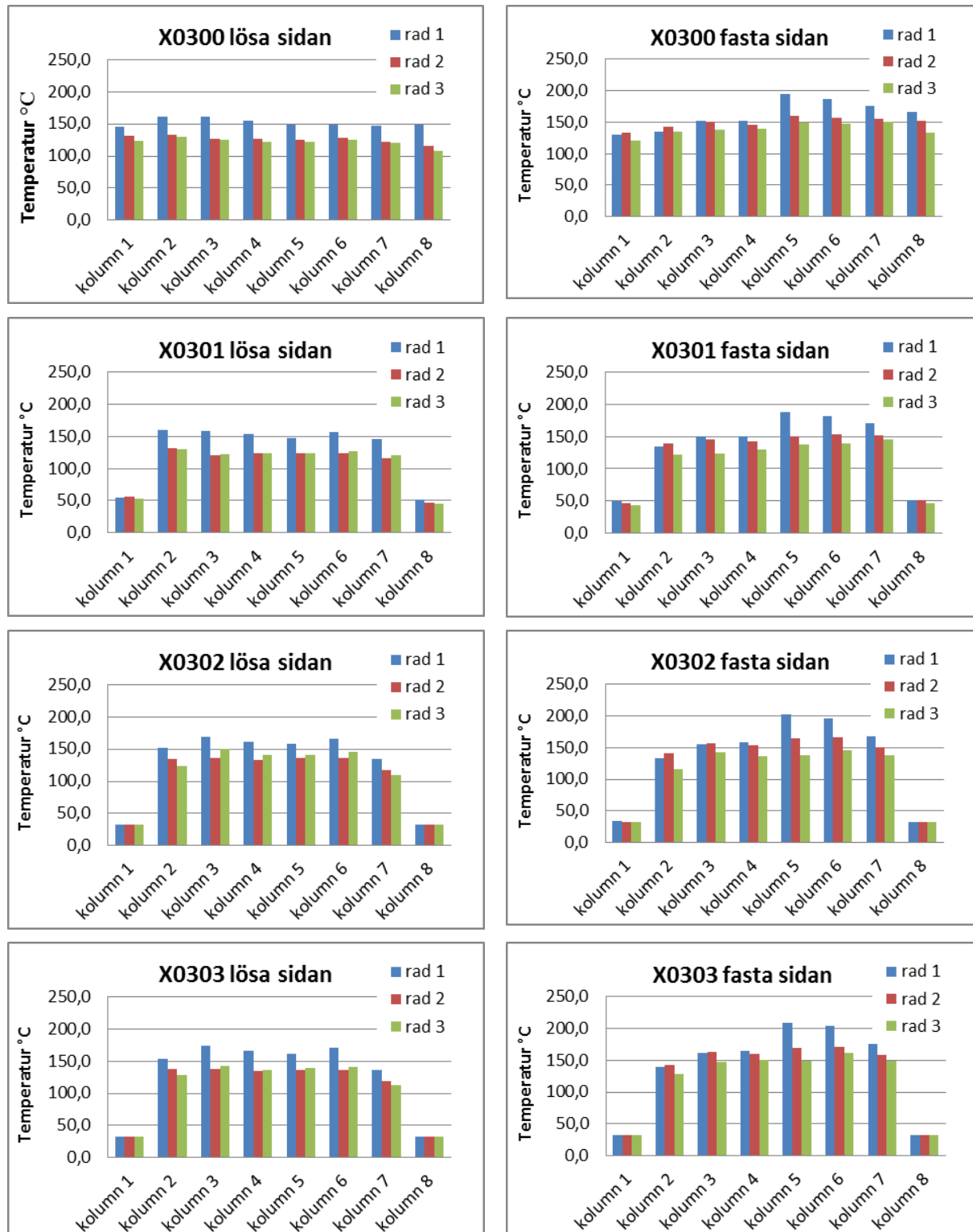


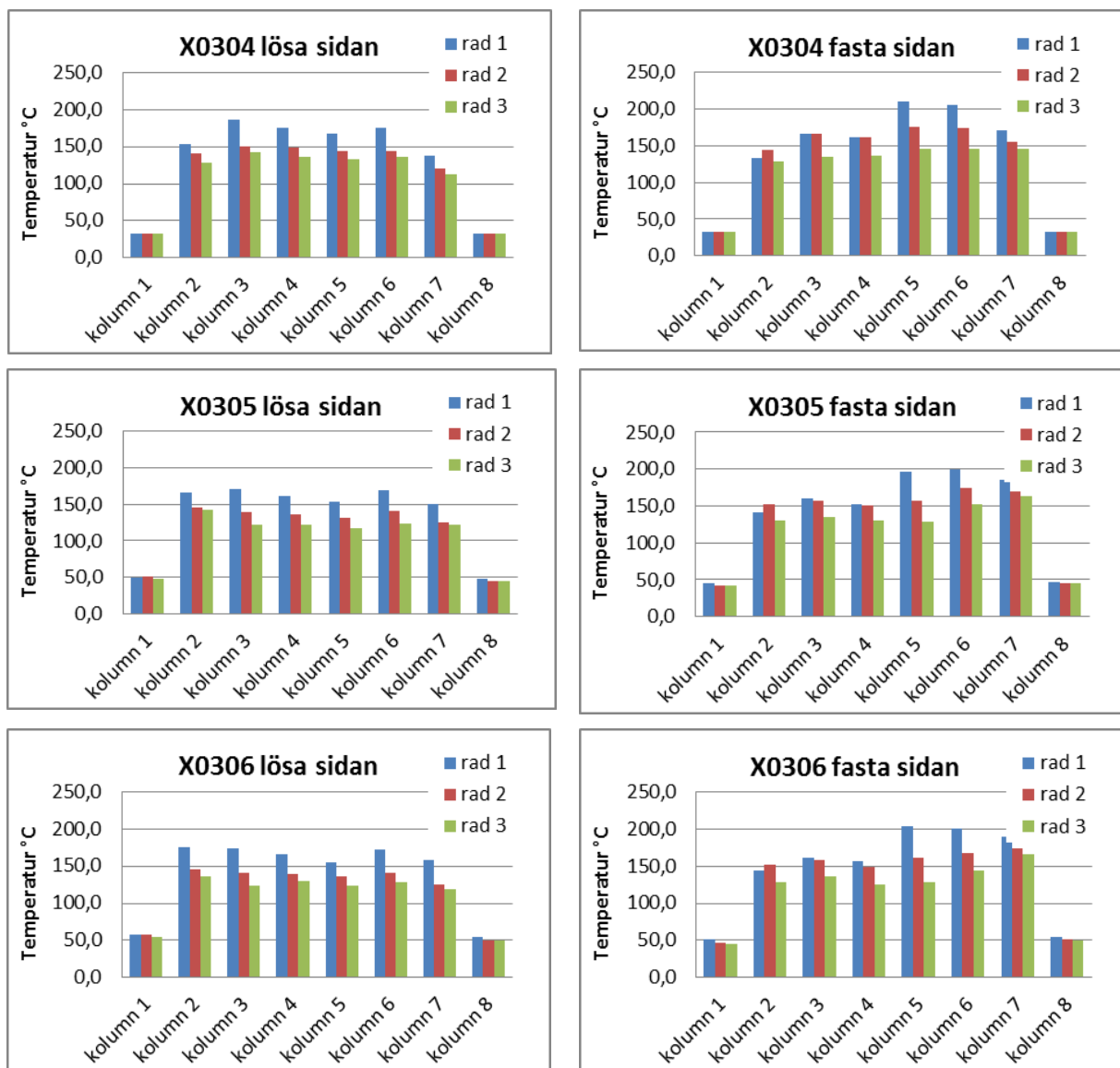
Figur 12. Värmeflödet i kokillen, försök A.

