

Sodahuskommittén

Rapport 2009-1

Risker med högtrycksrengöring av sodapannor

David Good
Mikael Ahlroth

ÅF-Engineering

Februari 2009
Stockholm

Sodahuskommittén

Inledning

Under 2008 hittades cirkulära skador på komponenttuber i Gruvöns sodapanna. Tidigare hittades även liknande skador i Munksund och Husum.

Orsaken till dessa skador var okänd. Skadorna undersöktes grundligt av Sodahuskommitténs skadegrupp, ÅF-Engineering och Pöyry.

Föreliggande rapport är en sammanfattning av vad som idag är känt gällande de funna skadorna på komponenttuberna.

Innehåll

- ❑ Meddelande från Sodahuskommittens skadegrupp
- ❑ Högtrycksspolningstest i Gruvön (Billerud Gruvön)
- ❑ Billerud AB, Gruvöns bruk. Skador på sodapannans eldstadtuber (Pöyry)

Meddelande från Sodahuskommitténs Skadegrupp

Meddelande 2009-1
Februari 2009

Risker med högtrycks-rengöring/spolning av sodapannor

Under de senaste två-tre åren har det rapporterats om cirkulära skador på compoundtuber i ugnen i några sodapannor. Skadorna har varit någon eller några få centimeter i diameter. Skadeytan har varit mycket grov. Djupet har varierat från uppskattningsvis 0,1 mm upp till 4,3 mm. Dessa skador har hittills inte kunnat förklaras, men i dagsläget pekar det mesta på att skadorna har orsakats vid högtrycksrengöringen av pannorna i samband med underhållsstopp.

Bedömningen är att skadorna har uppstått då högtryckstvättautomater har stått och sprutat på samma ställe då det roterande munstycket av någon anledning stannat och på det sättet avverkat tubmaterialet. Det verkar som om det yttre rostfria skiktet har haft bättre avverkningsmotstånd än det underliggande kolstålet.

Orsaken till att dessa skador visat sig nu på senare år är att tekniken inom högtryckspolning har utvecklats. Fler typer av spolautomater som även kan hantera högre tryck har blivit mera allmänt utnyttjade. Arbetsättet hur högtryckspolning har förändrats. Tidigare var det vanligt med handhållen högtrycksspolning inifrån pannan. Nu är trenden att rengöringen sker mer och mer mekaniserat utifrån pannan för att minska risken för personskador. Risken ökar då flera spolrobotar används samtidigt eftersom det inte hörs om ett munstycke stannar.

Detta nya rengöringsförfarande innebär att en ny typ av risk har skapats som måste beaktas när jobben utförs. Medlemmarna bör därför göra en riskanalys tillsammans med sina rengöringsentreprenörer där denna risk med att vattenstrålen spolar intensivt på ett och samma ställe undanröjs. Risken ökar med högre tryck och längre tid.

Det är fördelaktigt att använda ett högt vattenflöde och lite lägre tryck. För att tvättningen skall göras effektivt så är det en fördel om temperaturen på tvättvattnet är kring 60-70°C. Om man ska rengöra botten från soda med högtrycksvattentvättning bör man om möjligt ordna så att man aktivt suger ut vattnet från botten så att inte tvättvattenstrålarna bromsas i någon vattenspegel.

På Gruvöns bruk har man genomfört försök med att låta en koncentrerad högtrycksvattenstråle spola mot en compoundtub. Resultatet visar att man kan avverka tubens hela godstjockle på endast 15 minuter vid trycket 960-1.000 bar. Förutom Gruvöns försök har även en skadeutredning genomförts vilket även den talar för att det är högtrycksvattentvättningen som har orsakat dessa skador.

Meddelande från Sodahuskommitténs Skadegrupp

Sodahuskommittén uppmanar därför samtliga medlemmar att informera rengöringsentreprenörerna om riskerna med höga tryck och om ett tvättmunstycke får förhindrad rotation. Denna risk finns naturligtvis även på annan utrustning än sodapannor

De medlemmar som har egna erfarenheter liknande dessa uppmanas ta kontakt med Skadegruppens sekreterare David Good, 010-505 13 33, david.good@afconsult.com eller Sodahuskommitténs sekreterare Mikael Ahlroth, 010-505 12 08, mikael.ahlroth@afconsult.com.

De som vill läsa mer om liknande skador kan fördjupa sig i följande skador:

Skada 2006-23 Munksund SP3, Ej genomgående ”grop” i väggstub. Se även skadegruppens protokoll 2007-1 och 2007-2.

Skada 2007-06 Munksund SP3, Grop i bottentub. Se även skadegruppens protokoll 2007-2.

Skada 2007-07 Munksund SP3, Korroderade kompositkikt. Se även skadegruppens protokoll 2007-2.

Skada 2007-19 Husum TP6, Två lokala skador på kompositbottentub. Se även skadegruppens protokoll 2007-4 samt 2008-1.

Skada 2008-17 Gruvön T5, Skadade kompositkikt kring löphål. Se även skadegruppens protokoll 2008-3 samt 2008-4.

Skadegruppen kommer att arbeta vidare med denna frågeställning så bedömningen är att mer information kommer att finnas i Skadegruppens protokoll 2009-1, mötesdatum 22:a april 2009.

Se även Sodahuskommitténs rapportregister, Rapport 2009-1.

Ansvarsfriskrivning

Detta dokument utgör endast ett dokument över vad som förekommit vid möte med medlemmar i Sodahuskommitténs skadegrupp. Informationen i detta dokument är enbart avsedd för Sodahuskommitténs medlemmar. Det är upp till varje medlem eller annan part som tar del av innehållet i dokument att på egen risk och eget ansvar följa de rekommendationer och riktlinjer som i förekommande fall kan anses följa av dokumentets innehåll. Sodahuskommittén frånskriver sig allt ansvar för fel och skada oavsett orsak som kan följa av att rekommendationer eller riktlinjer följs. Det är upp till varje medlem eller annan part att själva, i sin riskbedömning, avgöra om man vill följa Sodahuskommitténs rekommendationer och riktlinjer. Det åligger varje medlem eller annan part att, vid tillämpningen av rekommendationer och riktlinjer, stämma av med tillämpliga myndigheter att rekommendationerna och riktlinjerna är i överensstämmelse med gällande rätt och andra föreskrifter.

Bilaga 1 till Skadegruppens meddelande 2009-1 Högtryckspolningstest 2008-11-14

PS Sulfat Stefan Magnusson

Arrangemang



Data samtliga test:

Flöde, ca 100 l/m, motsvarande flöde som från en aquamat stråle

Munstycke, $d = 2,2 \text{ mm}$

Media temp, 30-40°C

Tryck ht-aggregat, 960-1000 bar

Tubmaterial motsvarande eldstad, compound 63,5 x 6,5 mm

Försök 1

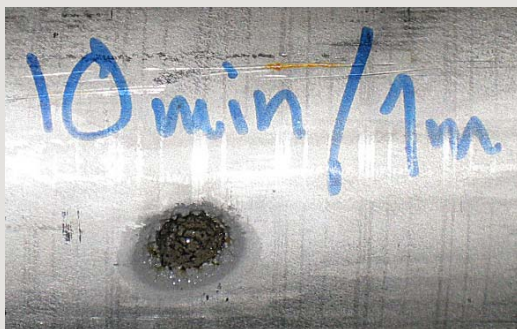


Specifikt försök 1:

Avstånd munstycke tub = 0,5 m

Tid = 5 min

Försök 2

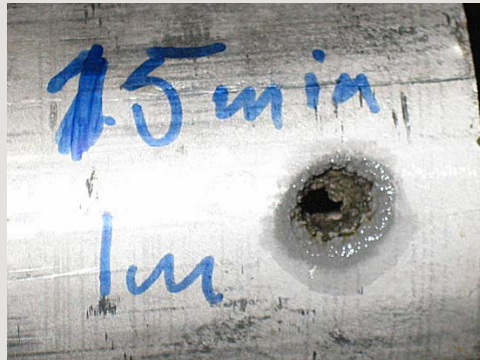


Specifikt försök 2:

Avstånd munstycke tub = 1,0 m

Tid = 10 min

Försök 3



Specifikt försök 3:

Avstånd munstycke tub = 1,0 m

Tid = 15 min, avbröts efter hål genom tubvägg

Försök 4



Specifikt försök 4:

Avstånd munstycke tub = 2,0 m

Tid = 30 min

Sammanfattning

Genomfört test visar definitivt att högtryckspolning kan på oroväckande kort tid ge materiella skador av utrustning. Tom med leverantör är minst sagt förvånad över resultatet på så kort spolningstid.

Samma munstycke, tryck, flöde och avstånd har återskapats. Faktum kvarstår dock att aquamatens rotation måste ha stoppat av någon anledning.

Funktions övervakning av aquamat är helt kopplad till ett antal personer som med hörsel och syn kontrollerar att funktionen upprätthålls. Den stora skillnaden vid årets bottenvätt jämfört med tidigare är att samma personer har övervakat ett större antal aquamater. Om någon rotation stoppar kan det vara mycket svårt att upptäcka pga oljud från övriga.

Funderingar

- Varför är inte riskerna med ht-spolning mer kända inom branschen. Ht-spolning av pannor har pågått på ett eller annat sätt i 20-25 år
- Funktions övervakning i samband med drift av flera aquamater måste skärpas upp
- Har vi koll på konsekvens av ht-spolning av pluggade värmeväxlare, rörledningar etc



BILLERUD AB, GRUVÖNS BRUK
Skador i sodapannans eldstadstuber

Copyright © Pöyry Energy Oy

All rights are reserved. This document or any part thereof may not be copied or reproduced without permission in writing from Pöyry Energy Oy

Copyright © Pöyry Energy Oy

Contact

Anja Klarin-Henricson
P.O. Box 93 (Tekniikantie 4 A)
FI-02151 Espoo
Finland
Domicile Espoo
Business ID 0577450-7
Tel. +358 10 33 24517
GSM +358 40 586 2868
Fax +358 10 33 24239
E-mail: energy.fi@poyry.com

anja.klarin@poyry.com
Pöyry Energy Oy

Summary

I Gruvöns sodapanna upptäckte man flera skador på komponentens yta vid underhållsstopp i september 2008. De flesta av skadorna fanns runt löphål nr 2 och bara enstaka skador fanns runt löphål nr 1. Metallografin av skadan i tub nr 52 undersöktes både av Inspecta och av Metso Power. Uppfattningen blev att antingen en lokal kraftigt korrosiv miljö hade förorsakat skadorna eller att de hade bildats under högtryckspolning av sodapannan.

Vid sodapannans tvätt används normalt en eller flera högtrycksaggregat som har roterande strålar som tas in i sodapannan genom löprännorna. Om någon av apparatens/apparaternas vattenpistol hade stoppat sin rotation under tvätten hade vattenstrålen kunnat skapa en dylik skada.

I denna rapport jämförs skadorna upptäckta i sodapannan med skador åstadkomna under HT-tester simulerande HT-panntvätt. Båda skador hade nästan likadana visuella utseenden. Skadornas ytor omfattade parallella diken i vattenstrålens riktning samt gropar och tomrum inne i materialet. Både den skadade panntuben och HT-testbiten innehöll transkristallina mikrosprickor runt gropar och hål. HT-testbitarnas mikrosprickor var för det mesta parallella, men panntuben innehöll också vertikala sprickor som liknade spänningskorrosionsprickor. Spänningskorrosionsprickorna hade brutit ut på skadade ytor under vattentvätt som följde strax efter skadornas uppkomst.

Analyserna genomförda av Pöyry Energy Oy bevisar att den preliminära orsaken till skadorna har varit en okontrollerad vattentvätt där en vattenstråle har blivit fördröjd för länge på den tuben som visade skador.

Pöyry Energy Oy rekommenderar att Gruvöns Bruk i fortsättningen skapar någon metod för att övervaka högtryckstvättens gång mera noggrant för att undvika liknande skador i framtiden. Vilken den här metoden är bör diskuteras med personer specialiserade på högtryckstvätt av pannor och liknande apparater.

