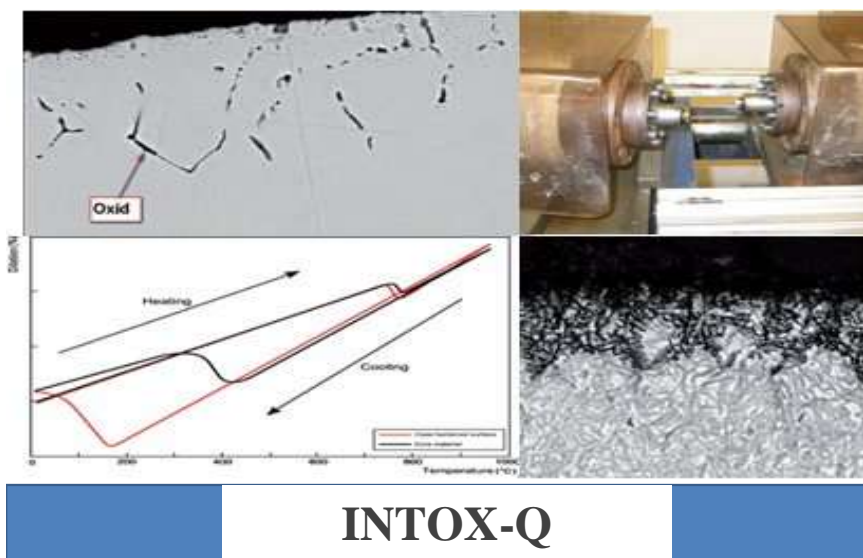


Ökad utmattningshållfasthet hos drivlinekomponenter genom minskad inre oxidation och avbruten kylning (INTOX-Q)



INTOX-Q

Författare: Eva Troell, Albin Stormvinter och Hans Kristoffersen, Swerea IVF;
Sven Haglund och Jérôme Senaneuch, Swerea KIMAB

Datum: 2015-08-30

Delprogram: Fordonsutveckling

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	3
3. Syfte.....	5
4. Genomförande.....	6
5. Resultat	8
5.1 Bidrag till FFI-mål	10
6. Spridning och publicering.....	11
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	11
6.2 Publikationer	12
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	12
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	13

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på www.vinnova.se/ffi

1. Sammanfattning

Målet med projektet var att öka utmattningshållfastheten med minst 25 % på sätthärdade transmissionskomponenter genom att vid värmebehandlingen införa två metoder; (1) avbruten kylning och (2) en modifierad sätthärtningsprocess för minskad negativ effekt av inre oxidation i ytan på komponentprestanda vid atmosfärsuppkolning. Ytterligare ett mål var att förstå mekanismerna för kopplingen mellan processförbättringarna och hållfasthetsförändringen.

Med en ökad hållfasthet kan komponenter tillverkas med lägre vikt, överföra högre moment i växellådan och erbjuda högre lastkapacitet hos fordonet samtidigt som livslängden förbättras. Detta möjliggör exempelvis lägre bränsleförbrukning samt att högre moment kan erhållas utan att det behövs omfattande omkonstruktion.

Inom projektet har de två metoderna anpassats och optimerats för sätthärkning av provstavar för roterande böj-provning samt kugghjul som utvärderats med pulsatorprovning. Tre sätthärtningsstål har ingått i studien. All värmebehandling har utförts i industriella batchugnar.

Inom projektet erhöles den högsta ökningen i utmattningshållfasthet, 16%, för stål 16MnCr5 genom att införa den modifierade sätthärtningsprocessen samt avbruten kylning. Referens är dagens värmebehandlingsprocess och normal kylning i använd hårdolja. En tumregel är att en 10% hållfasthetsökning i utmattningsgräns motsvarar en fördubbling i livslängd. Hållfasthetsökningen, 16%, borde därför motsvara en tredubblad livslängd.