6.2.8. Temperaturmätningar i kokill

Med Mould Expert systemet mäts temperaturen i tre termoelementrader, 180 mm, 316 mm och 452 mm från kokillens överkant, se avsnitt 5.1.2 för en utförligare beskrivning av termoelementen i kokillen.

I Figur 13 visas medelvärden för ca. 15 minuters stabil gjutning av temperaturmätningarna för samtliga försökschager (X0300 – X0310).





Figur 13. Medelvärde av temperaturerna på den lösa och fasta sidan i kokillen för chargerna X0300 – X0310.

Slutsatser:

- Den fasta sidan är något varmare än den lösa sidan.
- Det är genomgående varmare på rad 1 på den lösa sidan och med undantag för kolumn 2 för den fasta.
- De yttre termoelementen ligger antagligen utanför slabsbredden förutom för den första chargen X0303.
- Stor likhet mellan försökschargerna och jämna temperaturer över strängbredden för den lösa sidan medan den fasta är mer ojämn.
- Samtliga termoelementrader ger fallande temperaturer för den lösa och förutom kolumn 2 för den fasta sidan.
- Den ena halvan av bredsiden verkar vara varmare med markant högre temperaturer på rad 1, men det kan påverkas av hur termoelementen är ditsatta.
- Svårt att dra några slutsatser om man kan se någon effekt av den mjukkylda kokillen.

6.3. Försök B

Efter utfallet från den första försökskampanjen (A) drogs slutsatsen att det inte var fördelaktigt att gjuta ferritiskt stelrande stål på den mjukkylande kilen. Vi ville dock undersöka effekten på en längre gjutning av endast peritektiska stål. Försöksparametrarna begränsades till endast ett gjutpulver, en gjuthastighet och en stålsort.

Eftersom nickelkilen gav mjukare kylning av stålskalet valdes ett amorft gjutpulver som brukar ge bättre smörjning i kokillen.

6.3.1. Processvariabler

- Gjutpulver: Ordinarie gjutpulver för ferritiska stål ST-SP/222
- Stålsort: internkod: 38422 (peritektisk)
- Gjuthastighet: utgångspunkt 1.1 m/min.
- Kokilldimension: från 1550 till 1180*220 mm

6.3.2. Stålsort

38422 – Stålsorten har en peritektisk omvandling och beskrivs i avsnitt 5.2. Denna stålsort är mer sprickkänsligt än de tidigare stålsorterna som ingick i försök A. Eftersom den är så känslig sker k-drag rutinmässigt på stålämnena.

Tabell 10 Sammansättning för de uppföljda chargerna (vikt-%).

Chargenr	C	Si	Mn	V	P	S	N	Al	Nb
X7303	0,149	0,49	1,49	0,009	0,012	0,003	0,0033	0,052	0,015
X7304	0,147	0,5	1,5	0,008	0,011	0,003	0,0035	0,049	0,015
X7305	0,153	0,51	1,51	0,007	0,013	0,003	0,0029	0,051	0,016
X7306	0,15	0,49	1,5	0,006	0,011	0,003	0,0029	0,047	0,014
X7307	0,148	0,5	1,48	0,007	0,013	0,003	0,0028	0,043	0,015
X7308	0,147	0,5	1,48	0,01	0,013	0,003	0,0031	0,048	0,015
X7309	0,151	0,51	1,48	0,01	0,016	0,003	0,0034	0,045	0,016
X7310	0,146	0,5	1,47	0,008	0,012	0,003	0,0037	0,044	0,015

6.3.3. Gjuttemperaturer

Beräknad smälttemperatur för stålsorten 38422 är 1512 °C och rikttemperatur i gjutlådan är 1534 °C. Uppmätta temperaturer från försöken ges av Tabell 11 där man kan konstatera att temperaturen har varit något hög vid den andra försökschargen (charge X7304) men att det förövrigt var en genomgående god temperaturträffsäkerhet.

Tabell 11. Gjutlådetemperaturer försökskampanj B

Charge	1	2	3	4	5	6	7	Rikt	Medel	Övertemp
X7303	1558	1528	1525	1532				1512	1536	24
X7304	1540	1544	1542	1531				1512	1539	27
X7305	1534	1537	1533	1528				1512	1533	21
X7306	1529	1537	1537	1530				1512	1533	21
X7307	1527	1523	1526	1536				1512	1528	16
X7308	1533	1539	1530					1512	1534	22
X7309	1522	1529	1539	1529				1512	1530	18
X7310	1532	1538	1536	1539	1530	1530	1530	1512	1534	22

6.3.4. Syning av slabs

Ytskyning av ämnena skedde med k-drag, d.v.s. syrgashyvlning av stålämnet; på mitten och längs med hörnen på breddsidorna. Detta gör att det är lättare att hitta sprickor och slagginneslutningar. K-drag utfördes ej vid försök A, så det är lite missvisande att jämföra resultaten mellan de båda försöken.

Vid försöket hittade man många defekter på den undre sidan av slabsen, dvs den sida som var mot den fasta breddsidan och göts med ordinarie kokillplatta. Däremot fann man inga defekter på den övre sidan på ämnena, dvs den sida som låg mot den breddsidan med mjukkylning i kokillen. Detta resultat kan ses i Tabell 12. Tabellen visar de defekter som man söker efter och att det är mycket hörnsprickor (27 % av ämnena, se Figur 14) och många slagginneslutningar (89 % av ämnena) samt en långsgående spricka (på ett ämne) på undersidan av slabsen.



Figur 14. Hörnspricka på charge X7307 (externt charge nr 57-0581.)

Tabell 12. Utfall från syning vid det andra försöket.

	Undersida	%	Översida (mjukkyld)
Hörnsprickor	12	27	0
Kantspricka	0	0	0
Längsgående spricka	1	2	0
Tvärgående spricka	0	0	0
Slagginneslutningar/Pin holes	40	89	0

Detta ska jämföras med statistik av förekomsten av hörnsprickor för åren 2010-2013, se Tabell 1. Sprickorna kan förekomma på både under- och översida, men översidan brukar vara mer utsatt.

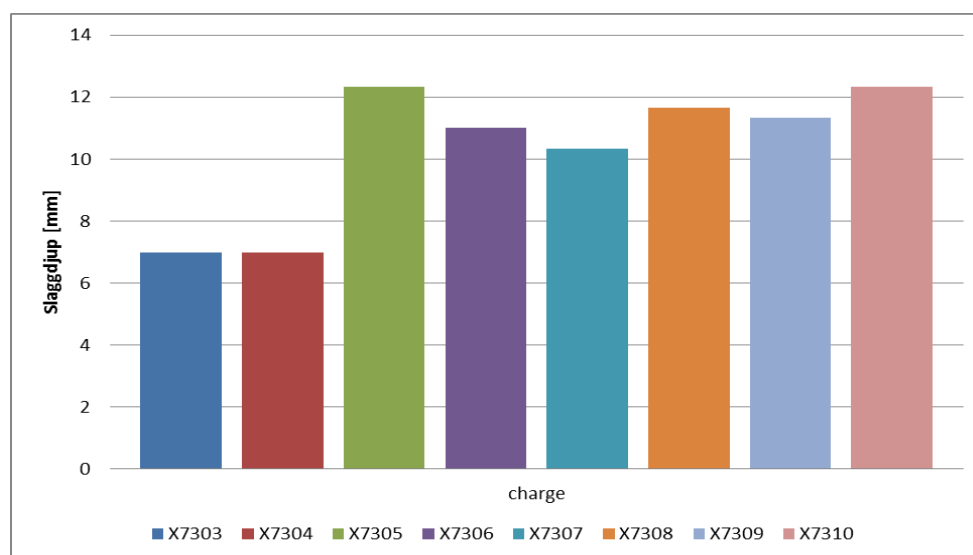
När de gäller förekomsten av slagginneslutningar var det en klar ökning från hur det brukar vara enligt Christer Nilsson.