Pöyry Energy Oy rekommenderar att Gruvöns Bruk diskuterar med HT-tvättmaskinernas leverantör metoder att optimera vattentryck för sodapannans vattentvätt.

Pöyry Energy Oy, Operations Management



Ilkka Heikkilä
Vice President



Anja Klarin-Henricson
Vice President
Material and Lifetime Management Services

Innehållet

1	BAKGRUND	4
2	SKADANS OMFATTNING OCH UTSEENDE I SODAPANNAN	4
2.1	Skadans omfattning i sodapannans eldstad	4
2.2	Resultaten från tidigare rapporter	6
3	TESTER MED HÖGTRYCKSPOLNING	7
4	PROVBITARNA FRÅN SODAPANNAN OCH HT-TESTER	9
4.1	Visuell granskning av skadorna	9
4.2	Skadans form och materialets mikrostruktur.....	11
4.2.1	Skadornas ytor med SEM.....	12
4.2.2	Sprickbildningen runt skadade området	15
4.3	Sammanfattning av analyserna	18
5	BRÄNNLUTENS AGGRESSIVITET	18
6	RISKER VID EXTREMT HÖGA TRYCK MED VATTENSPOLNING	18
6.1	Höga strömningshastigheter vid höga tryck	18
6.2	Höga strömningshastigheter och korrosion	19
7	DISKUSSION	24
7.1	Optimalt tvättryck under vattentvätt	24
7.2	Skadans förlopp under sodapannans HT-tvätt.....	25
8	SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER	26
9	LITTERATUR	27
10	BILAGA A	28

BILAGORNA:

1.	Skadans omfattning och utseende i Gruvöns sodapanna	8 s.
2.	Provbitarnas utseende	7 s.
3.	Provbitarnas mikrostruktur	7 s.
4.	SEM undersökningar om provbitarna	14 s.
5.	Sprickbildningen i provbitarna	18 s.

1 BAKGRUND

I september 2008 vid revisionsstoppet på Gruvöns Bruk upptäckte man tiotals runda skador på komponenttuber runt löphål 2 och några runt löphål 1. Likadana skador hade man sett i Sverige tidigare i Munksund och i Husum. I september 2008 hade Pöyry Energy Oy en möjlighet att inspektera de nyss upptäckta skadorna i Gruvöns sodapanna under vecka 43/2008. I november fick Pöyry Energy Oy från Gruvöns Bruk en skadad tub (tub nr 51) och lite senare några bitar av komponenttuber som hade skadats med högtryckspolning. Med dessa högtryckspolningstester (HT-tester) på Gruvöns Bruk simulerade man högtryckstvätt i sodapannan under stopp.

I denna rapport jämförs skadorna upptäckta i sodapannan med skador åstadkomna under HT-tester. Pöyry Energy Oy ger ett uttalande gällande hur skadorna i Gruvöns sodapanna har uppkommit, om HT-tvätten har varit orsaken till skadorna eller om skadorna har uppkommit under pannans drift.

Pöyry Energy Oy har fått provbitar också från Husums Bruk där en liknande skada upptäcktes i maj 2008 för andra gången. Husums Bruk har också genomfört flera HT-tester både med komponent och med kolstål. Resultaten från analyserna av provbitar både från Gruvöns Bruk och från Husums Bruk kommer att diskuteras. Högtryckspolningstesterna från båda bruken kompletterade varandra mycket bra. Dessa resultat har möjliggjort att få en god uppfattning om risker med höga vattentryck under tvätten av pannor eller liknande anordningar.

2 SKADANS OMFATTNING OCH UTSEENDE I SODAPANNAN

2.1 Skadans omfattning i sodapannans eldstad

Fotona i Bilaga 1 visar omgivningen runt löphål nr 2 och hur skadorna låg kring det under stoppet v. 43/08,



Fig. 1 Skadorna till vänster från löphål nr 2.



Fig. 2 Skadorna till höger från löphål nr 2.

Enligt Björn Lundgren från Gruvöns Bruk genomförde Inspecta en virvelströmsmätning av samtliga eldstadstuber runt löpränna nr 2 från nivån mellan lutsprutor och tertiär luftportar ner till sekundärluftregister. Inga skador upptäcktes. Okulär inspektion visade inga skador högre upp i pannans väggar eller på bottentuber.

2.2 Resultaten från tidigare rapporter



Fig. 3 a/b Tub nr 52 hade en djup skada på tubkronan och 2 mildare skador nära fenan. Den här tuben levererades till Metso Power i Göteborg.

Thomas Eilersson från Metso Power genomförde en undersökning på tub nr 52. Pöyry Energy Oy har inte sett utredningen men enligt Gruvöns Bruk hittades ingen värmepåverknings i kolstålet.

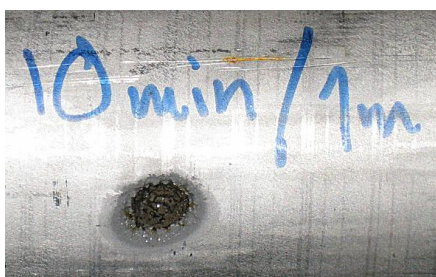
Enligt Metso Power har man sett i början av 1990-talet en liknande skada i en sodapanna i Portugal. Då hittade man ingen annan förklaring för den ovanliga skadan än en högtrycksvattenstråle under vattentvätt av pannan.

3 TESTER MED HÖGTRYCKSPOLNING

Stefan Magnusson från Gruvöns Bruk genomförde (2008-11-14) högtryckspolningstester med hjälp av en Aquamat apparat. Munstyckets diameter var 2.2 mm och vattenflödet ca 100 l/min. Temperaturen i median var ca 30 – 40°C. Enligt tabellen från DRC blev trycket då ca 1000 bar, BILAGA A. Testmaterialet var en normal komponenttub (63.5 x 6.5 mm).



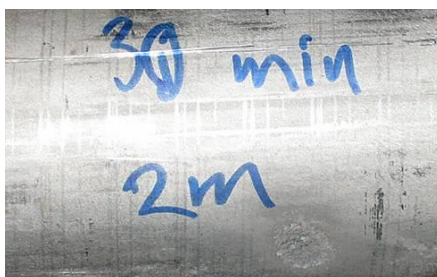
Försök nr 1



Försök nr 2



Försök nr 3



Försök nr 4

Fig. 4. Den här bildserien från Stefan Magnussons HT-försök visar klart hur på från 10 min till 15 minuter vattenstrålen gick genom komponenttubens vägg på ett avstånd på en meter från munstycket. På två meters avstånd förekom ett milt angrepp som hade formen av en ring och några gropar på mitten. På halv meters avstånd och 5 minuter var angreppet nästan lika stor som efter 10 minuter vid en meters avstånd.

Pöyry Energy Oy vet inte djupen av angrepp i Fig. 4. Testbiten från försök nr 3 blev levererat till Pöyry Energy Oy för undersökningar. HT-testerna på Husums Bruk i november visade, hur högre vattenflöde (tryck) ökar angrepp på komponenttub och ännu mera på kolstål, Fig. 5 och Tabell 1.

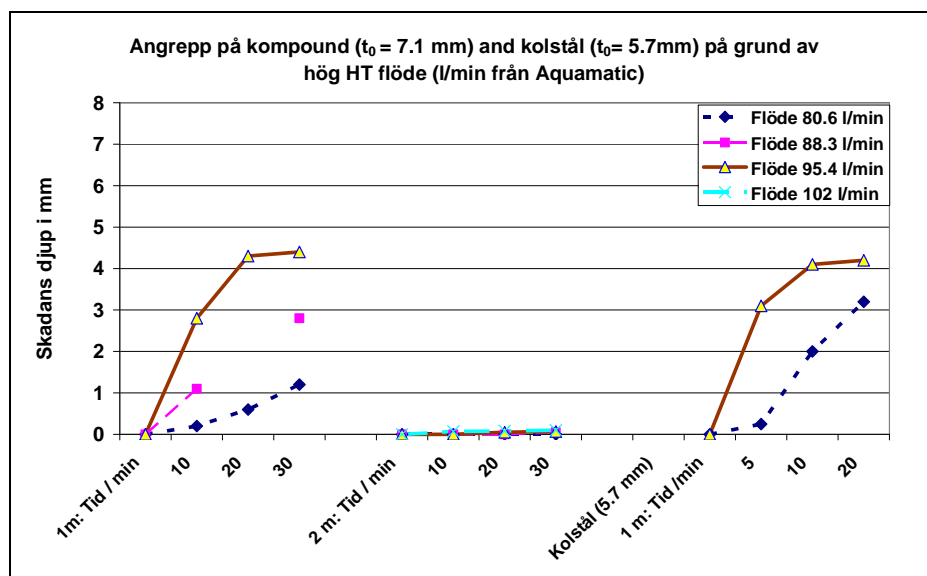


Fig. 5 Angreppet på komponenttub och kolstål tub vid Husums HT-tester i november 2008. Munstyckets diameter i dessa tester var 2.4 mm.

Tabell 1. Resultaten från HT-testerna på Husums Bruk i november 2008. Kolumnen till höger (Flöde 100 l/min) presenterar resultaten från HT-tester på Gruvöns Bruk i november 2008.

bar	500	600	700	800	960-1000
	Flöde 80.6 l/min	Flöde 88.3 l/min	Flöde 95.4 l/min	Flöde 102 l/min	Flöde 100 l/min
Komponent (7.1 mm)					
1m: Tid / min	1 m avstånd	1 m avstånd	1 m avstånd		1 m avstånd
10	0.2	1.1	2.8		3.7
20	0.6		4.3		7.1 (15 min)
30	1.2	2.8	4.4		
2 m: Tid / min	2 m avstånd	2 m avstånd	2 m avstånd	2 m avstånd	2 m avstånd
10	0	0	0	0.07	
20	0	0	0.05	0.08	
30	0	0.05	0.07	0.1	0.1
Kolstål (5.7 mm)					
1 m: Tid / min	1 m avstånd		1 m avstånd		
5	0.25		3.1		
10	2		4.1		
20	3.2		4.2		

Resultaten visar, att redan efter 10 minuters HT-spolning kunde man se klart begynnande skada på den rostfria stållytan. Skadan blev djupare med tiden och trycket. På två meters avstånd från munstycket blev skadan mycket mildare. Kolstål blev skadat även med lägre tryck och kortare spolningstider.

4 PROVBITARNA FRÅN SODAPANNAN OCH HT-TESTER

Bilagorna från 2 till 5 visar i detalj hur skadorna från Gruvöns sodapanna (tub 51) och från HT-testen (1000 bar – 1 m – 15 min) såg ut.

4.1 Visuell granskning av skadorna

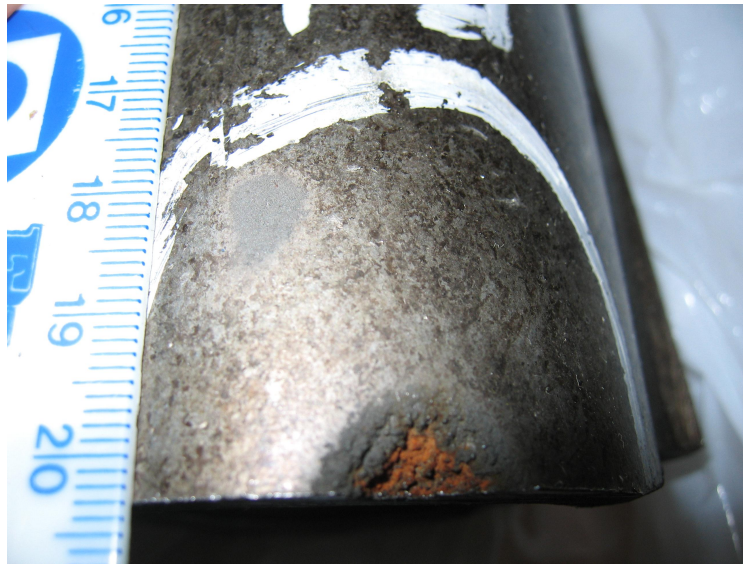


Fig. 6 Provbiten från tub nr 51 hade två skador: en halv skada som hade gått ända till kolstålsskiktet och en hel mild skada, som låg lite på sidan från tubkronan.

