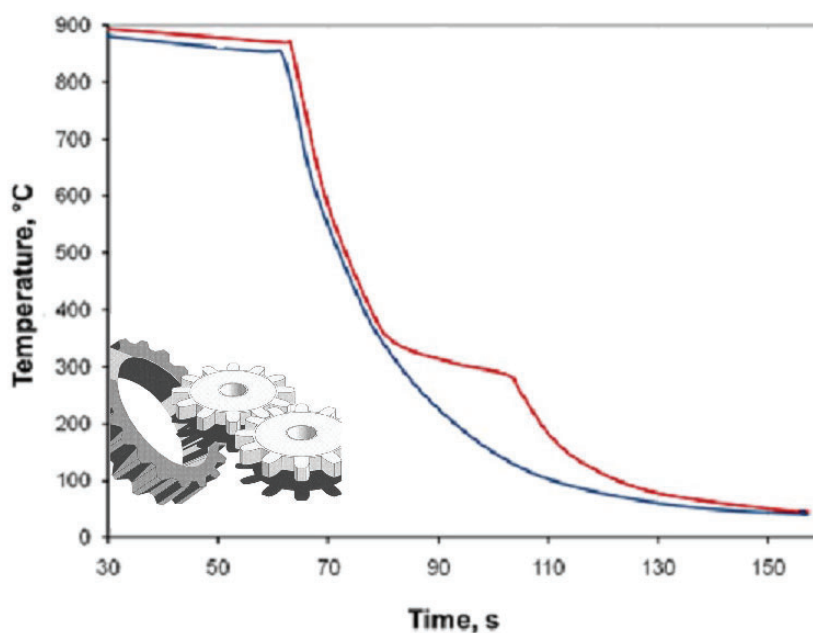


Styrd kylning vid sätthärdning för optimal hållfasthet (QuenchCool)

Publik rapport



Författare: Eva Troell, RISE och Sven Haglund, Swerim

Datum: 20220201

Projekt inom FFI Hållbar Produktion, Dnr 2016-03345

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	7
5 Mål	8
6 Resultat och måluppfyllelse	9
7 Spridning och publicering	13
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	13
7.2 Publikationer.....	13
8 Slutsatser och fortsatt forskning	14
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	15
10 Referenser.....	16

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

En övergång från traditionell sätthärdning med oljekylning till lågtrycksuppkolning i kombination med gaskylning har många fördelar. Processen går snabbare, är mer flexibel och belastar miljön mindre. Dessutom blir arbetsmiljön säkrare. Ett bidrag till minskad miljöbelastning är att kylningen vid härdning i de flesta fall sker i gas vid lågtrycksuppkolning jämfört med olja vid atmosfärsuppkolning. För att uppnå optimala utmattningssegenskaper måste dock kylningen vid härdningen styras om till långsam kylning vid låga temperaturer, vid martensitomvandlingen, sk avbruten eller styrd kylning. Metoden har framförallt studerats i samband med gaskylning som har ett snabbare kylförlopp vid de lägre temperaturer där martensitomvandlingen sker, jämfört med exempelvis en traditionell härdolja.

Genom att styra kylförloppet enligt ovan har 8-10% högre utmattningshållfasthet kunnat nås. Metoden har visat sig ha god repeterbarhet men mekanismerna bakom den förbättrade utmattningshållfastheten är inte kända. Syftet med QuenchCool har varit att förstå mekanismerna bakom styrd kylning för att kunna modellera förloppet och ett doktorandprojekt har genomförts med fokus på detta.

Ingen fullständig förklaringsmodell har kunnat nås men tydliga skillnader i mikrostruktur och volymexpansion finns för prov som kylts med olika hastighet. Ett prov som kyla snabbt har större volymexpansion vid martensitomvandlingen samt större martensitenheter. Ett prov som svalnar långsamt förändrar sin tetragonalitet hos martensiten under svalningen pga utdiffusion av kol.