Från detta drar vi de slutsatser att:

- Den mjukkylande kokillplattan gav bättre kvalitet än vanligt för det peritektiska stålet
- Kombination av hårdkylande ordinarie kokillplatta och amorft gjutpulver gav många defekter.

6.3.5. Gjutpulver och gjutslaggtjocklek

Påläggning av det granulerade gjutpulvret skedde med automatisk pulvermatare. Mätning av slaggens tjocklek gjordes. Tre mätningar utfördes per charge och medelvärdet av dessa ses i Figur 15. Figuren visar att gjutslagen är något mindre för de första chargerna men att den sedan stiger till en högre stabil nivå.

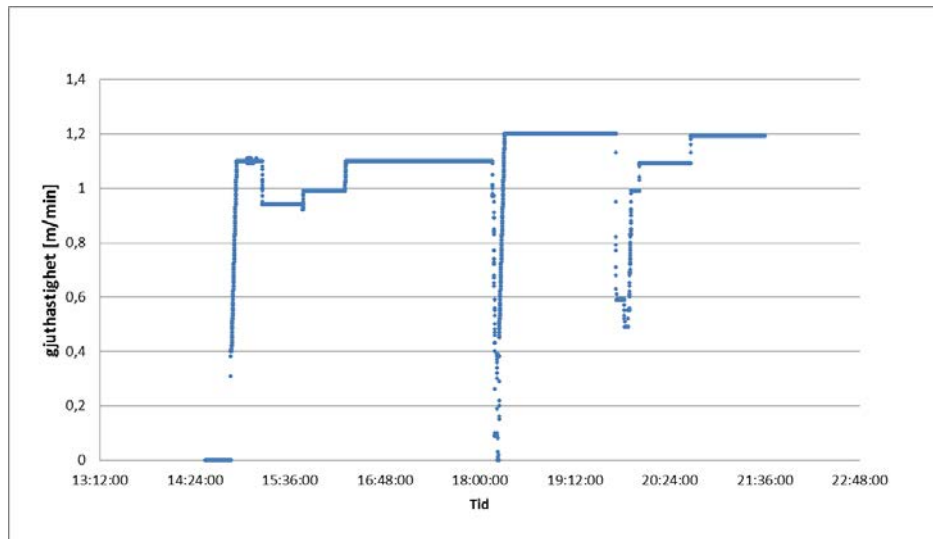


Figur 15. Medelvärden från mätning av gjutpulver- och slaggdjup försök 2.

Generellt har man i allmänhet inga problem med smälthastigheten av gjutpulvret i Luleå tack vare höga ståltemperaturer och hög strömningshastighet i kokillen p.g.a. hög gjuthastighet.

6.3.6. Gjuthastighet

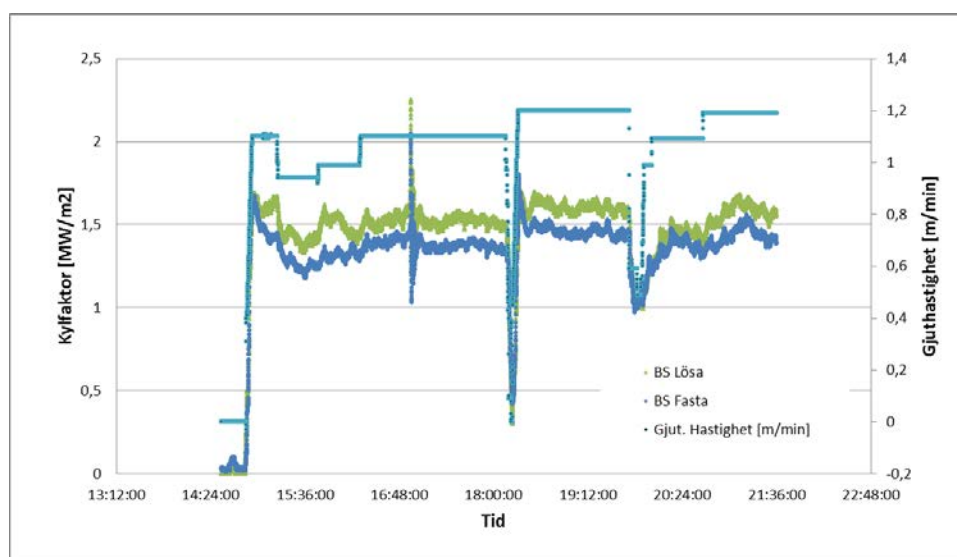
Vid försöket var utgångshastigheten 1.1 m/min och man har också lyckats med det för det mesta. Det finns dock avikelser. Vid det andra försöket skedde en minskning av gjuthastigheten under den första chargen pga för hög temperatur i stålet samt nedgång pga en gjutlådeväxling, se Figur 16. Den sista gjuthastighetssänkningen i den senare delen av försöket berodde på traversproblem i svalhallen och hade inget med försöket att göra.