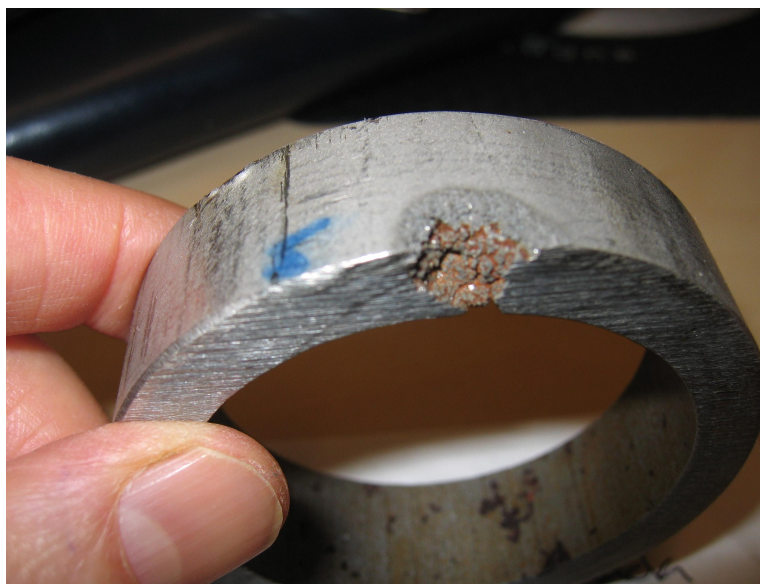


Fig. 7 Kompoundtub från HT-test nr 3 (1000 bar – 1 m – 15 min). Angreppet hade gått genom väggen.



Fig. 8 Den större skadan på tub 51 från sodapannan. Skadans bredd var ca 13 mm.

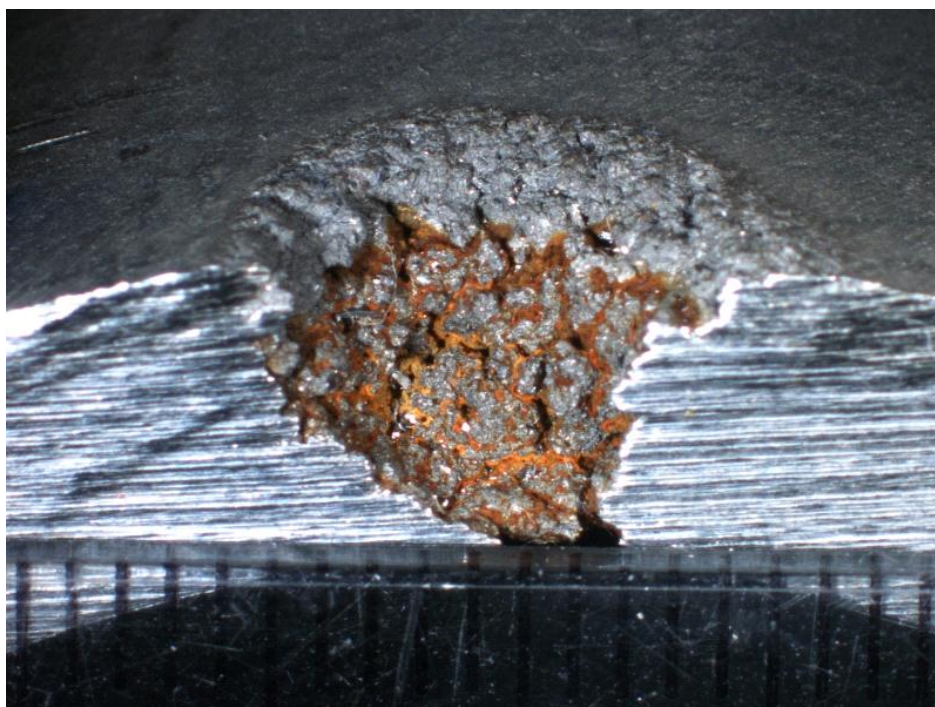


Fig. 9 Skadan efter HT-testen (1000 bar – 1 m – 15 min). Skadans bredd var ca 12 mm.

4.2 Skadans form och materialets mikrostruktur

Bilagorna 3 och 4 visar provbitarnas mikrostruktur runt de skadade områdena. Tvärsnitt på provbitarna visar mikrostrukturen och angreppets form.

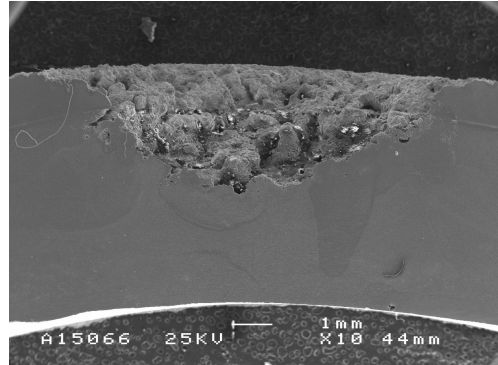


Fig. 10 Skadans tvärsnitt (tub 51).

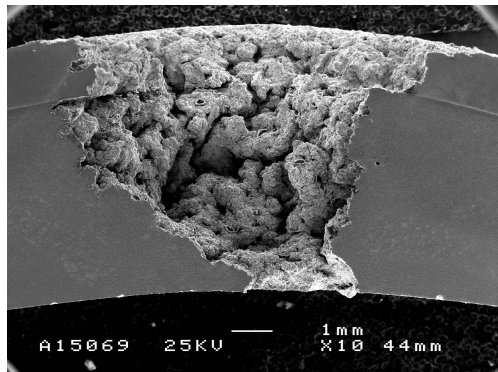


Fig. 11 Skadans tvärsnitt (HT 1000 bar – 1 m – 15 min).

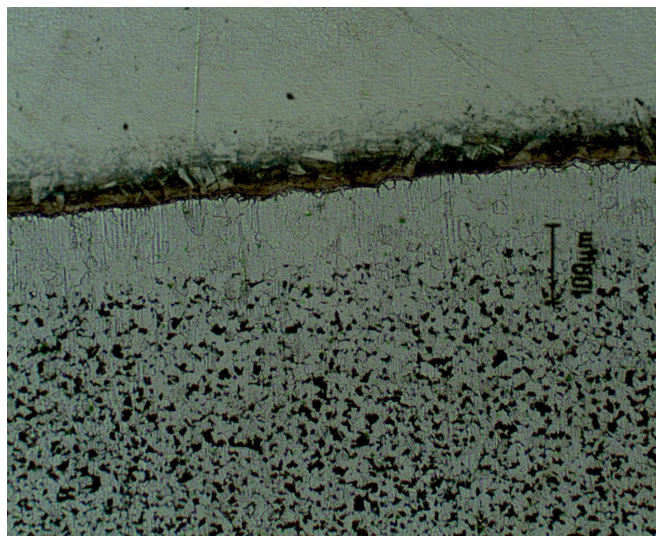


Fig. 12 Tub 51's mikrostruktur (vid gränsen mellan rostfritt stål och olegerat kolmanganstål) visar bredden av kolstålets avkolningszon vara på 100 μm, vilket är normalt. Ferrit-perlit strukturen ser också normal ut. Se i detalj i Fig. 24 på sidan 17.

4.2.1 Skadornas ytor med SEM

Bilaga 5 visar i detalj hur ytorna såg ut.

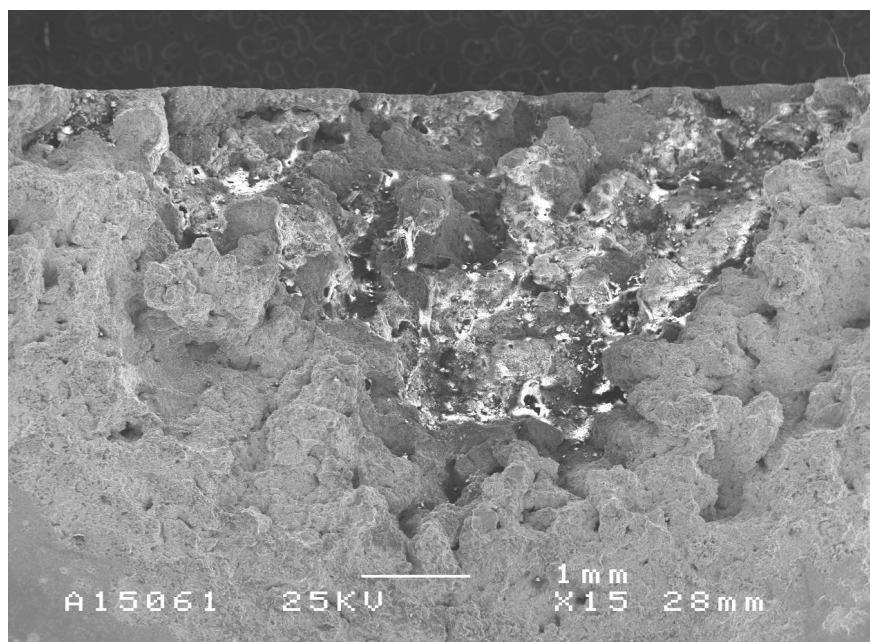


Fig. 13 Den stora skadan på tub nr 51. På angreppsgropens botten på kolstålet finns främmande ämnen som ser ljusa ut i SEM-bilden. De innehöll Si, Al, Ca, svavel och klorider.

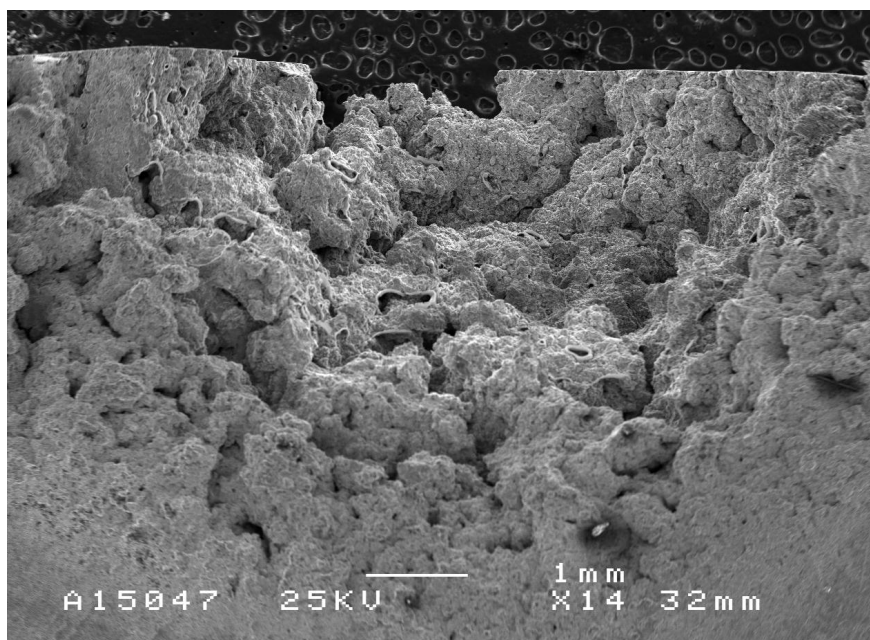


Fig. 14 Skadan på komponenttub från HT (1000 bar – 1 m – 15 min). På kolstålets yta finns oxider, vilkas form man ser bättre på Fig. 15.