2 Executive summary in English

A transition from traditional atmospheric case hardening with oil quenching to low pressure carburizing in combination with gas quenching has many advantages. The process is faster, more flexible and has a less environmental impact. In addition, the working environment will be safer. One contribution to reduced environmental impact is that the cooling during hardening in most cases occurs in gas at low pressure carburizing compared to oil at atmospheric carburizing. However, in order to achieve optimal fatigue properties, cooling during hardening must be controlled to slow cooling at low temperatures, during the martensite transformation, so-called interrupted or controlled cooling. The method has mainly been studied in connection with gas quenching, which has a faster cooling at the lower temperatures where martensite transformation occurs, compared to, for example, traditional oil quenching.

By controlling the cooling process as above, 8-10% higher fatigue strength has been reached. The method has been shown to have good repeatability, but the mechanisms behind the improved fatigue strength are not known. The purpose of QuenchCool has been to understand the mechanisms behind controlled cooling in order to model the process and a PhD project has been carried out with a focus on this.

No complete model has been reached to explain the mechanisms, but clear differences in microstructure and volume expansion exist for samples cooled at different cooling rates. A sample that cools faster has greater volume expansion during the martensite transformation as well as larger martensite units. A sample that cools more slowly changes the tetragonality of the martensitic during cooling due to carbon depleting.

3 Bakgrund

Idag står fordonsindustrin inför stora utmaningar drivet av bl a minskad miljöpåverkan för både produkter och processer. En viktig aspekt för att minska bränsleförbrukningen är att kunna minska vikten hos ett fordon. Genom att minska massan hos rörliga komponenter i drivlinan, t ex växellådskomponenter, kan en stor effekt fås på bränsleförbrukningen. Detta kräver dock att komponenterna har en högre hållfasthet vilken kan påverkas med val av stål och tillverkningsprocess.

En stor del av värmebehandling av transmissionskomponenter sker idag med traditionell atmosfärsuppkolning i kombination med oljekylning. Det kan ske i satsugnar, men oftast i stora genommatningsugnar där härdningen görs i härdolja. Lågtrycksuppkolning i kombination med gaskylning har dock börjat användas mer och mer inom fordonsindustrin och ger både kortare processtider och minskad miljöpåverkan. Dessa anläggningar har oftast en mer flexibel, modulbaserad, design. Processtiderna kan minskas genom att kolöverföringen till stålet sker snabbare, samt att värmebehandling kan utföras vid högre temperaturer. Miljöpåverkan minskas bl a genom volymflexibilitet, mindre åtgång av processgaser, lägre CO₂-utsläpp, samt att oljekylningen ersätts med gas vilket eliminerar behovet av tvätt samt möjliggör minskade formförändringar, vilket minskar behovet av efterbearbetning. Konventionell härdning av stålkomponenter med atmosfärsuppkolning och kylning i bad med mineralolja är mycket resurskrävande och använder stora mängder fossilgas. Ett avsevärt mycket bättre alternativ ur hållbarhetssynpunkt är därför övergång till lågtrycksuppkolning med gaskylning. Jämfört med traditionell atmosfärsuppkolning har LPC 99% lägre gasförbrukning och 81% lägre CO₂-avtryck [1]. Enligt samma studie har gaskylning ett CO₂-avtryck som är 32% lägre än kylning i mineralolja. Miljöbelastningen vid gaskylning kommer till stor del från energi att driva fläkten. Införsel av LPC med gaskylning är därför ett viktigt steg för att nå företagens miljömål i sina tillverkningsprocesser. Även arbetsmiljön förbättras genom att öppna flammor och oljedimma inte förekommer.

Lågtrycksuppkolning i kombination med gaskylning förväntades initialt ge ökad komponenthållfasthet då lågtrycksuppkolning inte ger upphov till inre oxidation till skillnad mot atmosfärsuppkolning. Inre oxidation leder till icke-martensitiska strukturer i ytan med dålig hållfasthet som följd. I inledande studier uppnådde man dock inte detta utan snarare blev hållfastheten lägre [2]. Detta var förbryllande och ett antal olika hypoteser om orsaken presenterades [3]. En avgörande faktor är kylningshastigheten under martensitomvandlingen [4].