Figur 16. Gjuthastigheten under hela gjutsekvensen under det andra försöket

6.3.7. Värmeflöde i kokill

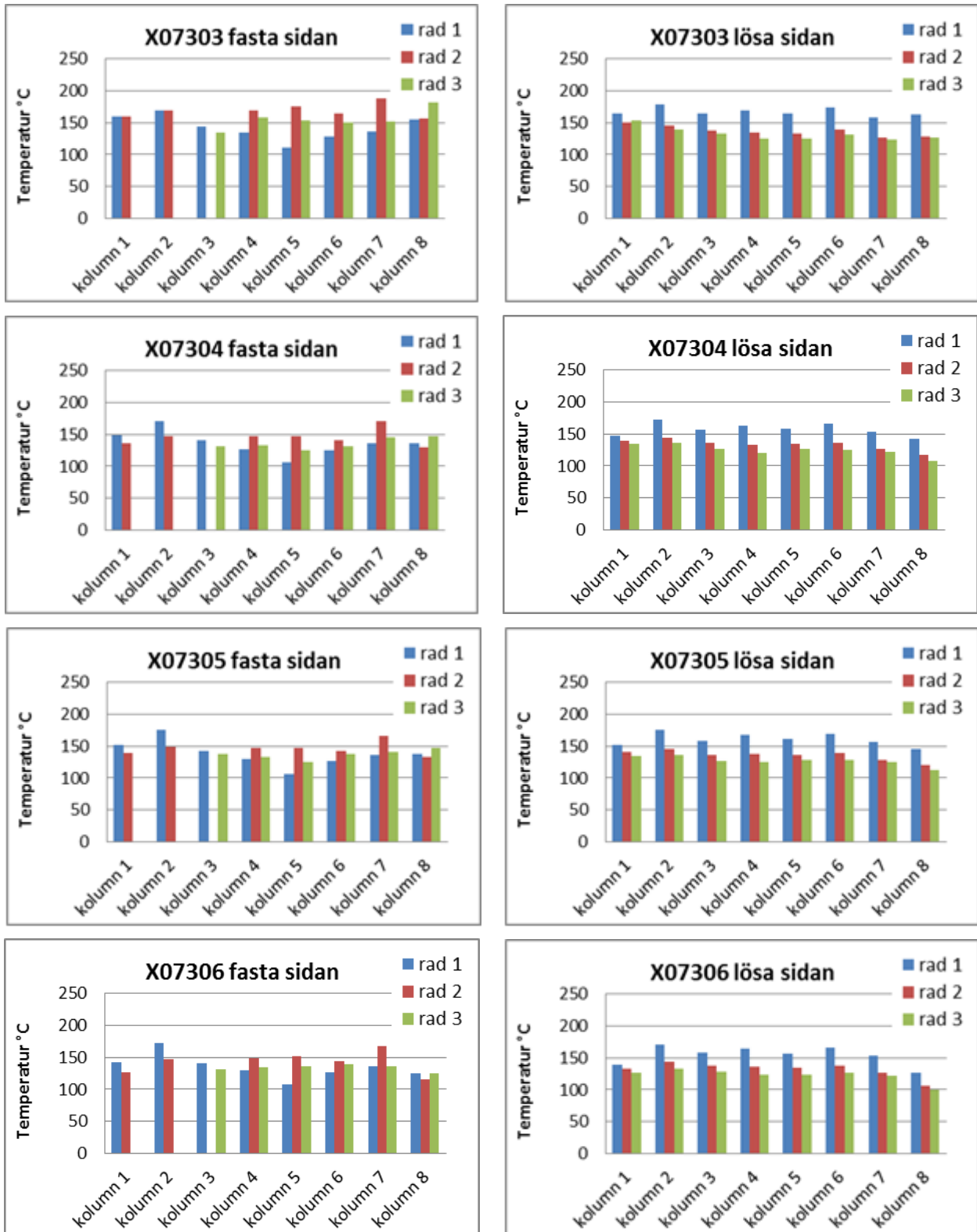
I Figur 17 kan man se att värmeflödet och att det påverkas av gjuthastigheten, men den kan även påverkas av slabsbredden. Det är därför svårt att dra några slutsatser om detta har påverkats av den mjukkylda kokillen. Det är även svårt att jämföra värmeflödet för de båda bredsidorerna eftersom kokillen är böjd och bredsidorerna utsätts för olika belastning under gjutningen.

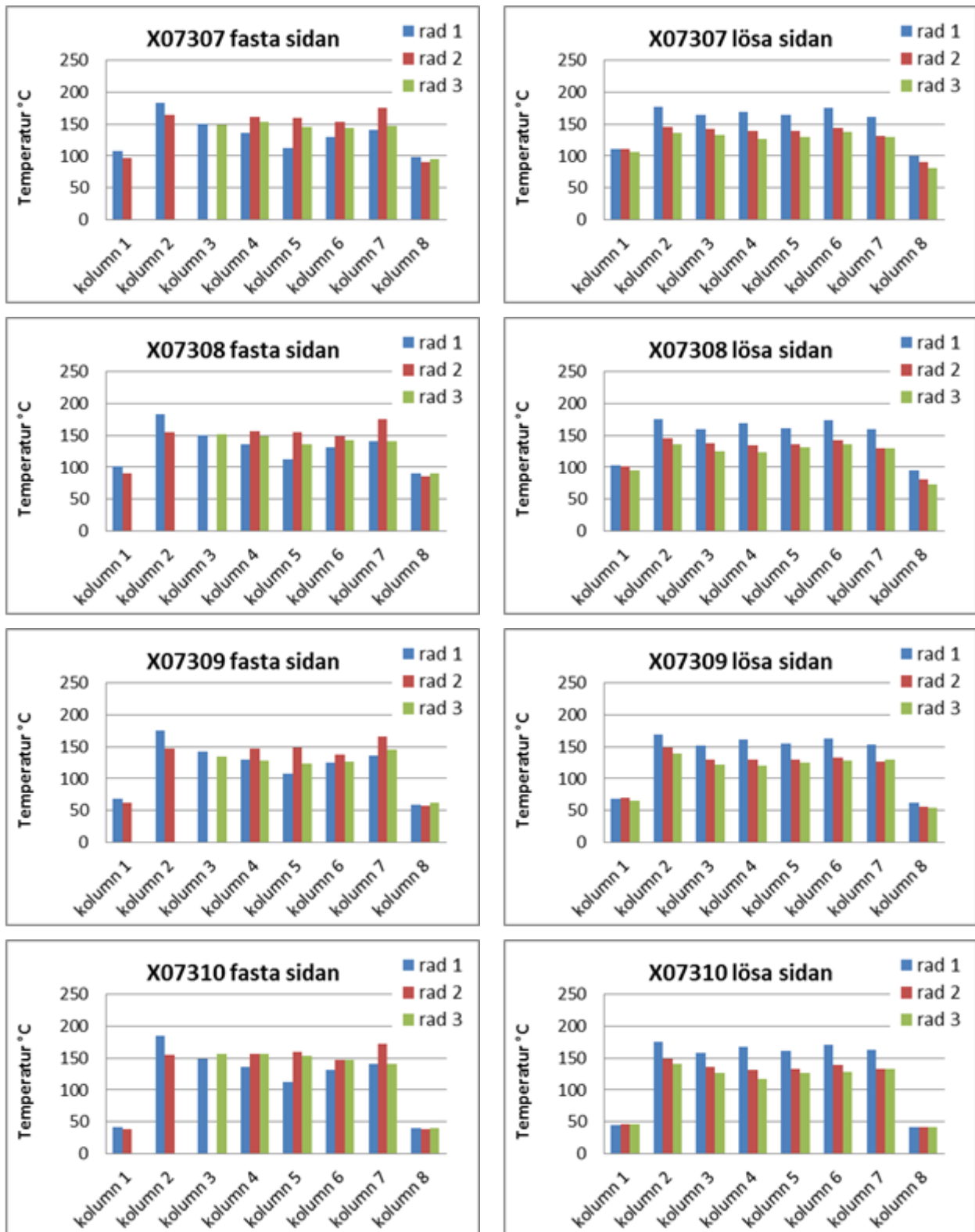


Figur 17. Värmeflödet i kokillen, försök 2

6.3.8. Temperaturmätningar i kokill

Med Mould Expert systemet mäts temperaturen i tre termoelementrader, 180 mm, 316 mm och 452 mm från kokillens överkant. I Figur 18 visas medelvärden för ca 15 minuters stabil gjutning av temperaturmätningarna för samtliga försökscharger X7303-X7310.





Figur 18. Medelvärden av temperaturerna på den fasta och lösa sidan i kokillen.

Det är stor likhet mellan chargerna och de yttre termoelementen ligger utanför slabsbredden chargerna 7309 och 7310. Det som man annars kan dra slutsatser från temperaturmätningarna är:

Slutsatser; lösa sidan:

- Samtliga termoelementrader ger fallande temperaturer.
- Det är genomgående varmare på rad 1 (180 mm).
- Temperaturen är jämn över strängbredden.

Slutsatser; fasta sidan:

- Kolumn 1, 2 och 3 för den fasta sidan har termoelement som inte fungerar på rad 3 och 2.
- Temperaturen är ganska ojämn på den fasta sidan, där rad 1 ibland visar högre temperaturer än rad 2 och 3 och ibland lägre.

6.4. Resultat från förstudie om sprayteknik av nickelpulver på kopparplatta

Här är en sammanfattning av resultaten från rapporten. För mer detaljer se Bilaga 2.