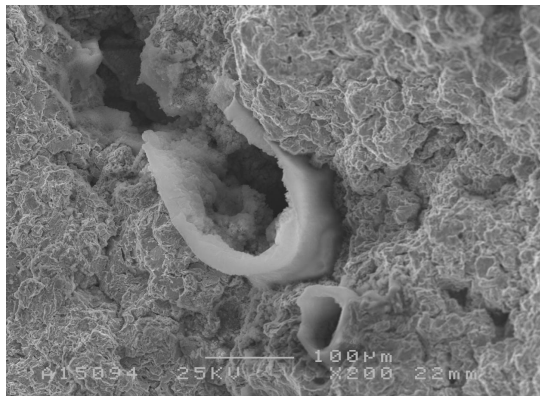


Fig. 15 Oxider inne i kolstålmaterial. Dessa oxider hade vuxit under HT testen (1000 bar – 1 m – 15 min). Observera korngränser som verkar ganska öppna.

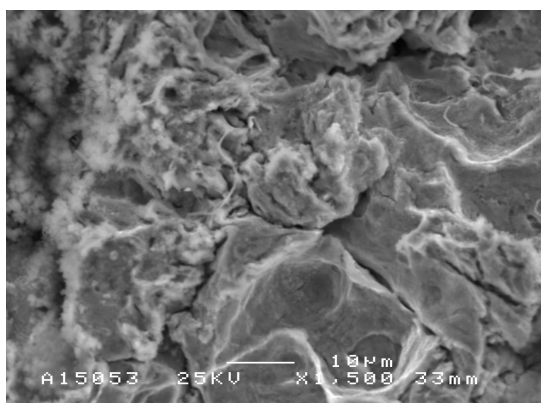


Fig. 16 Kolstålytan med samma förstoring som bilderna på föregående sida. Man ser flera öppna korngränser i strukturen.

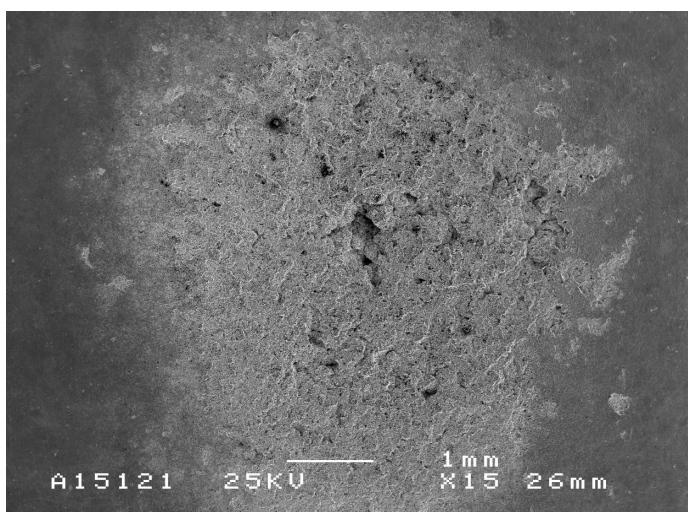


Fig. 17 Den milda skadan på tub nr 51 i pannan. Observera diken och gropar i skadan.

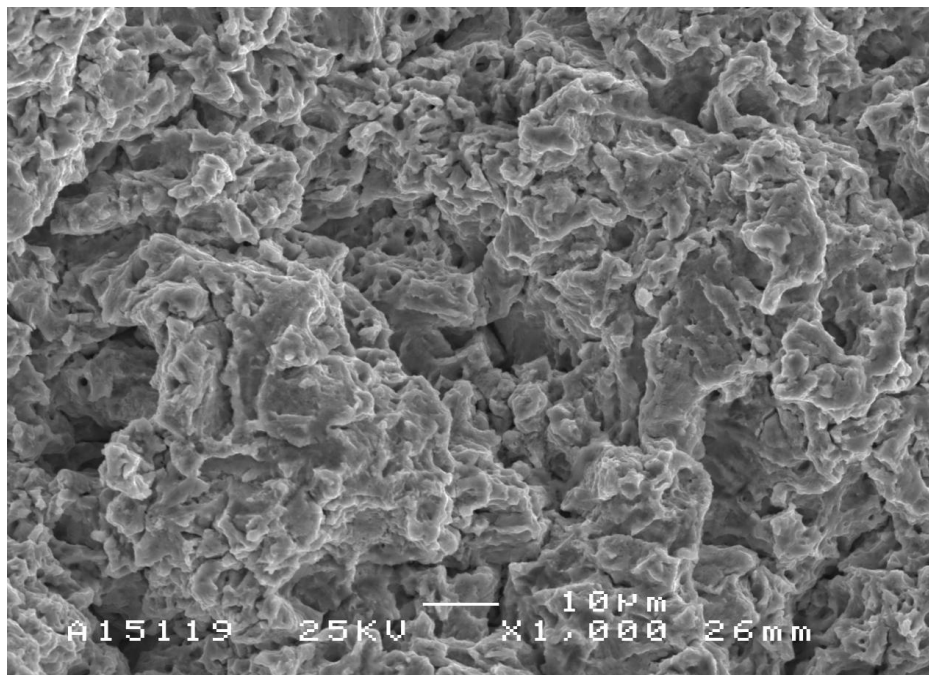


Fig. 18 Den milda skadan på tub nr 51 i pannan. Ytan är rostfritt.

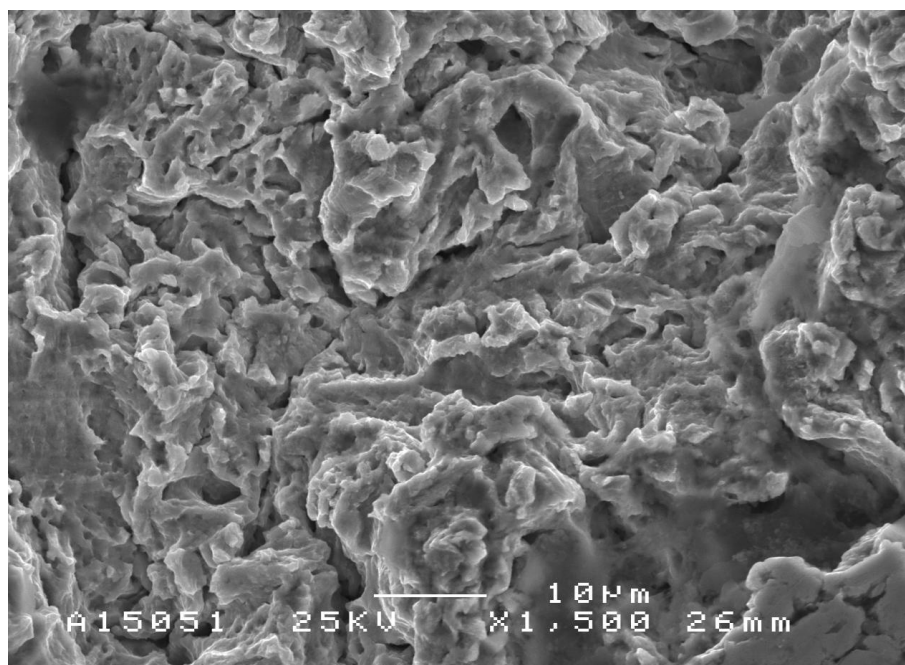


Fig. 19 Skadade rostfria ytan på HT-testbit (1000 bar – 1 m – 15 min).

När man jämför skadade rostfria ytor från den milda skadan på tub 51 och HT-testbiten ser man många likheter: likadana ytor och några öppna korngränser.

4.2.2 Sprickbildningen runt skadade området

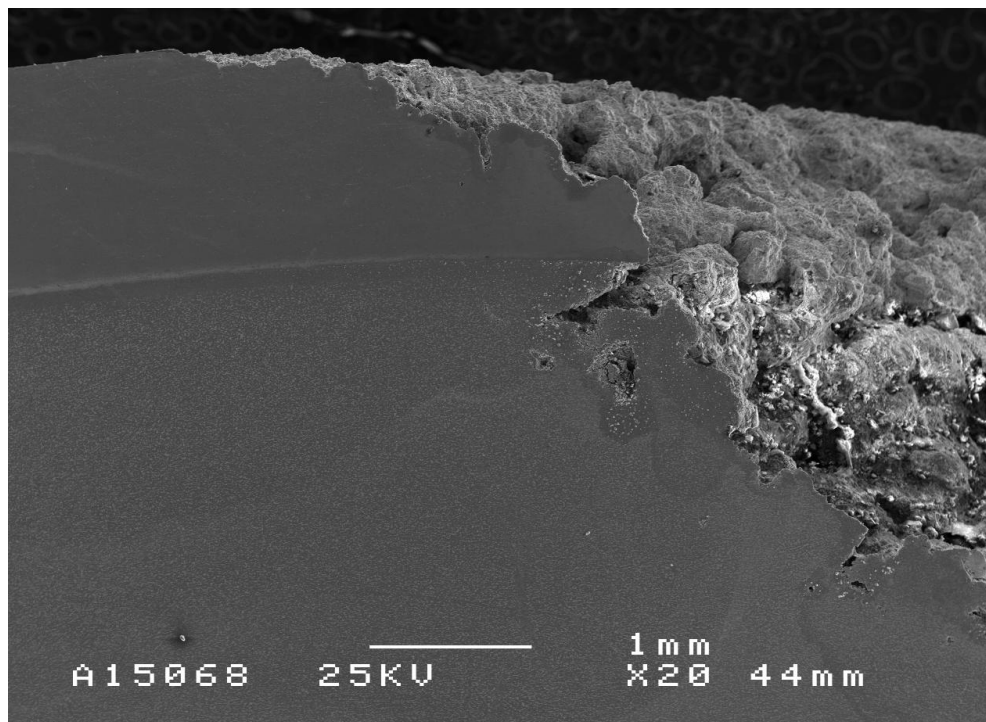


Fig. 20 Skadans kant vid tub 51. Skadans form är mycket mångsidig.

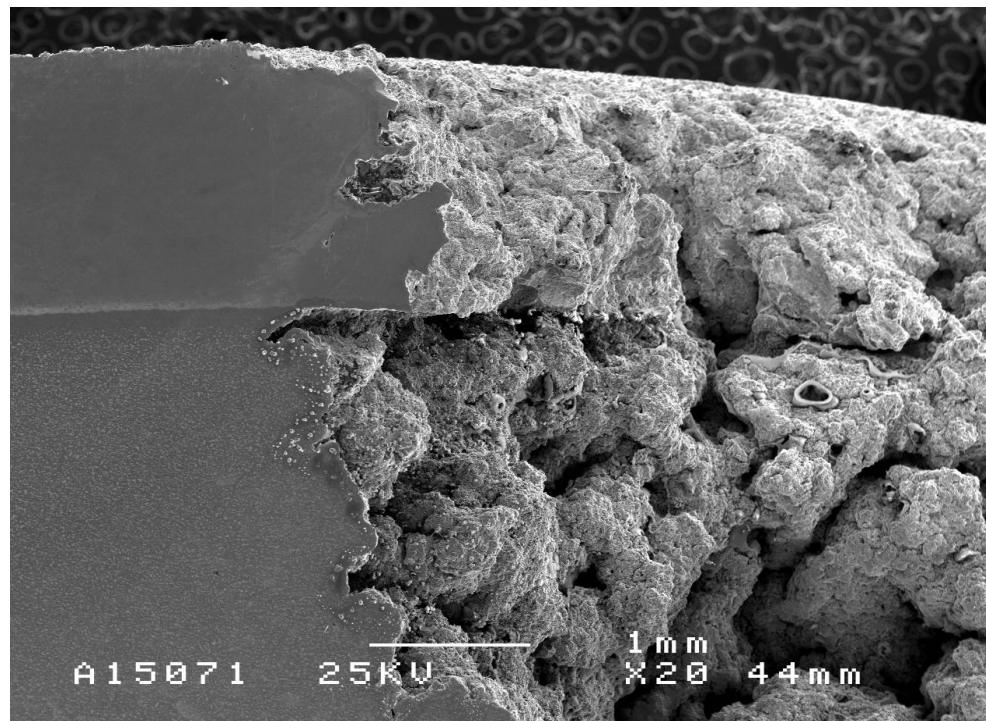


Fig. 21 Skadans kant vid HT-testtub. Skadans form ännu mera mångsidig än i bilden ovan .