Kylförloppet har en stor betydelse för egenskaper som utmattningshållfasthet och formförändringar för en värmebehandlad komponent. Kylförloppet måste inledningsvis vara snabbt för att förhindra bildning av icke-martensitiska strukturer följt av minskad kylningsintensitet under själva martensitomvandlingen. Jämfört med en traditionell härdolja har gaskylning ett snabbare kylförlopp vid de lägre temperaturer (<400 °C) där martensitomvandlingen sker, *bild 1*. Gaskylning ger dock en möjlighet att styra kylförloppet genom reglering av trycket och gashastigheten, via fläkten, så att kylningshastigheten kan minska, sk styrd eller avbruten kylning.

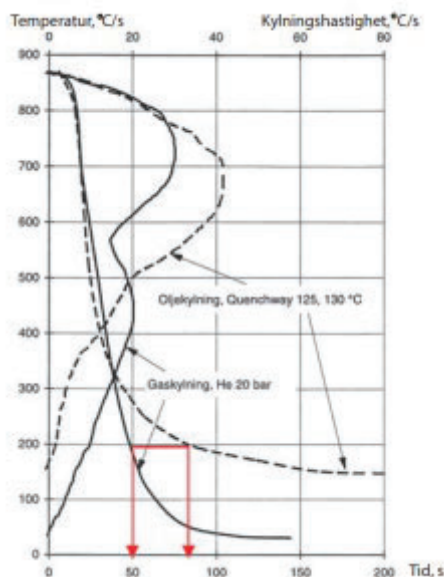


Bild 1 Kylförlopp, upptaget med en stålprovstav, vid kylning i gas, helium 20 bar, resp en härdolja, Quenchway 125. [Stål och värmebehandling – en handbok]

Flera ugnstillverkare, t.ex. franska ECM [5] och tyska ALD har tagit fram koncept med styrd kylning. Koncepten är dock inte inriktade på ökad utmattningshållfasthet utan på minimerade formförändringar och vid andra temperaturer.

Styrd kylning har studerats inom ett flertal projekt bl a finansierade av Vinnova. I projektet "MERA VBC (dnr.2006-01611)" påvisades att utmattningshållfastheten kunde ökas med 25% vid styrd kylning istället för direkt gaskylning. En hypotes formulerades att all härdning av stålkomponenter ska avbrytas när 50% martensit bildats för att öka hållfastheten. Hypotesen testades i två hypotesprövningsprojekt, "Styrd härdning av stålkomponenter för bättre prestanda (dnr.2009-03941)" och "Avbruten kylning i industriella processer för ökad utmattningshållfasthet(dnr.2011-03410)". Resultaten visade på att hypotesen gäller för flera olika typer av stål, värmebehandlingar och kylmetoder. I projektet "Ökad utmattningshållfasthet hos drivlinekomponenter genom minskad inreoxidation och avbruten kylning (INTOX-Q)" (dnr. 2011-04443) studerades styrd kylning vid oljekylning och processen implementerades i en industriell batchugn. Oljekylning är inte lika snabb som gaskylning vid låga temperaturer. En förbättring av utmattningshållfastheten om 16% erhöles vid avbruten oljekylning, kombinerat med en justerad sätthärdningsprocess, vilket enligt tumregler på Scania leder till ca tredubblad livslängd.

Frågor som återstår från INTOX-Q-projektet är vilka de bakomliggande mekanismerna är för den förbättrade utmattningshållfastheten som fås efter styrd kylning samt varför olika stål kan reagera olika på styrd kylning. Dessutom behövs modeller som beskriver fenomenet så att processen kan styras för att erhålla optimala komponentegenskaper.

För en effektiv övergång till gaskylning med styrd kylning krävs detaljerad kunskap om mekanismerna bakom den positiva effekten. För att undvika att hamna i ett "trial and error"-förfarande för varje ny stålsort och komponent är det av största vikt att ha modeller för hur utmattningshållfastheten påverkas av kylningshastigheten. Syftet med QuenchCool har varit att förstå mekanismerna bakom styrd kylning för att kunna modellera förloppet och ett doktorandprojekt har genomförts med fokus på detta.