2. Bakgrund

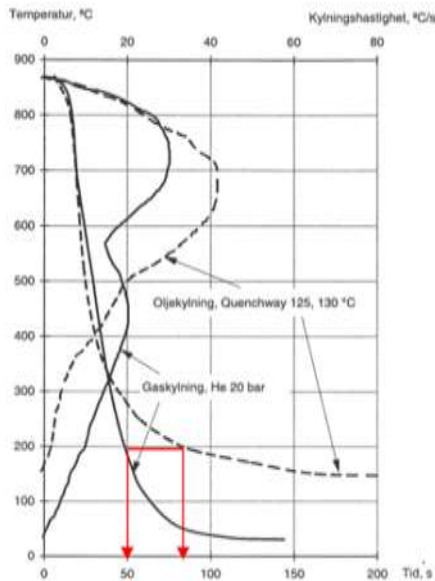
I projektet har två metoder använts för att öka utmattningshållfastheten hos sätthärdade komponenter:

1. Införa *avbruten kylning* vid härningen
2. *Minska den negativa effekten av randoxidation*, uppkomst av HTTP-struktur, som fås vid atmosfärsuppkolning genom att införa en modifiering av sätthärtningsprocessen.

Avbruten kylning

Avbruten kylning görs vid härningen och innebär, i det här fallet, att kylförloppet styrs så att kylningen blir långsammare i samband med martensitomvandlingen. Metoden har

framförallt studerats i gaskylningssammanhang som har ett snabbare kylförlopp vid de lägre temperaturer där martensitomvandlingen sker, jämfört med exempelvis en härdolja, *Figur 1*. Tidigare försök där kylförloppet har saktats ner, just före och efter starten för martensititomvandlingen, har gett upp till 25% högre utmattningshållfasthet vid pulsatorprovning av kugghjul i stål 16MnCr5 [2-4]. Föreslagna mekanismer för hållfasthetsökningen är ökad mängd restaustenit och stabilisering av denna samt något högre tryckrestspänningar. Restaustenit omvandlas sedan vid sprickutbredning vilket ger tryckspänningar runt sprickspetsen och försvårar tillväxt. Minskad risk för uppkomst av mikrosprickor i korngränserna har också diskuterats.

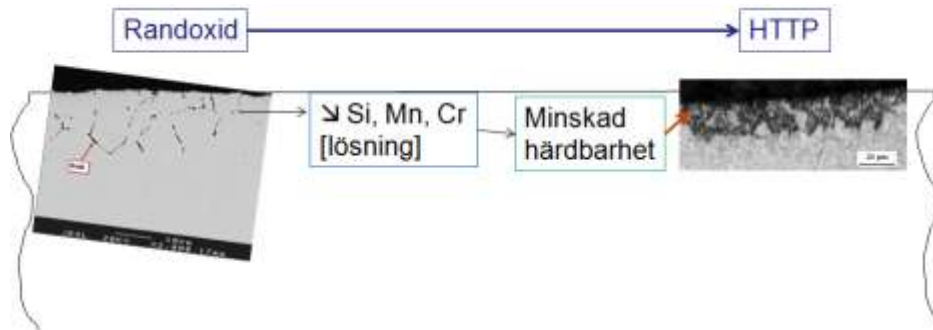


Figur 1 Kylförlopp, upptaget med en stålprovstav, vid kylning i gas, helium 20 bar, resp en härdolja, Quenchway 125. [1]

Minska en negativ effekt vid uppkomst av randoxid

Vid atmosfärsuppkolning kan legeringselement med hög affinitet till syre, t ex Mn, Si och Cr, oxidera och bilda oxider i korngränserna, så som randoxid, *Figur 2*. Oxidbildningen leder till en utarmning av legeringselement i grundmassan, vilket i sin tur ger en sänkning av hårdbarheten så att den yttersta ytan omvandlas till ferrit/bainit/perlit vid kylning, benämnt HTTP-struktur (High Temperature Transformation Products). Högst troligt inverkar både randoxiderna och HTTP-strukturen negativt på utmattningshållfastheten. Vilken av dem som har störst inverkan är inte känt och är också applikationsberoende. Oxidarmarna kan fungera som anvisningar för sprickbildning och HTTP-strukturen har en lägre hållfasthet än en helmartensitisk struktur. Bildningen av HTTP-strukturen sker före martensitomvandlingen i ytskiktet vilket ger mycket låga tryckspänningar eller till och med dragspänningar i HTTP-skiktet.