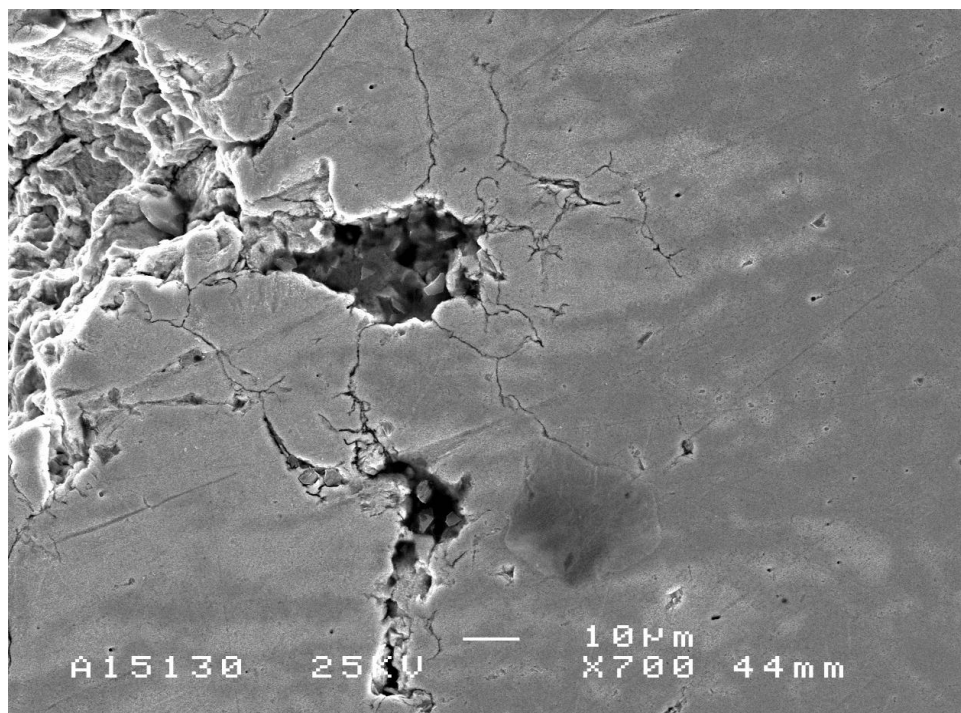


Fig. 22 Mikrosprickor vid skadans kant i tub 51. Många av sprickorna är vertikala sprickor och liknar spänningskorrosionsprickor.

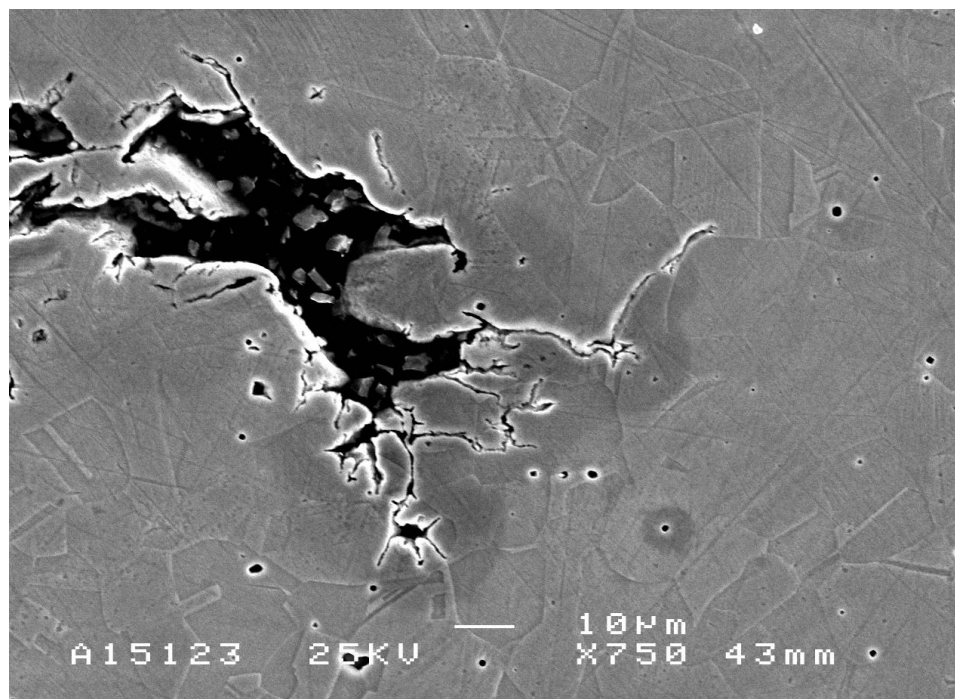


Fig. 23 Mikrosprickor vid skadans kant i tuben från HT-testen. Många av sprickorna är horisontala, korta och ganska raka i jämförelse med sprickorna i tub 51.

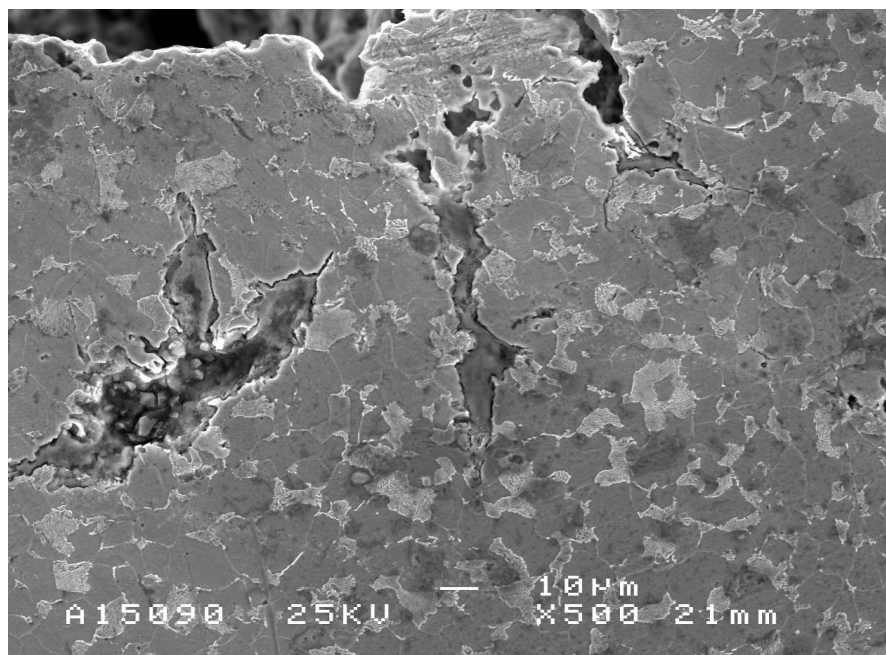


Fig. 24 Traskristallina mikrosprickor vid kolstål i tub 51. Sprickorna går genom perlit lameller.

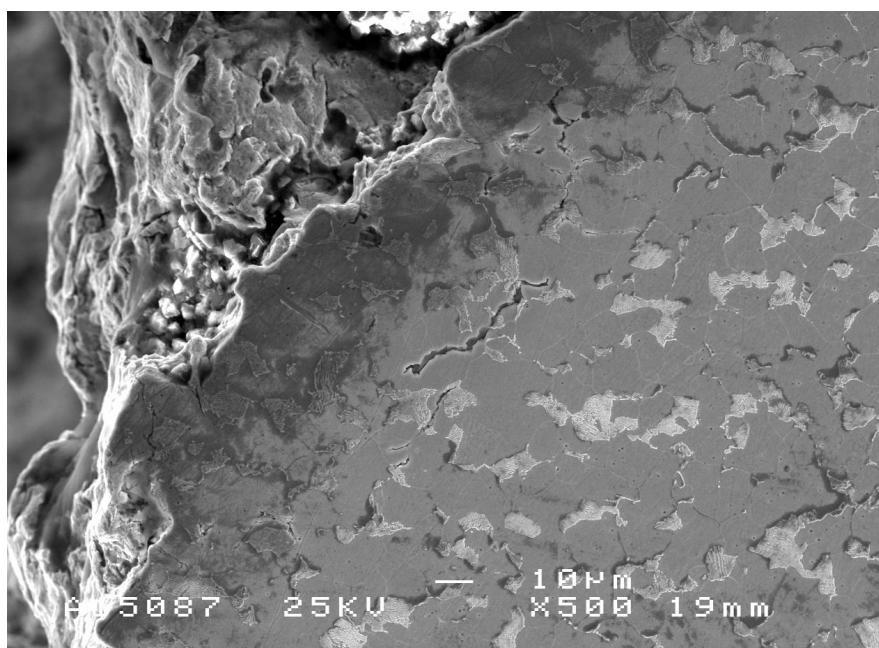


Fig. 25 Traskristallina mikrosprickor vid kolstål i tub HT-test. Sprickorna går genom perlit lameller.

Man kan inte se olikheter mellan strukturerna i kolstål från pannan och från HT-testen.

4.3 Sammanfattning av analyserna

Skadans utseende på tuben från pannan och från HT-testerna var mycket lika dvs. varje skada omfattade mera eller mindre parallella djupa diken och enstaka gropar i mitten av skadan samt några mindre gropar runt skadan.

Den metalliska mikrostrukturen i det olegerade stålet, dvs. perlit lamellerna i ferrit-perlit struktur, av panntub nr 51 var lika intakt som i de nya tuberna som hade använts för HT-tester.

Med EDAX analyserna upptäcktes på skadade områdena av provbiten från sodapannan kemiska element som härstammade från smältan dvs. svavel, klorider och några oxider. Inga främmande ämnen hittades på HT-testbitarna.

De transkristallina mikrosprickorna i ytterskiktet av komponenttuben från sodapannan var ganska breda och de innehöll klorider och svavel. Många av dessa sprickor hade likheter med spänningskorrosions sprickor. Sprickornas riktning var tvärs mot ytan, vilket betyder att (tangentiella) dragspänningar på stålytan dominerade vid sprickbildningen av dessa sprickor. Det fanns både horisontala och vertikala mikrosprickor i den skadade panntuben.

Mikrosprickorna i testbitarna från HT-tester var smala och innehöll inga främmande ämnen. Dessa sprickor hade få likheter med spänningskorrosions sprickor. Flesta av dessa sprickor var horisontala, vilket betyder att spänningarna hade varit i direkt vinkel mot ytan dvs. tryckspänningar dominerade vid sprickbildningen. De horisontala sprickornas antal var desto större, ju högre HT-testens tryck var. Då trycket under HT-testen på Gruvöns Bruk var extremt hög, dvs. 1000 bar, hade den HT-testbiten rikligt med horisontala sprickor.

Testbiten från panntub nr 51 visade gott om spänningskorrosionsprickor varför skillnaderna mellan dessa två mikrostrukturer (dvs. i panntuben och i HT-testbiten) var mycket avvikande. Testbitarna från Husums Bruk kompletterade bilden om sprickbildningen (HT-testbitarna genomförda med tryck på 500 bar och 600 bar), så man fick en god uppfattning om skadans uppkomst.

5 BRÄNNLUTENS AGGRESSIVITET

Pöyry Energy Oy har följt lutens kemi och aggressivitet vid Gruvöns Bruk under flera år i samband med sprickbildningen i konzentrorer.

Bädden och smältans beteende i Gruvöns sodapanna har varierat rätt mycket under det senaste året. Eftersom Pöyry Energy Oy antar att orsaken till skadan har varit HT-tvätt diskuteras inte smältans beteende i denna rapport.