Status avseende inverkan av styrd kylning i samband med projektansökan:

- Långsam kylning genom det lägre temperaturintervallet av martensitomvandlingen i ytan ger ökad utmattningshållfasthet.
- Enligt dilatometertester finns en tydlig korrelation mellan låg kylningshastighet och minskad expansion vid martensitomvandlingen. Detta kan dels bero på en stabilisering av restausteniten, dels på en anlöpningseffekt.
- Ingen skillnad kan observeras i strukturen vid studier med ljusoptiskt mikroskop mellan prover där kylningen avbrutits och prover som inte avbrutits. Med Electron Back Scatter Diffraction, EBSD kan dock en större mängd restaustenit med annan fördelning observeras.
- Högre tryckrestspänningar i ytan samt högre halter av restaustenit mätt med XRD erhålls efter avbruten kylning.

Mekanismerna som diskuterats är:

- Restausteniten omvandlas vid spricktillväxt [4] vilket sker under volymexpansion och ger tryckspänningar som hindrar vidare spricktillväxt.
- Snabb kylning kan ge mikrosprickor som utmattningssprickor kan starta ifrån. Det har dock varit svårt att mäta skillnader i mängden mikrosprickor och resultaten är inte helt konsistenta med denna förklaringsmekanism.
- Vid avbruten kylning hinner kärnans temperatur sjunka mer innan martensitomvandlingen sker i ytan jämfört med snabbare kylning. Detta kan förklara de högre tryckrestspänningarna som observerats som i sin tur höjer utmattningshållfastheten.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet har varit att förstå mekanismerna bakom styrd kylning för att kunna modellera förloppet och ett doktorandprojekt har genomförts av Thomas Kohne, KTH, med fokus på detta. Effektmålet har varit att kunna styra produktionsprocesserna för att snabbt kunna anpassa till nya komponenter och stållegeringar för att korta ledtiderna.

Arbetet har genomförts inom två huvudsakliga delar:

- Studier och analys på dilatometerprovstavar med olika kolhalt och kylförlopp
- Studier och analys på kugghjul som har körts i industriella processer. Dessa hjul har även utvärderats avseende utmattning vid kuggrotsprovning.

Avsikten har varit att kunna relatera egenskaper hos hjulen, avseende mikrostruktur och utmattningshållfasthet, mot effekter som studerats hos dilatometerprovstavar. Även FEM-beräkningar har genomförts för att studera olika fenomen. Mikrostrukturella skillnader efter olika kylförlopp har studerats för att kunna resultera i en förklaringsmodell som kan användas för optimering av utmattningshållfasthet vid styrd kylning.

Dilatometerprovstavar uppkolades till olika kolhalt och olika kylförlopp studerades. Provstavarna studerades avseende längdförändring och mikrostruktur.

En mängd olika tekniker och metoder har använts för att analysera och studera olika fenomen och mikrostrukturer. Exempel är:

- Traditionell dilatometerprovning. Bild 2 visar en schematisk bild för en dilatometerkurva.
- In-situ dilatometer HEXRD (High Energy X-ray diffraction), på DESY, PETRA-III i Tyskland. Här studerades inverkan av kylnings- och värmningshastigheter, hålltemperatur och anlöpning för tre stål 20MnCr5 vid olika kolhalter (0,55, 0,70 och 0,90% C) samt 100Cr6.
- SEM, EBSD
- Utmattningsprovning av kuggrot