Genom att införa en modifierad sätthärtningsprocess är det möjligt att öka hårdbarheten i HTTP-området [5].



Figur 2 Uppkomst av randoxid och HTTP-struktur i ytan på ett stål.

3. Syfte

Syftet med projektet är att visa på möjligheten att öka utmattningshållfastheten hos sätthärdade komponenter genom två metoder som kan implementeras vid sätthärdning i atmosfärsprocesser. I ansökan angavs målet att nå minst 25 % högre utmattningshållfasthet hos sätthärdade transmissionskomponenter genom:

- Kontrollerad/avbruten kylning
- Kontroll av randoxidation (dvs minska en negativ effekt av randoxidation)

Följande frågeställningar/problem var aktuella

- *Teoretiskt*
 - Mekanismerna för ökad utmattningshållfasthet
 - Samband inre oxidation – HTTP – restaustenit
 - Beräkningar för att avgöra när avbrottet i kylning ska ske, dvs när ytans temperatur nått den temperatur där ca 50% martensit bildats
- *Praktiskt*
 - Implementering
 - Uppsättning och parametrar för använda oljebad
 - Inverkan på olika chargepositioner
 - Temperaturjämnhet – processfönster

Ursprungligen var det tänkt att det skulle genomföras fasfälsberäkningar för martensitomvandlingen för att ge en bättre förståelse av skillnaderna i mikrostruktur som bildas vid olika avbruten kylning. Under projektiden visade det sig dock att tekniken med den modifierade sätthärtningsprocessen gav mycket intressanta resultat, samt

bedömdes ha goda möjligheter att implementeras i produktion, varför beräkningarna istället inriktades på att ta fram ett processfönster för denna process.

4. Genomförande

Avbruten kylning samt modifierad värmebehandlingsprocess för kontroll/undertryckande av en negativ effekt av randoxidering, d v s uppkomst av HTTP-struktur, utfördes på provstavar och kugghjul i stål 16MnCr5, V2158 och Ovako 158Q, *Tabell 1*. V2158 och 16MnCr5 är mer traditionella sätthärdningsstål och 158Q är ett Ovako-stål anpassat för att inte ge någon inre oxidation och därmed inte HTTP-struktur .

Tabell 1 Kemisk sammansättning för undersökta stål.

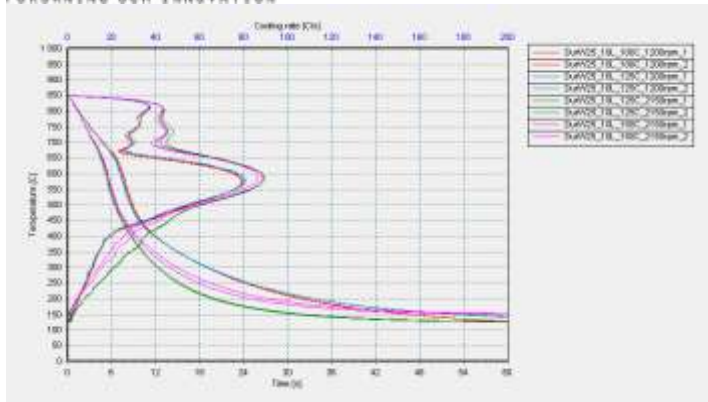
Stål	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
16MnCr5	0,19	0,27	1,2	0,014	0,035	1,17	0,19	0,06	0,008	0,020	0,14
V2158 ~20MnCrS5	0,19	0,21	1,3	0,013	0,033	1,26	0,18	0,04	0,005	0,022	0,20
Ovako 158Q ~20NiMo10	0,20	0,03	0,23	0,007	0,002	0,37	2,18	0,67	0,003	0,027	0,126

Roterande-böjprovning av provstavar utfördes på stål 16MnCr5 och Ovako 158Q. Pulsatorprovning utfördes på kugghjul i stål V2158 och Ovako 158Q. De resultaten redovisas dock inte i denna rapport utan finns endast tillgängliga för projektgruppen.