6 RISKER VID EXTREMT HÖGA TRYCK MED VATTENSPOLNING

6.1 Höga strömningshastigheter vid höga tryck

Strömningshastighet genom munstycket

när flödet var ca 100 l/min och

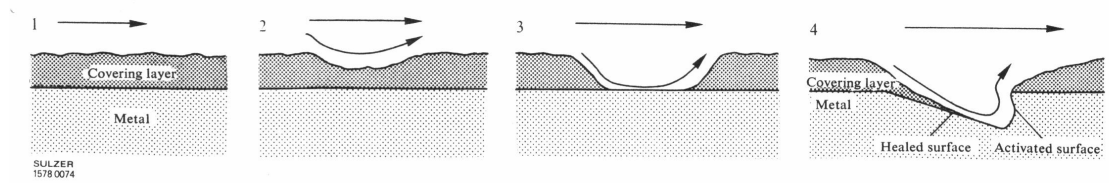
munstyckets diameter var 2.2 mm => $r = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$A = \pi r^2 = 3.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\text{Flöde / area} = (0.1/60) (\text{m}^3/\text{s}) / 3.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 0.438 \cdot 10^3 \text{ m/s} = \mathbf{438 \text{ m/s}}$$

6.2 Höga strömningshastigheter och korrosion

Dessa strömningshastigheter är extremt höga och kan lätt förorsaka korrosion, Figurer 26 och 28.

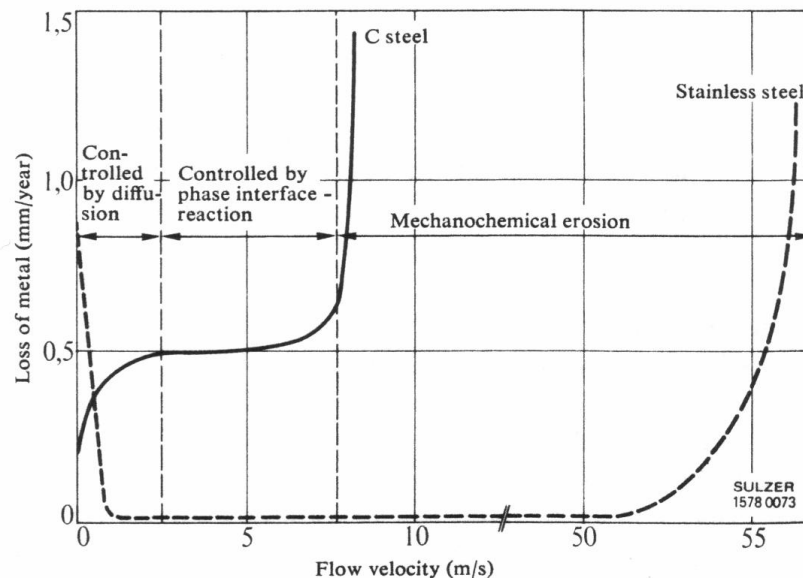


3 Progress of erosion corrosion.

Fig. 26 Utvecklingen av erosionkorrosion på grund av hög strömningshastighet (Pini och Weber).

Pini och Weber har publicerat korrosionshastigheten för kolstål, duplex och austenitiska stål som funktion av vattnets strömningshastighet, Figurer 27 och 28.

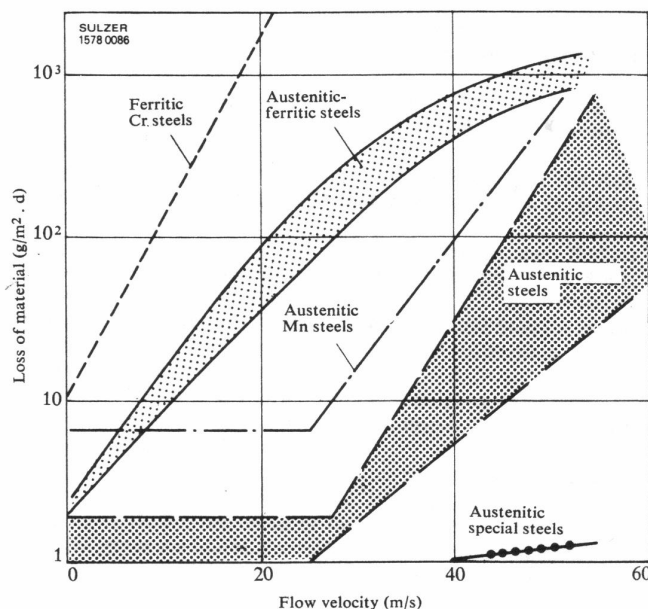
Figurerna visar att med ett passiverande stål finns det en kritisk strömningshastighet när det passiva skiktet inte mera kan bildas utan korrosionen ökar snabbt med flödet.



2 Flow velocity versus metal corrosion.

Fig. 27 Kolstål har mycket sämre motstånd mot höga strömningshastigheter än rostfritt stål (Pini and Weber).

När man tänker på strömningshastigheterna genom munstycket vid högtrycktvättning med tryck på 1000 bar (438 m/s) är det klart att risken för korrosion ökar snabbt, om vattenstrålen stannar på samma ställe för en längre tid. Figurerna visar också att ju mera aggressiv korrosionsmiljön är, desto större blir korrosionshastigheten.



20 Influence of flow velocity on loss of material in media with high H₂S content and low pH values.

Fig. 28 Korrosionshastigheten av olika stålsorter som funktion av strömningshastigheten i korrosionsmedia med svavelväte (H₂S) och låg pH (Pini och Weber).

Smitt med sin forskningsgrupp har undersökt erosion korrosion och kavitation i vattenlösningar. Han kallar den typen av korrosion för FILC (flow induced localized corrosion) dvs. strömnings inducerad lokalkorrosion.

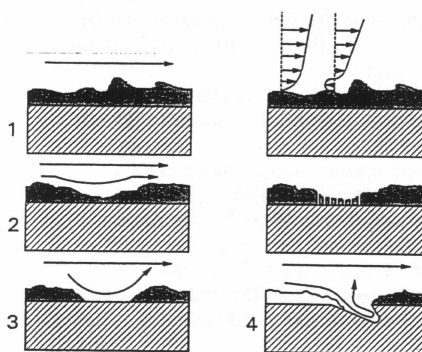


FIGURE 1 - Development of flow induced localized corrosion (FILC)

Fig. 29 Hur strömnings inducerad lokalkorrosion dvs. erosion korrosion i detta fall utvecklar sig till gropar under det passiva skiktet (Smitt et al (1996)).

Smitt med sina medarbetare har genomfört flera korrosionsförsök för stål för att få fram hur mycket en vinkelrät vattenstråle under vätskan kan förorsaka korrosion. Fig. 30 visar en enkel bild på parametrar vid denna korrosionstest.

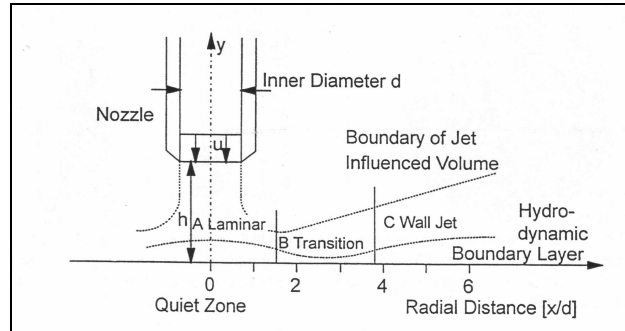


Fig. 30 Strömningsmönster under vattenstrålen (flow pattern at submerget jet). Radiella avståndet (x/d) är en viktig parameter (Smitt et al (1998)).

Smitts grupp upptäckte att det blev ett turbulent område sett från strålens mittpunkt på ett avstånd av ungefär 3 – 5 gånger strålens diameter, där det hydrodynamiska skiktet på materialet blev minimalt. Inom detta område (B i Fig. 26) kan man kalkylera materialets brottspänning R (N/m^2) som funktion av strömningshastigheten genom munstycket (u_0)

$$R = 0.0447 \rho u_0^2 Re^{-0.182} (x/d)^{-2} \quad (1)$$

när ρ = densiten (kg/m^3), Re = Reynolds tal = $u_0 \cdot d/\nu$, ν = vätskans kinematisk viskositet (m^2/s), d = munstyckets diameter (m), x/d = radial avstånd från mitten.

Ekvationen (1) visar att genom att öka strömningshastigheten tillräckligt kan man förstöra materialets ytskikt. Strömningshastighetens påverkan syns klart i Fig. 31 och 32.

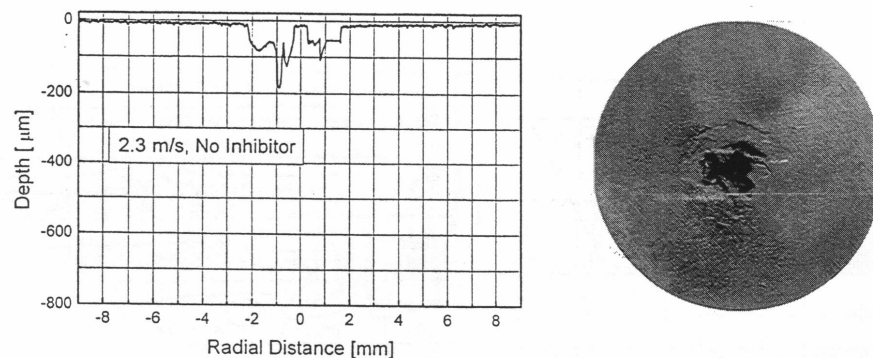


FIGURE 12 - Depth variation as function of radial distance (submerged jet experiment: 5 M MEA; 60 g/L S_x ; 44 bar H_2S (hot), 130°C; 2.3 m/s, 96h)

Fig. 31 Strömningshastigheten var 2.3 m/s mot kolstål i en lösning av 5 MEA och H_2S . Ytjämnheten visar korrosion på mitten (Smitt et al (1998)).

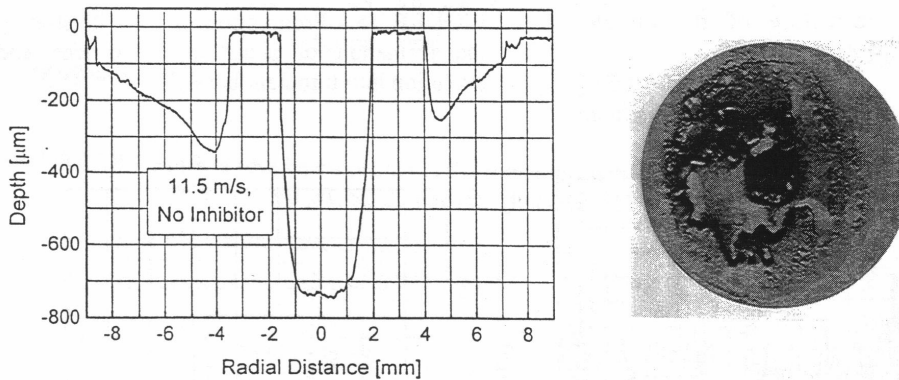


FIGURE 13 - Depth variation as function of radial distance (submerged jet experiment: 5 M MEA; 60 g/L S_x; 39 bar H₂S (hot); 130°C; 11,5 m/s, 96h)

Fig. 32 Strömningshastigheten var 11.5 m/s mot kolstål i en lösning av 5 MEA och H₂S. Ytjämnheten visar gropar både i mitten och på ett avstånd av ca 4.5 gånger munstyckets diameter (Smitt et al (1998)).

Korrosionen kunde minskas genom att använda inhibitor i vätskan. Smitt med sina medarbetare har visat att korrosionsprodukter eller andra skikt på metallytan kräver höga spänningar för att kunna lossna med vattenstråle, Fig. 33 och 34.

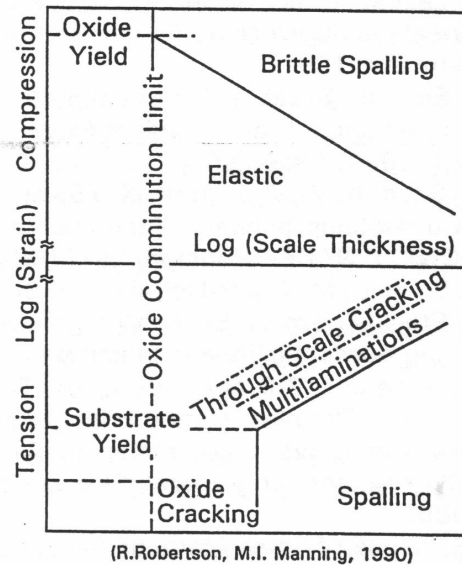


FIGURE 2 - Failure mode map for tensile and compressive strains³

Fig. 33 Skada mönster diagram för drag- och tryckspänningar. Observera oxidskiktets tjockleks påverkan på tryckspänningar och på dragspänningar (Smitt et al (1996)).