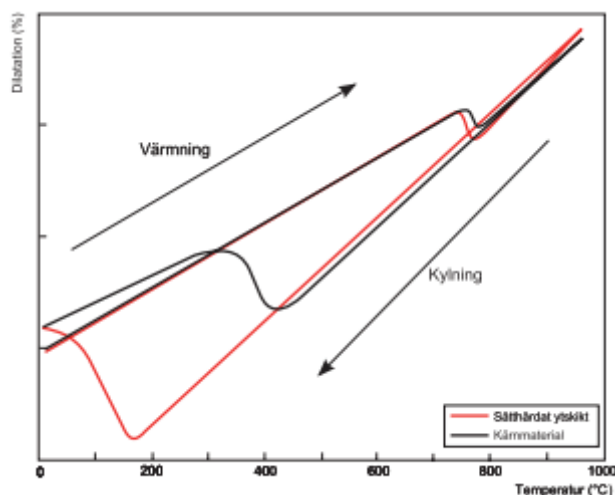
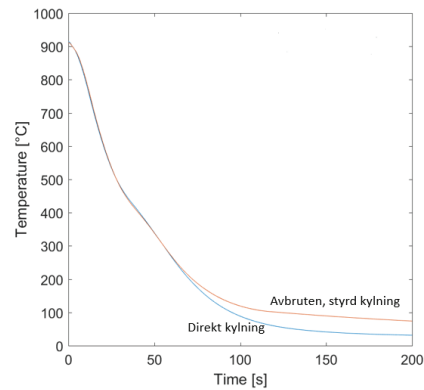


Bild 2 Dilatometerkurvor.

Planethjulen värmebehandlades med lågtrycksuppkolning och gaskylning hos Skoda i Tjeckien respektive Scania i Södertälje. En temperaturlogger har använts för att studera kylförloppen i de industriella utrustningarna. Termoelement har varit placerade både i kugghjul och provstavar i Inconel, diameter 12,5 mm. En fördel med Inconel är att det inte sker några fasomvandlingar som påverkar temperaturkurvan, vilket är fallet vid stål. Bild 3 visar exempel på hur chargen var uppbyggd med temperaturlogger och kylkurvor för direkt kylning och styrd kylning.



Bild 3 Tv) Charge med temperaturlogger



Th) Kylkurvor för direkt och styrd kylning.

5 Mål

Effektmål: Förbättrad hållfasthet med mer än 15% (tre gånger längre livslängd) genom styrd kylning för dagens och framtidens komponenter som dessutom inte medför extra kostnad eller längre processtid.

Projektmål: Förklaringsmodell för styrd kylning som möjliggör optimering av processer mot högre utmattningshållfasthet beroende på stål. Klarlägga mekanismerna för en ökad utmattningshållfasthet vid styrd kylning samt inverkan på olika sättthärtningsstål samt ta fram modeller för dessa. Kartlägga processfönstret för tekniken.

6 Resultat och måluppfyllelse

Projektet har omfattat ett flertal experimentella studier för att renodla skillnader mellan prover som svalnat vid olika hastighet. Detta för att kunna studera mekanismer som kan ha en inverkan på utmattningshållfastheten. Dessa har gällt:

- Utmattningsprovning av kuggrot
- Dilatometerprovning
- In-situ synkrotronmätningar vid dilatometerprovning
- EBSD
- FEM-beräkningar

Utmattningsprovning av kuggrot visade att avbruten kylning resulterade i ca 8-10 % högre utmattningshållfasthet för stål 20MnCr och 17NiCrMo6-4, bild 4. Detta visar att de effekter som avses studeras finns i de studerade materialen.