- Nickelskiktets tjocklek för både den mjuka och hårda legeringen var ungefär 2,7 mm.
- Porositeten var mellan 5-8 %, där den hårda nickellegeringen innehöll fler porer.
- Vidhäftningen var god. Vid test av vidhäftningen enligt standard ISO 4624:2002 ("Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion") klarade den belastning på över 35 MPa.

7. SLUTSATSER

Från de två försöken med kokill med mjukkylning på ena breddsidan kan följande slutsatser dras:

- Fler försök med mjukkyld kokill behöver utföras, men försöken har hittills visat att gjutning med mjukkyld kokill verkar ge bättre ämnesytor på peritektiska stål med avseende på hörnsprickor. Det ska även tilläggas att det går bra att använda ett amorft gjutpulver. Detta är en fördel eftersom det amorfa gjutpulvret ger bättre smörjning mellan slabs och kokill.
- Det går mindre bra att gjuta ferritiska stål eftersom de kräver hård kylning i kokillen, under försöken larmade Mould Expert-systemet om fastbrännor vid gjutning av ferritiska stål. Detta innebär att man måste kunna flytta ner stålmenisken så att man kan gjuta på och under det mjukkylande materialet.
- Nickelkilen höll bra i kokillen. Inga sprickor har upptäckts i materialet eller skarvar. Dock kladdade slaggrimmen fast på kilen, men det verkade inte störa under gjutningen av de peritektiska stålen.
- Den ursprungliga målsättningen i projektet var att först testa mjukkylning på en breddside för att i nästa steg utföra försök med mjukkylning i hela kokillen. Detta har inte kunnat genomföras eftersom förutsättningarna för att kunna ändra nivån på stålet i kokillen ändrades under projektets gång. Detta är ett så pass stort problem att det måste lösas innan man går vidare med projektet. Anledningen till att det är viktigt att kunna ändra nivå på stålmenisken är att det måste vara möjligt att kunna gjuta både ferritiska och peritektiska stålsorter i samma kokill. Eftersom ferritiskt stål kräver hård kylning måste den gjutas under det mjukkylande området.

Från rapporten om sprayteknik av nickelpulver på koppar:

- Det finns alternativa metoder som kan ge en nickelkil med bra porositet och som fäster bra på kopparytan.

8. FÖRSLAG PÅ FORTSATTA FORSKNINGSINSATSER OCH IMPLEMENTERINGSINSATSER

8.1. Tidsram för implementering av mjukkylande kokill

Om försök med en helt mjukkyld kokill visar positiva effekter avseende minskade ytdefekter skulle en implementering av mjukkylande kokill vid SSAB EMEA i Luleå kunna ske inom en 5 årsperiod. Detta står för ca 10 GWh/år av den totalt effektiviseringspotentialen om 40 GWh/år. Resten av minskningen tar längre tid att åstadkomma eftersom en implementering på stålverken SSAB EMEA Oxelösund, Sandvik Materials Technology och Outokumpu Stainless i Avesta, kräver ombyggnation av kokillerna. Detta innebär ganska stora förändringar och investering, men de skulle kunna genomföras inom en 10 årsperiod.

8.2. Förslag på fortsatt arbete

Det som är mest intressant att undersöka i det här läget är om det är möjligt att kunna gjuta på olika nivåer i kokillen, där de peritektiska stålet gjuts på nickelkilen och ferritiska stål gjuts under kilen. Detta var en viktig punkt i den ursprungliga projektplanen, men det var inte möjligt att utföra detta eftersom utrustningen av nivåsensorn ändrades under projektets gång.

- Vårt förslag är att SSAB EMEA Luleå behåller kopparplattan och att man utvecklar ett sätt att gjuta på olika nivåer i kokillen.
- Att skapa en hel kokill med mjukkylning på alla kokillens sidor är också intressant. Med de resultat som vi har från tidigare försök bör detta inte vara något större problem.
- En viktig del i den fortsatta utvecklingen av processföring med mjukkyld kokill är att prova ut ett glasigt (amorft) gjutpulver med optimala smörjningsegenskaper vilket inte var fallet i dessa försök. De amorfa gjutpulver som användes i försöken ingår i SSAB:s standardsortiment för lågkolhaltiga stål, har låg basicitet men samtidigt också en låg viskositet pga. hög halt av $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (13-14 %). Detta innebär låg polymerisationsgrad och en platt viskositets-temperaturkurva. Optimalt ur smörjsynpunkt är en gjutslag med något högre viskositet och ett starkt viskositets-temperatursamband.

En ytterligare faktor som är viktig för implementering av mjukkylande material i kokillen är just tillverkningen av kokillplattan. Vid de försök som har utförts har kilen i de flesta fall svetsats dit. Detta är ett arbete som tar mycket resurser, då det har utförts manuellt, och det är därför väldigt dyrt. Att hitta alternativa metoder att applicera nickelkilen som samtidigt kostar mindre är en viktig del i projektet för att göra kokillen kostnadseffektiv.

Vad man kan göra är att tillfråga de som idag belägger kopparplattorna med nickel (Benoni och KME) vad de kan erbjuda. En annan teknik som man kan använda är "cold-spray".

Vid ett tidigare försök i projektet har kilen tillverkats med cold-spray, som är en teknik som har stor utvecklingspotential. Det finns även andra material med låg värmeledningsförmåga som skulle kunna användas i kokillen. En liten förstudie har utförts i syfte att undersöka hur detta skulle kunna genomföras med sprayteknik se Bilaga 2

- Vi föreslår att Swerea KIMAB:s specialister inom fogning tar sig an detta problem; att finna en metod för att tillverka det mjukkylande skiktet i kokillen på ett kostnadseffektivt sätt och med slitstark yta.

Tack till

Vi vill tacka för finansieringen från Energimyndigheten och SSAB EMEA Luleå och för den stora arbetsinsats som Christer Nilsson har stått för. Vi vill också tacka för den ovärderliga hjälp som Lars-Henrik Österholm har gett, samt det tålamod som han har haft med oss.