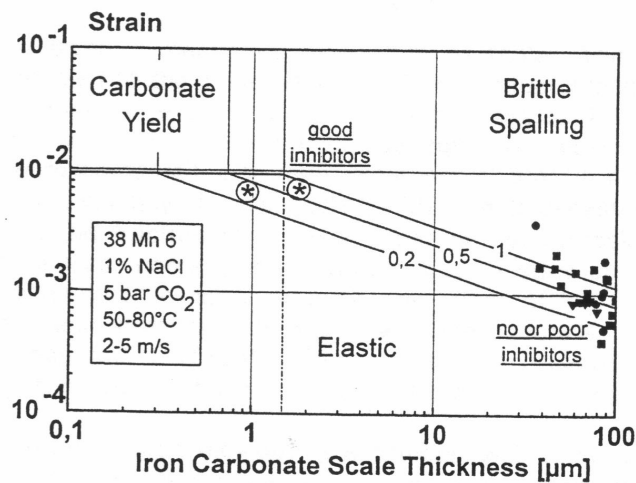


FIGURE 29 - Critical iron carbonate scale thicknesses depending on environmental conditions of scale growth

Fig. 34 Skada mönster diagram för FeCO_3 . Om skiktet på stålytan är tjock dvs. ca 100 μm krävs inte mycket tryckspänningar när skiktet kommer att spalta. När karbonatens tjocklek på ytan är under 1 μm är skiktet flexibelt och kräver höga tryckspänningar för att lossna (Smitt et al (1996)).

Ju tjockare det icke-metalliska skiktet på stålytan är, desto mindre spänningar krävs i jämförelse med den teoretiska hållfastheten av materialet. Fig. 34 visar hur korrosionsinhibitor minskar karbonatskiktets tjocklek och således höjer den kritiska brottgränsen för skiktets klyvning.

Smitt har utvecklat flera ekvationer med vilka man kan räkna ut de spänningar man behöver för att få loss skiktet på ytan. Han har i sina ekvationer ingen parameter för avståndet från munstycket, dvs. h i Fig. 30. Avståndet mellan munstycket och metallytan var i de flesta av hans korrosionstester bara 5 mm.

I verkligheten minskar turbulenta vattenstrålens styrka ju längre bort man kommer från munstycket. Enligt Perry's Chemical Engineers' Handbook kan man skriva strömningshastigheten i den turbulenta strålens längdriktning som

$$V_c/V_0 = K (D_0/x) \quad (2)$$

gäller för $7 < (x/D_0) < 100$

V_0 = strömningshastigheten genom munstycket

V_c = strömningshastigheten på avstånd x

D_0 = munstyckets diameter

K = konstant

$K = 5$ när V_0 är mellan 2.5 m/s och 5.0 m/s

$K = 6.2$ när V_0 är mellan 10 m/s och 50 m/s.

Inga värden av K för högre strömningshastigheter har givits.

Enligt ekvationen (2) gäller den till avståndet 100 gånger munstyckets diameter. Det betyder att den gäller ända till 22 cm när man tänker på HT-tester på Gruvöns Bruk.

På avstånd av 22 cm minskar enligt ekvationen (2) strömningshastigheten till 6.2 % av det värdet den har vid munstycket, när D_0 är 2.2 mm.

Värden för strömningshastigheter högre än 50 m/s går inte att räkna ut enligt denna ekvation, men man kan konstatera att vattenstrålens hastighet vid 1 meters avstånd från munstycket blir mycket lägre än 438 m/s vid 1000 bars tryck.

7 DISKUSSION

7.1 Optimalt tvättryck under vattentvätt

Om man presenterar HT-testernas (Tabell 1) resultat som funktion av strömningshastighet får man en intressant bild, Fig. 35.

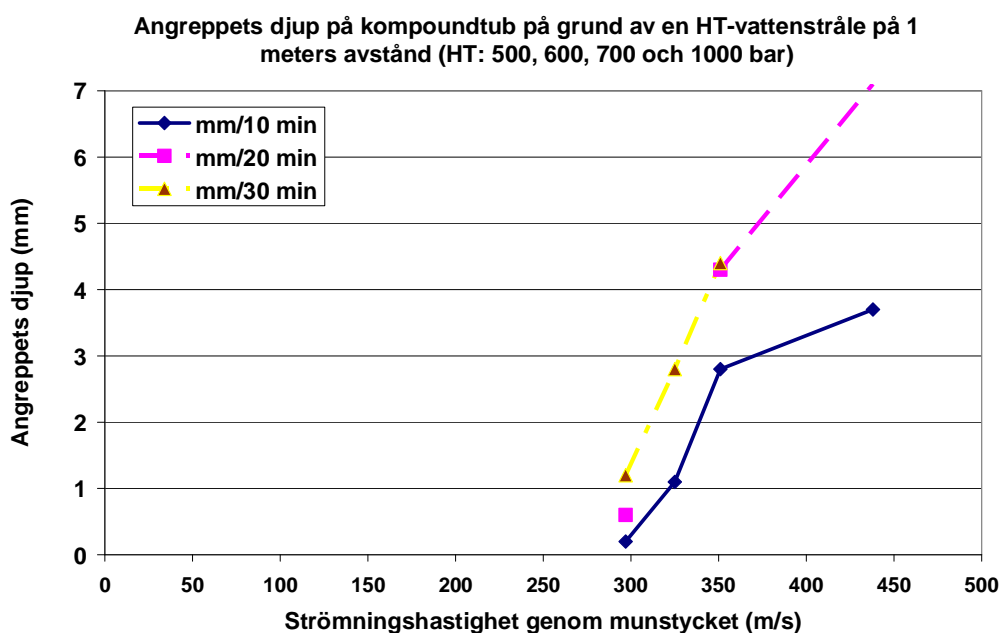


Fig. 35 Angreppet på komponenttub i mm på funktion av HT-vattenstrålens strömningshastighet genom munstycket när avståndet mellan munstycket och komponenttuben var 1 m.

Fig. 35 sammanställer alla resultat från HT testerna på Husums och Gruvöns Bruk och visar att **en okontrollerad högtryckspolning** kan på kort tid ge materiella skador på utrustning. Dessutom skall man komma ihåg att under sodapannans vattentvätt finns alltid sodasmältans korroderande ämnen med i vätskefasen.

Angående Fig. 35 kan man konstatera, att risken för angrepp ökar drastiskt när avståndet mellan munstycket och komponenttuben minskar och tiden för angreppets uppkomst minskar drastiskt när trycket höjs.

Det optimala vattenflödet som funktion av vattentrycket versus munstyckets diameter har presenterats av DRC, se Bilaga A i slutet av denna rapport. Man kan optimera vattentrycket så att risken för angrepp på mycket kort tid blir lägre.

Det allra säkraste sättet att minska risken för HT-skador är att se till att vattenpistolerna roterar hela tiden när tvätten är på gång i pannan.

I Gruvöns sodapanna hade HT-vattenpistolerna genom löphål nr 2 haft flera korta avbrott och avståndet mellan pistolernas munstyck och vägg tuberna nära löphålet var mycket litet. Då om vattentrycket var högt hade det räckt bara några få minuter till skador man såg i pannan runt löphål nr 2.

7.2 Skadans förlopp under sodapannans HT-tvätt

Skadorna från Gruvöns sodapanna och HT-testen (1000 bar – 1 m – 15 min) hade nästan likadana visuella utseenden. Skadornas ytor omfattade parallella diken i vattenstrålens riktning samt gropar och tomrum inne i materialet. Skadornas bredd och längd var ungefär 3 till 5 gånger munstyckets diameter såsom Smitt et al. har visat i litteraturen. Likheter syns klart när man jämför skadans utseende i Försök 1 i Fig. 4 med skadans utseende visat i Fig. 32 enligt Smitt's försök.

Resultaten från HT-testen visade att mikrosprickorna ofta var horisontala vilket betyder att tryckspänningarna hade varit dominerande vid sprickornas uppkomst. Tryckspänningarna för skadad yta stämmer även med Smitt et al. Inne i HT-testbitens struktur fanns det gott om hål och tomrum; speciellt i kolstålet. Tryckets påverkan på sprickornas frekvens var klar; ju högre tryck desto mera horisontala sprickor.

Många av mikrosprickorna i den skadade komponenttuben (nr 51) från Gruvöns sodapanna var lika med spänningsskorrosionsprickor, vilket betyder att dragspänningar hade funnits vid sprickornas uppkomst. Spänningsskorrosionsprickorna var transkristallina vilket indikerar att klorider bistått till spänningsskorrosion. Under vattentvätt finns dock alltid smältans komponenter mera eller mindre lösta i tvättvatten. Dessa spänningsskorrosionsprickor var dock korta och ofta fyllda med klorider. Ytterligare fanns i samma material horisontala sprickor och hål så att de typiska märkena på högtrycksskador fanns även i pannan.

Skillnaderna i testbitarnas (pannatub nr 51 och HT-tuben från Gruvöns Bruk) mikrostrukturer var extremt stora och därför var det avgörande att kunna undersöka testbitarna också från Husums panna och HT-tester.

Med provbitar från två massabruk kunde man få en bättre bild av skadans uppkomst:

- Skadan dvs. gropan på komponenttuben förekom på grund av ett okontrollerat stopp på (aquamatics) vattenpistolens rotation.

- Den skadade rostfria stålytan blev sedan påverkad av spänningskorrosion på följande sätt. Efter vattenpistolen hade börjat rotera igen, fanns klorider redan inne i skadade ytor så att spänningskorrosion med korta sprickor kunde bryta ut. Skadan förekom ju när pannan ännu var varm (> 60°C). Det fanns tillräckligt med dragspänningar på komponentens rostfria stålskikt för att starta spänningskorrosion, när pannan förkyldes under vattentvätt.

8 SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER

I Gruvöns sodapanna upptäckte man flera skador på komponentens yta vid underhållsstopp i september 2008. De flesta av skadorna fanns runt löphål nr 2 och bara enstaka skador fanns runt löphål nr 1. Metallografin av skadan i tub nr 52 undersöktes både av Inspecta och av Metso Power. Uppfattningen blev att antingen en lokal kraftigt korrosiv miljö hade förorsakat skadorna eller att de hade bildats under högtryckspolning av sodapannan.

Högtrycksaggregat man använder vid panntvätt har roterande strålar som tas in i sodapannan genom löprännorna. Före stoppet i september 2008 hade man använt en aquamatic tvättapparat vid varje löphål samtidigt. Tidigare hade antalet av apparater samtidigt i bruk varit lägre. Om någon apparats vattenpistol hade stoppat sin rotation under tvätten hade vattenstrålen kunnat skapa en dylik skada. En kort serie av högtryckspolningsterster genomfördes vid Gruvöns Bruk. Testbitar från skadade delen av HT-testen och panntub nr 51 levererades till Pöyry Energy Oy.

Analyserna genomförda av Pöyry Energy Oy bevisar att den preliminära orsaken till skadorna har varit en okontrollerad vattentvätt där en vattenstråle har blivit fördröjd för länge på den tuben som visade skador. Övervakning av dessa aquamat aggregaten kontrolleras manuellt med hörsel och syn. Om flera apparater används samtidigt blir det omöjligt att upptäcka en apparat, som har stannat av någon orsak. Sådant okontrollerat stopp har hänt på Gruvöns sodapanna i september 2008 vid aquamat aggregaten vid löpränna nr 2 och löpränna nr 1. Skadornas läge runt löphål nr 2 visade att vattenpistolen/erna hade stoppat sin rotation vid flera tillfällen eller vid ett tillfälle hade den rört sig långsamt i perioder.