Flertalet försök och beräkningar gjordes för att optimera och anpassa metoderna för aktuella stål och tillgängliga utrustningar.

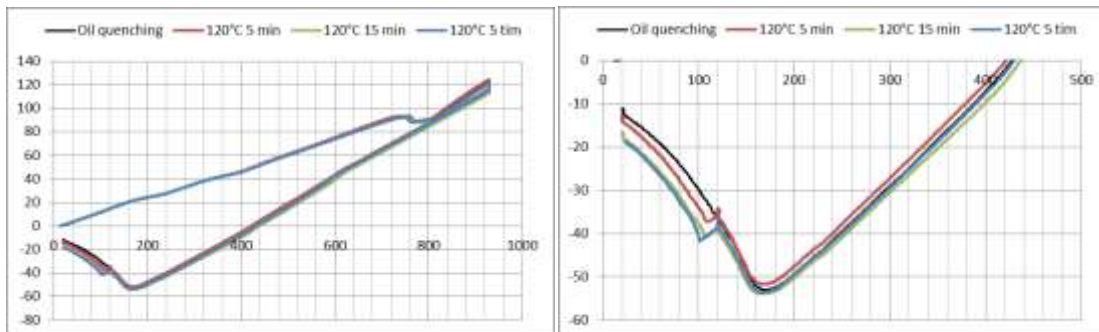
Avbruten kylning

Inför försöken med avbruten kylning utvärderades de praktiska förutsättningarna avseende kylförlopp för tillgängliga härdoljor samt att det genomfördes temperaturberäkningar av avbruten kylning. I *Figur 3* visas kylkurvor för den härdolja som användes i de slutliga försöken.



Figur 3 Kylkurvor, upptagna enligt ISO 9950, för härdolja Durixol W25 vid 100, 125 och 150 °C och två olika omrörningshastigheter.

Alla stålen utvärderades genom dilatometerprovning för olika kylförlopp med hålltid vid olika temperaturer med riktvärden för hur temperaturen skulle saktas ner; ovanför Ms, vid 30% bildad martensit och vid 60% bildad martensit. Figur 4 visar dilatometerkurvor för avbruten kylning vid ca 30% martensit för uppkolat stål 16MnCr5.



Figur 4 Dilatometerkurva för uppkolat 16MnCr5 med avbruten kylning vid ca 30% martensit.

De flesta analyserna gjordes för uppkolat stål, men även ouppkolat utvärderades. De studerade stålen som uppkolats vid kolpotential 0,75% C, har olika temperatur för start av martensitombildning, Ms, enligt dilatometerprovningen;

- 16MnCr5: Ms 160 °C
- V2158: Ms 150 °C
- Ovako 158Q: Ms 210 °C

Ovanstående innebär att den avbrutna kylningen får olika effekt för de olika stålen, dvs för samma kylförlopp sker martensitombildningen olika. Framförallt avviker Ms för Ovako 158Q från de övriga.

Rent praktiskt utfördes den avbrutna kylningen genom att chargin lyfts upp ur kylbadet efter olika tider samt att oljetemperaturen varierades. Ett flertal för-tester gjordes för att utvärdera olika parametrar för den avbrutna kylningen där tiden i kylbadet och oljetemperaturen varierades. Från dessa valdes två varianter för värmebehandling av

provstavar och kugghjul. Referens var kylning i Durixol W25 vid 100 °C med full tid i badet.

Kontroll av randoxid och HTTP-struktur

I projektet har en modifierad sätthärtningsprocess använts som minskar mängden HTTP-struktur. Detta minimerar den oönskade HTTP-strukturen, men däremot finns randoxiden kvar. Tekniken är aktuell för stål 16MnCr5 och V2158. Stål Ovako 158Q har utvecklats för att inte ge någon randoxid vilket inte heller bildades. Den modifierade processen utfördes dock även för detta stål för att säkerställa att den inte gav någon effekt.