9. REFERENSER

- [1] WRAY P.J., HOLMES M.F., "Plastic Deformation of Austenitic Iron at Intermediate Strain Rates". Met. Trans. Volume 6A, June (1975), sid. 1189-1196.
- [2] WRAY P.J., "Plastic Deformation of Delta-Ferritic Iron at Intermediate Strain Rates". Met. Trans. Volume 7A, November (1976), sid. 1621-1627.
- [3] FREDRIKSSON H., THEGERSTRÖM M., "On the formation of an air gap between the mould and the strand in continuous casting". Scandinavian Journal of Metallurgy 8 (1979) sid. 232-240.
- [4] C-Å DÄCKER, Litteraturstudie IM-2004-516
- [5] WOLF M., "Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels". Continuous Casting Volume Nine, Iron&Steel Society (1997).
- [6] WOLF M., "Strand Surface Quality and the Peritectic Reaction – A Look into the Basics". Steelmaking Conference Proceedings (1998), sid. 53-62.
- [7] YAMAUCHI A., ITOYAMA S., KISHIMOTO Y., TOZAWA H., SORIMACHI K. "Heat transfer phenomena and mould flux lubrication in continuous casting of Steel". Supplement 2, Doctoral Thesis, Division of Metallurgy, Royal Institute of Technology, (March 2001).
- [8] NAKAI K., KAWASAKI M., NAKAJIMA K., SAKASHITA T., SUGITANI Y., "Improvement of surface quality of continuously cast slab by reducing heat flux density in mould". Proceedings Continuous Casting 85-Book 2, The Institute of Metals, London (1985), sid.71.1-71.8.
- [9] MURAKAMI H., SUZUKI M., MIYAHARA S., "Control of Uneven Solidified Shell Formation in HypoPeritectic Carbon Steel". Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress – Volume 1: Fundamentals, ISIJ, Nagoya, (1990), sid. 689-696.
- [10] BIRAT J-P., LARRECQ M., LAMANT J-Y., PÉTÉGNIEF J., "The Continuous Casting Mould: A Basic Tool for Surface Quality and Strand Productivity". Steelmaking Conference Proceedings (1991), sid. 39-50.
- [11] FUIYAMA T., MIYAGAWA S., DESHIMARU S-I., MIZOTA H., "Production of Continuous Casting Slabs Free From Surface Crack". Steelmaking Conference Proceedings (1985), sid. 215-221.
- [12] GUYOT V., MARTIN J-F., RUELLE A., d'ANSELME A., RADOT J-P., BOBADILLA M., LAMANT J-Y., PONTOIRE J-N., "Control of Surface Quality of 0.08 % < C < 0.12 % Steel Slabs in Continuous Casting". ISIJ International, Vol.36 (1996), Supplement, sid. S227-S230.
- [13] NORMANTON A.S., HUNTER N., SPACCAROTELLA A., MORAND H., "Influence of mould metallurgy on concast surface quality". ECSC- final report, EUR 19380 EN (2000).
- [14] OHTA K., WATANABE T., SUGITANI Y., SUDO T., "New technology for near net shape casting by tundish-mold connected caster". La Revue de Métallurgie-CIT, No.6, June (1995), sid. 781-787.
- [15] BERTOLETTI C., COURBE P., JOLIVET J.M., NAVVEAU P.P., OPER A., PERRIN E., SALARIS C., SPIERINGS A.L., WEISSELDINGER E., "Meniscus Free Casting: Metallurgical and Technological Results". 3rd European Conference on Continuous Casting – Madrid (1998).
- [16] MORISHITA M., NAKATA H., AYATA K., KOYAMA S., HOSOKAWA Y., FUKUMOTO H., "Meniscus Shape and Flow in an Electromagnetic Mold". Magnetohydrodynamics in process metallurgy, The Minerals, Metals&Materials Society (1991), sid. 267-272.
- [17] TANAKA T., FURUHASHI S., YOSHIDA M., "Solidification control making use of high frequency electromagnetic field in a mould connected with tundish". International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (1994), Nagoya, ISIJ, sid.248-253.
- [18] NISHIOKA S-I., KOMATSU M., OSAKO T., NAKADA M., MORI K., SATO T., "Control of initial solidification in CC by applying high-frequency magnetic field". International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (1994), Nagoya, ISIJ, sid. 203-208.
- [19] NAKATA H., KOKITA M., MORISITA M., AYATA K., "Improvement of surface quality of steel by electromagnetic mold". International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (1994), Nagoya, ISIJ, sid. 166-171.

[20] TOH T., TAKEUCHI E., HOJO M., KAWAI H., MATSUMURA S., "Electromagnetic Control of Solidification in Continuous Casting of Steel by Low Frequency Alternating Magnetic Field". ISIJ International, Vol 37 (1997), No.11, sid. 1

[21] TANI M., TOH T., HARADA H., FUJISAKI K., ANZAI E., MATSUMIYA T., "Electromagnetic casting for High Quality of Continuously Cast Steel". CAMP-ISIJ, Vol.15 (2002), sid.831-834.

[22] C-Å DÄCKER, C EGGERTSSON, S. P ANDERSSON, A. SALWÉN. "Development of a CC mould with soft cooling properties for casting of crack sensitive steel grades - Final Report"

Bilaga 1 – Projektorganisation och medverkande

Forskningskommitté

Jernkontoret 24054

Energimyndighetens projekt P 30120-3

Projektid

2011-11-06 till 2013-12-31 (förlängd)

Kommittéordförande

Christer Nilsson, SSAB EMEA Luleå

Projektledare

Line Hallgren, Swerea KIMAB AB

Ordinarie kommittémedlemmar

Sohrab Azar, Sandvik Materials Technology.

Jesper Janis, Outokumpu Stainless, Avesta works

Tomas Sohlgren, SSAB EMEA, Oxelösund

Adjungerade forskare

Fatemeh Shahbazian, Swerea KIMAB

Carl-Åke Däcker, Swerea KIMAB

Forskningschef (JK)

Lars-Henrik Österholm, Jernkontoret

Bilaga 2 – Försök med termisk sprutning av nickelpulver på koppar

Investigator: TAG HAMMAM , Swerea KIMAB

Supersonic spraying of nickel-alloy powder on copper substrate

Summary

The aim with study was to investigate if supersonic spraying can be used to deposit nickel powder onto copper substrate. For the spray experiments an AC-HVAF, M3 (Activated Combustion High-Velocity Air-Fuel, Mach 3) spray system from UniqueCoat technologies was used.

Two different types of nickel-alloys were used, named hard nickel and soft nickel in this report. Both of the nickel alloys was a Ni-Si-B-alloy. The hard nickel consisted of a mixture of 40 % alumina powder and a hard nickel powder while no alumina powder was added to the soft nickel.

The experiments show that a good adhesion (above 35 MPa) between the substrate and the coating can be achieved for a 3 mm thick coating for both the hard nickel and the soft nickel. The porosity was in the range of 5 -8 %.

Experiments

Test material

The substrate was copper plates made of a copper - silver alloy, with a thickness of 20 mm. Two different nickel powders were used see Table 1. The nominal chemical composition of the Ni-alloy according to the manufacture is presented in Table 2.

Table 1. The used nickel powder in the spray experiments.

Parameters	Type of powder	Type of powder
Name in the report	Hard nickel	Soft nickel
Type of powder from Höganäs	1662-10	1620
Nickel alloy	Ni-Cr-Si-B-alloy	Ni-Si-B-alloy
Amount of Al ₂ O ₃	40 %	0 %
Particle size of nickel powder	-45 µm + 15 µm	-45 µm + 15 µm
Hardness of Nickel HRC	62	20

Table 2. The nominal chemical composition of the hard and soft Ni powder^[1]

	C wt %	Si wt %	B wt %	Fe wt %	Cr wt %	W wt %	Ni wt %
Hard Nickel 1662-10	0.65	3.7	2.8	3.5	14.2	9.5	Bal.
Soft Nickel 1620	0.03	2.4	1.4	0.4			Bal.

Spray equipment and set-up

For the spray experiments, an Activated Combustion High Velocity Air Fuel, Mach 3 (AC-HVAF, M3) spray system from UniqueCoat technologies was used. In the AC-HVAF compressed air and fuel (e.g. propane) are mixed and burnt in a combustion chamber. The exhaust jet is pressed through a de Laval nozzle. Metal powder is then injected in the combustion chamber, and exits the nozzle at supersonic velocity, see Figure 1. The AC-HVAF system is at present mainly used for deposition of metals with relatively high melting temperature e.g. Ni, Co, Fe-alloys and cemented carbides. The set-up of the sample to be sprayed is shown in Figure 2.