Pöyry Energy Oy rekommenderar att Gruvöns Bruk i fortsättningen skapar någon metod för att övervaka högtryckstvättens gång mera noggrant för att undvika liknande skador i framtiden. Vilken den här metoden är bör diskuteras med personer specialiserade på högtryckstvätt av pannor och liknande apparater.

Pöyry Energy Oy rekommenderar att Gruvöns Bruk diskuterar med HT-tvättmaskinernas leverantör metoder att optimera vattentryck för sodapannans vattentvätt.

9

LITTERATUR

Ivan **Falk**, Undersökning av vattensidiga beläggningar i en bottenrör, Husums Fabriker Sodapanna 7, Vattenfall Power Consultant AB, PM-07-046, 2007-10-12, 9s. 11s.

Jojje **Lundblad**, Högttryckspolningstest Panntuber, M-real Husum, Norrvac, Inspekta, 2008-11-19/20, ppp., 22 s.

Björn **Lundgren**, Tubskador T5, Billerud – Gruvön, 2008-10-21, pp, 19s.

Stefan **Magnusson**, Högttryckspolningstest, Billerud Gruvöns Bruk, 2008-11-14, ppp,8s.

Robert H. **Perry** and Don W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw Hill, 7th Ed. 1977.

G. **Pini** and G. Weber, Materials for Pumping Seawater and Media with High Chlorine Content, Sulzer Technical Review, 2/1979, 69-80.

G. **Smitt**, T. Gudde and E. Strobel-Effertz, Fracture mechanical properties of CO₂ Corrosion product scales and their relation to localized corrosion, CORROSION96, (1996) Paper No 9

G. **Smitt**, C. Bosh, U. Pankoke, W. Bruckhoff and G. Siegmund, Evaluation of critical flow intensities for FILC in sour gas production, CORROSION98,(1998) Paper 46.

Jan **Wåle**, Materialundersökning av bottenrör från sodapanna TP6, Inspekta, Teknisk rapport 1007-11-22.

10 BILAGA A

Tabell från DRC

uk bar)	Doorstroming (Liters per minuut)																																Werkgebied 1				Werkgebied 3
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,70	1,75	1,80	1,90	2,00	2,10	2,15	2,20	2,30	2,40	2,60	2,80	3,00	3,30	3,60	3,90	4,30	4,50				
50	0,8	1,6	2,2	2,8	3,2	4,0	4,7	6,3	7,1	7,9	8,7	9,5	10,3	11,1	11,9	12,6	13,4	14,2	15,8	17,4	19,0	20,6	22,1	23,7	25,3	28,5	31,6	39,5	47,4	55,3	63,2	79,1	84,3				
80	1,0	2,0	2,8	3,6	4,0	5,0	6,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0	30,0	32,0	36,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	100	120				
100	1,1	2,2	3,1	4,0	4,5	5,6	6,7	8,9	10,1	11,2	12,3	13,4	14,5	15,7	16,8	17,9	19,0	20,1	22,4	24,7	26,8	29,1	31,3	33,5	35,8	40,2	44,7	55,9	67,1	78,3	89,4	112	134				
120	1,2	2,4	3,4	4,4	4,9	6,1	7,3	9,8	11,0	12,2	13,5	14,7	15,9	17,1	18,4	19,6	20,8	22,0	24,5	26,9	29,4	31,8	34,3	36,7	39,2	44,1	49,0	61,2	73,5	85,7	98,0	122	146				
140	1,3	2,6	3,7	4,8	5,3	6,6	7,9	10,6	11,9	13,2	14,6	15,9	17,2	18,5	19,8	21,2	22,5	23,8	25,0	29,1	31,7	34,4	37,0	39,7	42,3	47,6	52,9	66,1	79,4	92,6	106	132	158				
150	1,4	2,7	3,8	4,9	5,5	6,8	8,2	11,0	12,3	13,7	15,1	16,4	17,8	19,2	20,5	21,9	23,3	24,6	27,4	30,1	32,9	35,6	38,3	41,4	43,8	49,3	54,8	68,5	82,2	95,9	110	137	164				
160	1,4	2,8	4,0	5,1	5,7	7,1	8,5	11,3	12,7	14,1	15,6	17,0	18,4	19,8	21,2	22,6	24,0	25,5	28,3	31,1	33,9	36,8	39,6	42,2	45,3	50,9	56,6	70,7	84,9	99,0	113	141	170				
180	1,5	3,0	4,2	5,4	6,0	7,5	9,0	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0	25,5	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0	48,0	54,0	60,0	75,0	90,0	105	120	150	180				
200	1,6	3,2	4,4	5,7	6,3	7,9	9,5	12,6	14,2	15,8	17,4	19,0	20,6	22,1	23,7	25,3	26,9	28,5	31,6	34,8	37,9	41,4	44,3	47,4	50,6	58,9	63,2	79,1	94,9	111	128	158	190				
220	1,7	3,3	4,6	6,0	6,6	8,3	9,9	13,3	14,9	16,6	18,2	19,9	21,6	23,2	24,9	26,5	28,2	29,8	33,2	36,5	39,8	43,1	46,4	49,7	53,1	59,7	66,3	82,9	99,5	116	133	166	198				
240	1,7	3,5	4,8	6,2	6,9	8,7	10,4	13,9	15,6	17,3	19,1	20,8	22,5	24,2	26,0	27,7	29,4	31,2	34,6	38,1	41,6	45,0	48,5	52,0	55,4	62,4	69,3	86,6	104	121	139	175	210				
260	1,8	3,6	5,0	6,5	7,2	9,0	10,8	14,4	16,2	18,0	19,8	21,6	23,4	25,2	27,0	28,8	30,6	32,4	36,1	39,7	43,3	46,9	50,5	54,1	57,7	64,9	72,1	90,1	108	126	144	180	225				
280	1,9	3,7	5,2	6,7	7,5	9,4	11,2	15,0	16,8	18,7	20,6	22,4	24,3	26,2	28,1	29,9	31,8	33,7	37,4	41,2	44,9	48,6	52,4	56,1	59,9	67,5	74,8	93,5	112	131	150	180	224				
300	1,9	3,9	5,4	7,0	7,7	9,7	11,6	15,5	17,4	19,4	21,3	23,2	25,2	27,1	29,0	31,0	32,9	34,9	38,7	42,6	46,5	50,3	54,2	58,1	62,0	69,7	77,5	96,0	116	135	155	194	240				
350	2,1	4,2	5,9	7,5	8,4	10,5	12,5	16,7	18,8	20,9	23,0	25,1	27,2	29,3	31,4	33,5	35,6	37,6	41,8	46,0	50,2	54,4	58,6	62,7	70,5	78,3	97,5	117	137	157	200	250					
400	2,2	4,5	6,3	8,0	8,9	11,2	13,4	17,9	20,1	22,4	24,6	26,8	29,1	31,3	33,5	35,8	38,0	40,2	44,7	49,2	53,7	58,1	62,6	67,1	71,6	80,5	89,4	110	131	152	200	250					
450	2,4	4,7	6,6	8,5	9,5	11,9	14,2	19,0	21,3	23,7	26,1	28,5	30,8	33,2	35,6	37,9	40,3	42,7	47,4	52,2	56,9	61,7	66,4	71,2	75,9	85,4	94,9	119	142	166	220	280					
500	2,5	5,0	7,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	90,0	109	128	150	175	230	290					
550	2,6	5,2	7,3	9,4	10,5	13,1	15,7	21,0	23,6	26,2	28,8	31,5	34,1	36,7	39,3	42,0	44,6	47,2	52,4	57,7	62,9	68,2	73,4	78,7	83,9	94,1	105	131	157	184	240	300					
600	2,7	5,5	7,7	9,9	11,0	13,7	16,4	21,9	24,6	27,4	30,1	32,9	35,6	38,3	41,1	43,8	46,6	49,3	54,6	60,0	65,7	71,2	76,7	82,2	87,6	98,6	110	137	164	192	250	310					
650	2,9	5,7	8,0	10,3	11,4	14,3	17,1	22,8	25,7	28,5	31,4	34,2	37,1	39,9	42,8	45,6	48,5	51,3	57,0	62,7	68,4	74,1	79,8	85,5	91,2	103	133	163	193	250	310	380					
700	3,0	5,9	8,3	10,6	11,8	14,8	17,7	23,7	26,6	29,6	32,5	35,5	38,5	41,4	44,4	47,3	50,3	53,2	59,2	64,9	70,6	76,3	82,0	87,7	93,4	106	138	168	198	260	320	400					
750	3,1	6,1	8,6	11,0	12,2	15,3	18,4	24,5	27,6	30,6	33,7	36,7	39,8	42,9	45,9	49,0	52,1	55,1	61,2	67,0	72,7	78,4	84,1	89,8	95,5	109	141	171	201	270	330	420					
800	3,2	6,3	8,9	11,4	12,6	15,8	19,0	25,3	28,5	31,6	34,8	37,9	41,4	44,3	47,4	50,5	53,6	56,7	62,8	68,6	74,3	80,0	85,7	91,4	97,1	111	143	173	203	270	340	430					
850	3,3	6,5	9,1	11,7	13,0	16,3	19,6	26,1	29,3	32,6	35,9	39,1	42,4	45,6	48,9	52,2	55,4	58,7	64,8	70,6	76,3	82,0	87,7	93,4	99,1	114	146	177	207	270	350	450					
900	3,4	6,7	9,4	12,1	13,4	16,8	20,1	26,9	30,2	33,6	36,9	40,2	43,6	47,0	50,3	53,7	57,0	60,4	66,5	72,3	78,0	83,7	89,4	95,1	100,8	116	149	180	210	280	360	460					
950	3,4	6,9	9,7	12,4	13,8	17,2	20,7	27,6	31,0	34,5	37,9	41,4	44,9	48,2	51,7	55,1	58,6	62,0	68,1	73,8	79,5	85,2	90,9	96,6	102,3	118	151	182	212	280	370	470					
1000	3,5	7,1	9,9	12,7	14,1	17,7	21,2	28,3	31,8	35,4	38,9	42,4	46,0	49,5	53,0	56,5	60,0	66,1	71,8	77,5	83,2	88,9	94,6	100,3	106	122	155	186	216	290	380	490					
1050	3,6	7,2	10,1	13,0	14,5	18,1	21,7	29,0	32,6	36,2	39,9	43,5	47,1	50,7	54,3	58,0	61,6	65,2	71,3	77,0	82,7	88,4	94,1	100	106	123	156	187	217	290	390	500					
1100	3,7	7,4	10,4	13,3	14,8	18,5	22,2	29,7	33,4	37,1	40,8	44,5	48,2	51,9	55,6	59,3	63,0	69,1	74,8	80,5	86,2	91,9	97,6	103	110	127	160	191	221	290	400	510					
1150	3,8	7,6	10,6	13,6	15,2	19,0	22,7	30,3	34,1	37,9	41,7	45,5	49,3	53,1	56,9	60,7	64,5	68,2	74,3	80,0	85,7	91,4	97,1	102,8	108	125	158	189	219	290	410	520					
1200	3,9	7,7	10,8	13,9	15,5	19,4	23,2	31,0	34,9	38,7	42,6	46,5	50,3	54,2	58,1	62,0	65,8	69,7	75,8	81,5	87,2	92,9	98,6	104	110	127	160	191	221	290	420	530					

De waarden zijn gemiddeld. Raadpleeg voor exacte waarden de informatie van de fabrikant/ leverancier

HT-testerna på Gruvöns Bruk var långt inne i det röda området för mekanisk vattentvätt. Med munstyck 2.2 mm och vattenflöde 99 l/min blir det 1000 bar's tryck.

Med två likadana munstycken och samma flöde delat till två pistoler blir trycket bara 260 bar som kanske är för lågt för mekanisk tvätt.