Inom projektet undersöktes olika parametrar för hur den modifierade processen skulle utföras, varav en slutlig kombination valdes till alla värmebehandlingar av provkomponenter.

Försök

Alla försök genomfördes i industriella batchugnar hos Bodycote och GKN Driveline. För-testerna gjordes hos Bodycote och GKN. Värmebehandlingar med provstavar och kugghjul gjordes hos GKN.

Roterande böjutmatning genomfördes på provstavar i stål 16MnCr5 och 158Q som värmebehandlats med eller utan modifierad process samt med eller utan avbruten kylning enligt *Tabell 2*.

Tabell 2 Försöksmatris för provstavar till roterande-böjprovning.

	16MnCr5		158Q	
	Normal uppkolning	Modifierad process	Normal uppkolning	Modifierad process
Normal kylning				
Avbruten kylning 1				
Avbruten kylning 2				

5. Resultat

5.1 Projektergebnat

Tabell 3 visar resultatet för roterande böjutmatning för provstavar i stål 16MnCr5 och 158Q som värmebehandlats med eller utan modifierad process samt med eller utan de två varianterna av avbruten kylning. *Tabell 4* visar restaustenithalten och restspänningar i ytan.

Tabell 3 Utmattningshållfasthet och förändring jämfört med referens vid roterande-böjprovning.

	16MnCr5		158Q	
	Normal uppkolning	Modifierad process	Normal uppkolning	Modifierad process
Referens	768 MPa	846 MPa = +10%	839 MPa	800 MPa = -5%
Avbruten kylning 1		889 MPa = +16%	783 MPa = -7%	
Avbruten kylning 2			825 MPa = -2%	

Tabell 4 Restaustenithalt, RA, och restspänningar, RS, i ytan för provstavar enligt Tabell 3.

	16MnCr5		158Q	
	Normal uppkolning	Modifierad process	Normal uppkolning	Modifierad process
Referens	RA 5-20% RS -50 MPa	RA 20% RS -200 MPa	RA 15% RS -150 - -250 MPa	RA 20-25% RS -150- -250 MPa
Avbruten kylning 1		RA 35-45% RS -100 - -200 MPa	RA 20% RS -150 MPa	
Avbruten kylning 2			RA 20 % RS -200- -250 MPa	

Stål 16MnCr5 erhöll en ökning i utmattningshållfasthet genom minimering av effekten av inre oxidation, dvs ökad hårdbarhet i HTTP-strukturen, och avbruten kylning.

Minimering av HTTP-strukturen genom modifierad process medförde att utmattningshållfastheten ökade 10%. I det här fallet finns fortfarande randoxiden kvar, som troligtvis har en negativ inverkan på hållfastheten. Då även avbruten kylning tillämpades blev hållfasthetsökningen totalt 16% jämfört med referens. En kommentar till att ökningen inte nådde målet 25% är att referensen var kylning i härdolja vilket innebär att kylningen runt Ms blir långsammare än för t ex direkt gaskylning. Det uppsatta målet på 25 % utgick från erfarenheter med gaskylning där referensen var direktkylning med ett hastigt förlopp genom temperaturområdet för martensitbildning. Det är även troligt att kylförloppet skulle ha kunnat optimerats ytterligare, t ex att kylningen saktades ner tidigare, men det begränsades av praktiska skäl.

För *stål 158Q* gav den modifierade processen ingen effekt, vilket inte heller var väntat då detta stål inte ger inre oxidation. Avbruten kylning gav inte heller någon effekt på utmattningshållfastheten. En förklaring till det kan vara den högre Ms-temperaturen för 158Q som medför att den avbrutna kylningen inte ger någon effekt då temperaturutjämnningen skedde för sent för detta stål. Detta visar på vikten av att den avbrutna kylningen anpassas för aktuell stålsort. Restaustenithalten blev relativt lika för alla varianterna av 158Q vilket indikerar att den avbrutna kylningen inte gav någon effekt. En förklaring till att hållfastheten tom blev sämre, framförallt för avbruten kylning 1, är att tryckspänningarna blev lägre än för referensen.