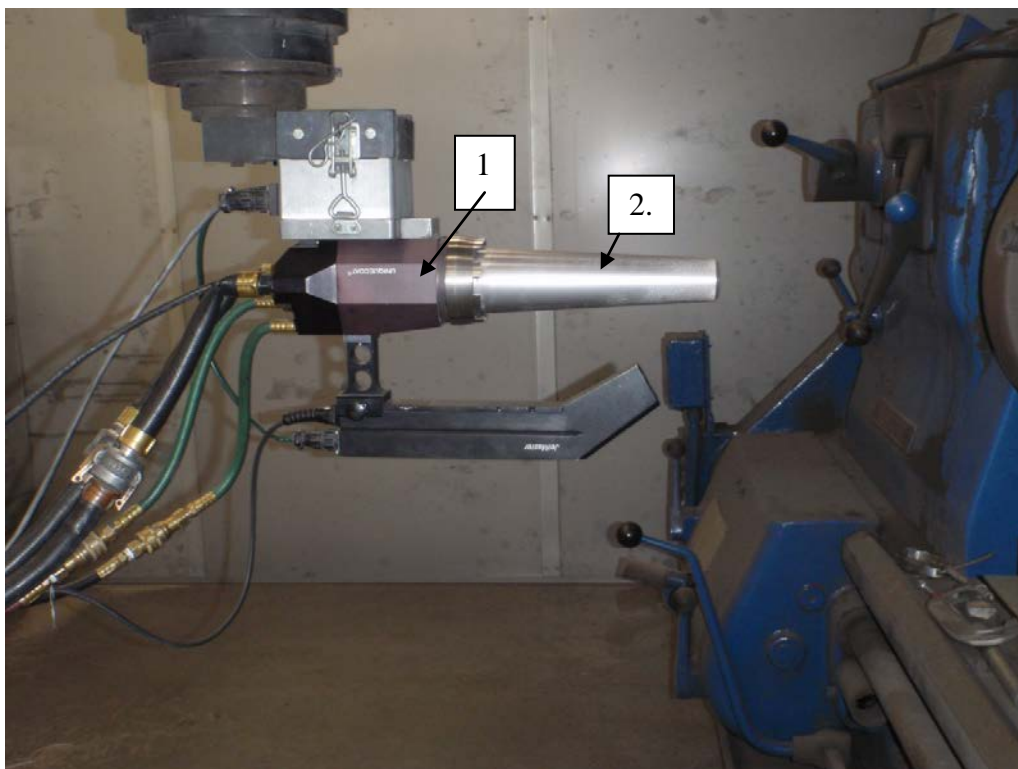


Figure 1. The AC-HVAF, M3 spray, the back wall of the combustion chamber (1) is made of a perforated catalytic ceramic. After initial ignition of air fuel mixture with a spark plug, the ceramic is heated above ignition temperature, and continuously ignites the flowing gas mixture through activating combustion. Metal powder is injected in the combustion chamber, and exits the nozzle (2) at supersonic velocity.



Figure 2. *Set-up of the sample to be sprayed.*

The machine parameters were the following:

- Nozzle no. 3L2
- Scanning speed of the nozzle motion along substrate: 1000 mm/s.
- Distance to the nozzle: 356 mm.
- Air pressure: 7.5 bar.
- Fuel gas: Propan.
- Fuel gas 1, pressure: 6.3 bar.
- Fuel gas 2, pressure: 6.55 bar.
- Nitrogen pressure: 4.8 bar.
- Spray sequence: 3 mm spacing between each scan.

All samples were grit blasted with the spray gun before supersonic spraying. The grit media was alumina with a powder size in the range of 0.063 to 0.105 mm. The nominal coating thickness was 3 mm. For the hard nickel coating approximately 0.1 mm was deposited for each scan, while for the soft nickel coating approximately 0.15 mm was deposited for each scan. Hence the deposition efficiency was higher for the soft nickel.

Metallographic analysis

The results of the metallographic investigation of the sample with the soft nickel coating are presented in Figure 3 and Figure 4. The measured coating thickness for the soft nickel coating is approximately 2.65 mm, see Figure 3.

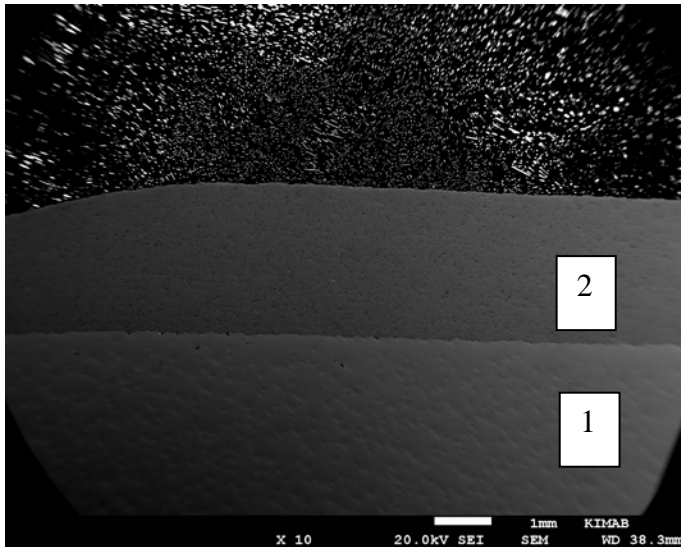


Figure 3. Cross-section of the sample coated with soft nickel, position (1) indicates the copper substrate and position (2) the coating. Measured coating thickness 2.65 mm.

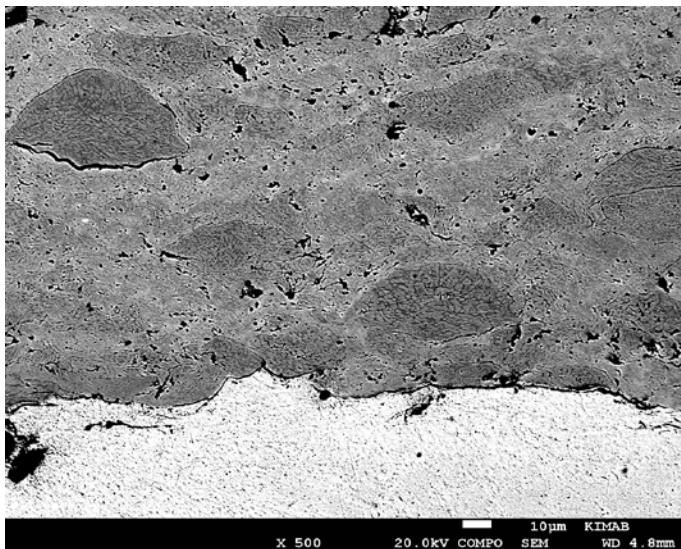


Figure 4. Close up of Figure 3 (atomic number contrast image), some pores are visible between the coating and the substrate as well as in the coating. The boundaries between the plastic deformed particles are also visible.

The results of the metallographic investigation of the sample with the hard nickel coating are presented in Figure 5 to Figure 8. The measured coating thickness for the soft nickel coating is approximately 2.73 mm. The coating has a rather high porosity.

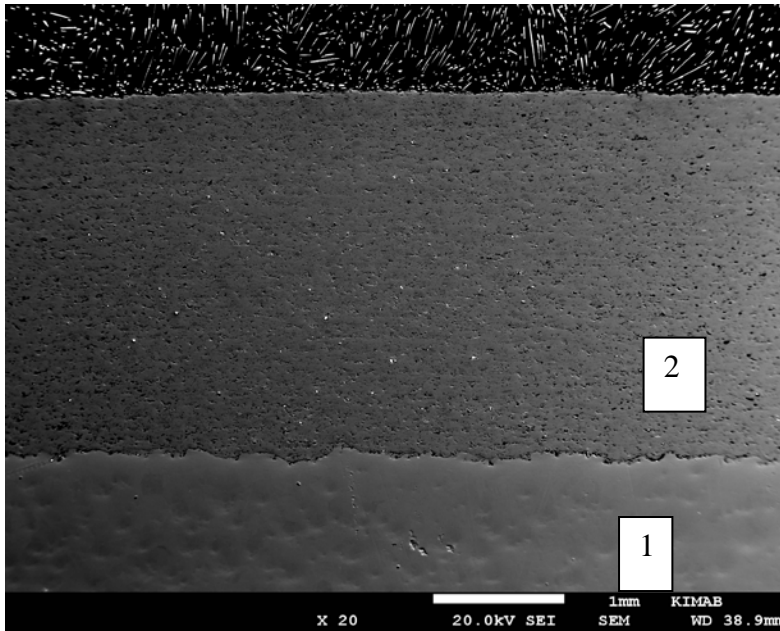


Figure 5. Cross-section of the sample coated with hard nickel, position (1) indicates the copper substrate and position (2) the coating. Measured coating thickness 2.73 mm.