Inom projektet tillämpades de varianter av avbruten kylning som var praktiskt möjliga att åstadkomma i aktuellt kylkar och det rymdes inte inom budgeten att anpassa denna ytterligare beroende på stålsort. Detta skulle t ex ha kunnat göras genom att använda annan härdolja eller eventuellt saltbadskylning.

Ytterligare ett projektresultat är en praktiskt implementerbar process. Både den modifierade processen och avbruten kylning har tillämpats i kammarugnar på Bodycote och GKN. För stål 16MnCr5 och V2158 kan aktuella processparametrar användas direkt, men för stål Ovako 158Q skulle ytterligare optimering av avbruten kylning behövas.

Noteras kan att stål Ovako158Q, som inte får randoxid, ger 10% högre utmattningshållfasthet jämfört med 16MnCr5 för referenskörningarna. Genom att optimera den avbrutna kylningen ytterligare för Ovako 158Q bör det vara möjligt att ytterligare öka hållfastheten.

Inom projektet har AGA presenterat lösningar för hur den modifierade processen även kan tillämpas i en genommatningsugn.

5.2 Bidrag till FFI-mål

Projektet har adresserat följande program mål:

Program mål	INTOX-Q bidrag
Materialteknik för effektivare fordon	<p>Möjliggöra komponenter med lägre vikt och längre livslängd genom ökad hållfasthet. Som alternativ till lägre komponentvikt kan prestandahöjningen användas för ökade moment, med samma krav på utrymme och vikt i konstruktionen. Genom att göra starkare komponenter kan förbränningstrycket öka. Om styrkan på t ex en vevaxel ökar 1% förväntas bränsleförbrukningen minska med cirka 1%.</p> <p>En tumregel är att en 10% hållfasthetsökning i utmattningsgräns motsvarar en fördubbling i livslängd. I projektet blev <i>hållfasthetsökningen 16%</i> för stål 16MnCr5, vilket borde motsvara en <i>tredubblad livslängd</i>.</p>
Metoder och verktyg för fordonsutveckling	<p>Ökad konkurrenskraft då mer hållfasta komponenter, ökad transmissionsprestanda, kan tillverkas <i>utan att det krävs omkonstruktion</i> av komponenter och kringliggande utrymme. <i>Tids- och kostnadsbesparing</i>.</p>

Substantiell (mätbar) viktreduktion	Kan erhållas vid implementering av företag tack vare 16% högre hållfasthet.
Substantiell kostnadsreduktion	Se ovan ang minskat behov av omkonstruktion. De använda teknikerna bör inte medföra väsentligt högre kostnader, beroende på dagens tillverkning, men viss anpassning och kvalitets-säkring krävs.
Väsentligt bättre materialegenskaper	16% högre hållfasthet erhöles. Projektet visade även att Ovako 158Q ger 10% högre hållfasthet än 16MnCr5 vid samma värmebehandlings-process.
Säkerställa att den svenska fordonsindustrin bidrar och får tillgång till metoder, verktyg och kompetens i världsklass för att möjliggöra snabb och effektiv utveckling.	De två metoderna används inte idag industriellt, men är möjliga att implementera till relativt låg kostnad.
”Genomföra industriellt relevanta utvecklingsåtgärder” samt ”verka för att ny kunskap tas fram och implementeras, samt att befintlig kunskap implementeras i industriella tillämpningar”	Både avbruten kylning och den modifierade sätthärdningsprocessen är möjliga att implementera industriellt.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Konferenser och seminarier där INTOX-Q ingått:

- 4th Bodycote/AGA Heat Treatment Seminar, 30-31 maj 2012. Interrupted quenching for improved fatigue performance. Sven Haglund, Swerea KIMAB
- FFI Katrineholm:
 - 2012:
 - Avbruten kylning. Sven Haglund, Swerea KIMAB
 - Inverkan av randoxidation på kontaktutmattning/böjutmattning. Jérôme Senaneuch, Swerea KIMAB
 - 2015
 - Inverkan av randoxidation och kylning på utmattningshållfastheten hos sätthärdade komponenter, Sven Haglund, Swerea IVF

- VBCs medlemsmöten 28-29 jan 2015, 29-30 jan 2014 och 30-31 jan 2013
- Impact of Internal Oxidation and Quenching Path on Fatigue of Powertrain Components. Stormvinter, A et al. ASM Heat Treat Society Conference & Exposition, 20-22 oktober 2015. Detroit, USA.
- Förbättrad sätthärtningsprocess för högre utmattningshållfasthet. Senaneuch, J; Haglund, S. Aktuellt om material- och värmebehandlingsteknik. SHTE. 22-23 september 2015. Västerås

6.2 Publikationer

- Conf. proceedings: Impact of Internal Oxidation and Quenching Path on Fatigue of Powertrain Components. Stormvinter, A et al. ASM Heat Treat Society Conference & Exposition, 20-22 oktober 2015. Detroit, USA.
- Improved fatigue properties of powertrain components by reduced internal oxidation and interrupted quenching – INTOX-Q. Sven Haglund and Jérôme Senaneuch, Swerea KIMAB; Albin Stormvinter and Eva Troell, Swerea IVF; Anders Åström, AGA Gas; Kim Wallin, GKN Driveline. VBC-report 2015

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Avbruten kylning är möjligt att implementera både i atmosfärs- och lågtrycksprocesser. Projektet visade att tekniken ger möjlighet att höja utmattningshållfastheten. För att nå maximal effekt och högsta produktivitet krävs dock anpassning för olika stål beroende på Ms. Beräkningar är ett användbart hjälpmedel för detta samt att det skulle behövas ytterligare provning i praktiken för att utvärdera möjligheten med t ex andra härdoljor och saltbad. Gaskylning är en användbar kylmetod där kylförloppet kan justeras genom ändring i tryck och/eller gashastighet.

Mekanismen för ökad utmattningshållfasthet vid avbruten kylning återstår fortfarande att fastställa. Restaustenhalten och dess stabilisering är en intressant hypotes. Ytterligare forskning behövs avseende avbruten kylning och inverkan på olika stål. Generella studier för inverkan av restaustenit och dess stabilitet på hållfasthet är av intresse.

Den modifierade sätthärtningsprocessen fungerade väl för att öka hårdbarheten i HTTP-strukturen som fås vid bildning av randoxid vid atmosfärsuppkolning. Då det inte finns någon HTTP-struktur ökar utmattningshållfastheten. Vilken inverkan själva randoxiden har på utmattningshållfastheten kräver fortsatt forskning.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Företag	Kontakt
Volvo GTO	Alexander Drott
Volvo CE	Henrik Edin, Burak Ocakli, Hanno Mithaq
GKN Drivline Köping	Kim Wallin
Bodycote Heat Treatment	Annika Martinsson, Solmaz Sevim
Ovako Steel	Kristofer Eriksson
AGA Gas	Anders Åström
Scania	Therese Källgren, Ninos Hawsho
Swerea IVF	Eva Troell, Albin Stormvinter
Swerea KIMAB	Sven Haglund, Jérôme Senaneuch
KTH, ITM	John Ågren, Henrik Larsson



Referenser

- [1] T. Holm, P. Olsson, E. Troell, eds., Stål och värmebehandling – en handbok. Swerea IVF 10805. (2010)
- [2] K. Johansson. Gas quenched planetary gears. Internal Scania-report no. R2006-1083. (2006)
- [3] Since J.J., Irretier O., “Vacuum Heat Treatment and High Pressure Gas Quenching – aspects in distortion control”, Heat Processing (8) Issue 3, pp 215 – 220. (2010)
- [4] J. Åslund; E. Troell; S. Haglund; K.. ” Influence of gas quenching sequence on fatigue properties of 16MnCr5– Interrupted gas quenching subsequent to low pressure carburising”, VBC-report. (2010)
- [5] J. Senaneuch; S. Haglund. Influence of internal oxidation on fatigue properties. VBC-R-2012-009. (2012)