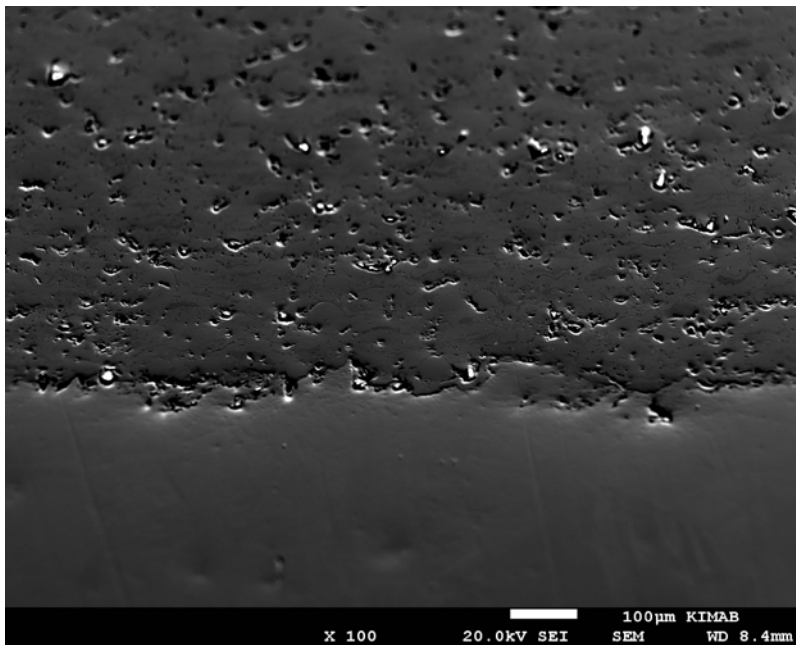


Figure 6. Close-up of Figure 5 at the interface between the coating and the substrate. The coating has a rather high porosity.

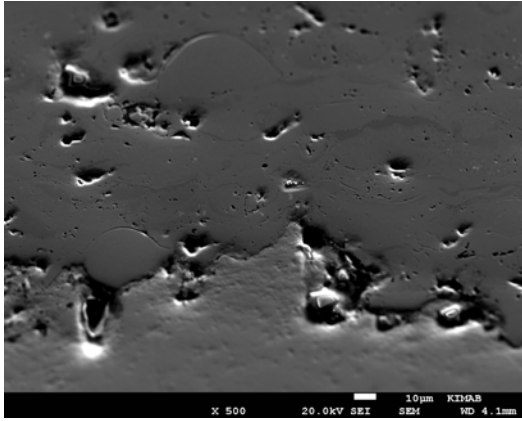


Figure 7. Close-up of Figure 6 at the interface between the coating and the substrate. SEM image.

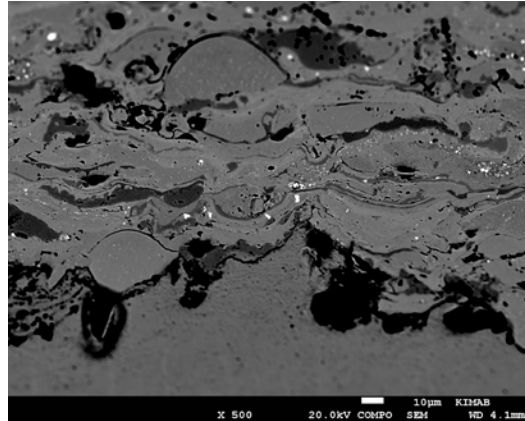


Figure 8. The same image as in Figure 7 Atomic number contrast.

Tensile adhesion test

The adhesion between substrate and coating can be measured by gluing a bar to the coated surface, and then after curing measuring the force that is needed to separate the bar from the substrate. In this way the tensile adhesion between coating and substrate can be measured up to the strength of the glue [ii].

The ASTM C633 - 01(2008) “Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings” describes how the end of a rod is coated and glued to another rod and then pulled off. For the present adhesion test the standard ISO 4624:2002 “Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion” was more appropriate, since the coating was sprayed on a steel plate.

The result of the tensile adhesion test is presented in Table 2. All fractures occurred at the interface between the glue and the substrate at a value above 35 MPa, and thus, the tensile adhesion between the coating and the substrate was above 35 MPa.

Table 2. The result of the tensile adhesion test, all fractures occurred at the interface between the glue and the substrate at a value above 35 MPa.

Type of coating	Nominal coating thickness (mm)	Fracture (MPa)	Comments
Soft nickel	3	39.2	Glue Failure
Soft nickel	3	39.2	Glue Failure
Hard nickel	3	36.4	Glue Failure
Hard Nickel	3	42.4	Glue Failure

Discussion

The performed spray experiments show that it is possible to deposit 3 mm thick nickel (Ni-Si-B-Fe alloy) onto a copper substrate by using AC-HVAF, M3. Two types of nickel powder were sprayed, soft nickel (Ni-Si-B-alloy) and hard nickel-alloy powder (Ni-Si-B-Fe-Cr-W alloy). The hard nickel powder consisted of a mixture of nickel powder and 40 % alumina. The alumina will grit blast the coating during spraying and improve the mechanical properties of the coating. The alumina will also be embedded in the coating and increase the wear resistance of the coating.

Both the hard nickel coating and the soft nickel had a good bonding to the substrate, and the porosity was in the range of 5 –8 %. The porosity of the hard nickel coating was somewhat higher.

Moreover, the grit blasting with the AC-HVAF, M3 spray was performed perpendicular to the surface. This usually results in that some alumina particles are stuck to the surface of the substrate. The observed pores between the substrate and the coating are probably caused by alumina grits that have been embedded. This can be avoided by grit blasting with an angle of the spray jet 30° off the normal to the surface of the substrate.

Conclusions

The purpose of this study was to investigate if nickel could be sprayed onto copper substrate. Based on the achieved results, the following conclusions are drawn:

- By using AC-HVAF, M3 it is possible to deposit 3 mm thick coating of nickel alloy (Ni-Si-B-alloy) onto copper substrate, it is also possible to deposit coating consisting of hard nickel (Ni-Si-B-Fe-Cr-W alloy) and alumina grit.
- The tensile adhesion between the substrate and the coating was above > 35 MPa.
- The coating is relatively dense, with porosity in the range of 5 % - 8 %.
- Grit blasting should be performed with an angle of the spray jet 30° off the normal to the surface of the substrate.

Acknowledgement

This investigation was funded by project JK24054.

ⁱ http://www.hoganasthermalspray.com/dokument/Glass_industry_solutions_English_Sept._2012.pdf

ⁱⁱ Joseph R. Davis Handbook of thermal spray technology. ISBN 0-87170-795-0.

DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION

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

JERNKONTORET

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