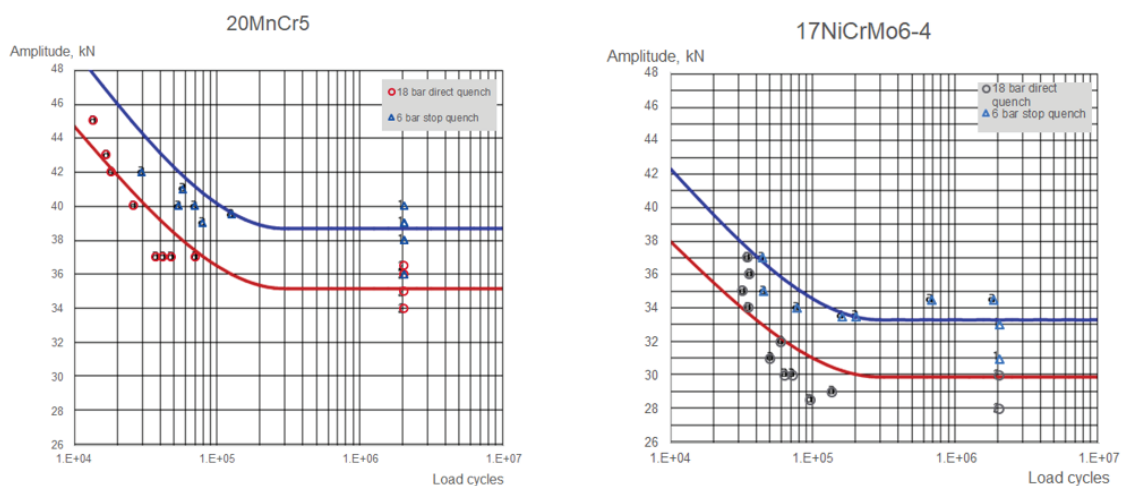


Bild 4 Resultat från utmattningsprovning för stål 20MnCr5 och 17NiCrMo6-4.

En karakteristisk skillnad mellan prov som kylts med olika kylningshastighet blir tydlig i dilatometerprovningen, bild 5, där det snabbast kylda provet har en klart större expansion vid martensitomvandlingen.

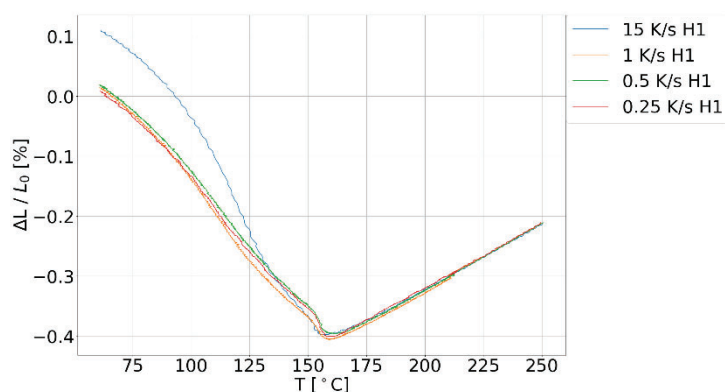


Bild 5 Dilatometerkurvor för prov vid olika kylningshastigheter för stål 20MnCr5.

EBSD-mätningar (Electron Back Scatter Diffraction) i SEM påvisar fas och orientering hos enskilda punkter i mikrostrukturen. Mätningar för olika kylningshastigheter visar att enskilda martensitenheter är större för ett snabbare kylningsförlopp, bild 6 och 7. Gränser för olika studerade martensitenheter går också att studera med EBSD. Det går att se skillnader mellan de vanligaste varianterna av gränssytor beroende på kylning.

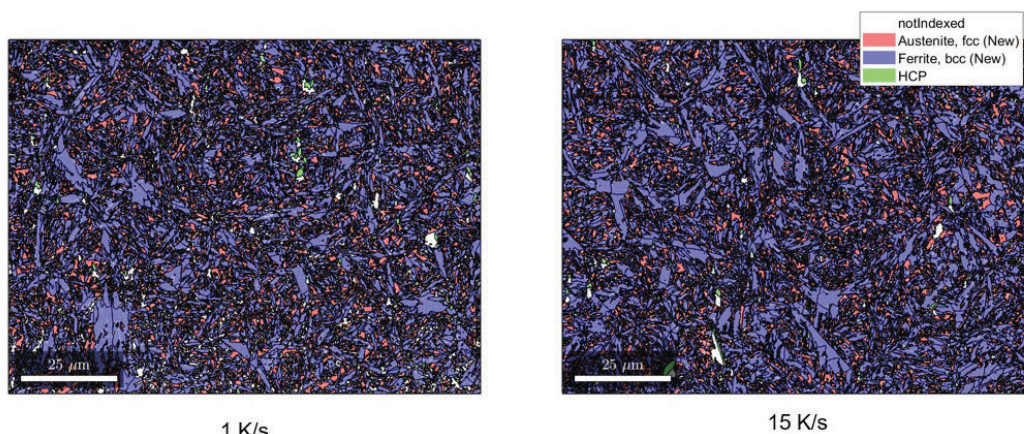


Bild 6 Mikrostruktur, EBSD, för olika kylningshastigheter.

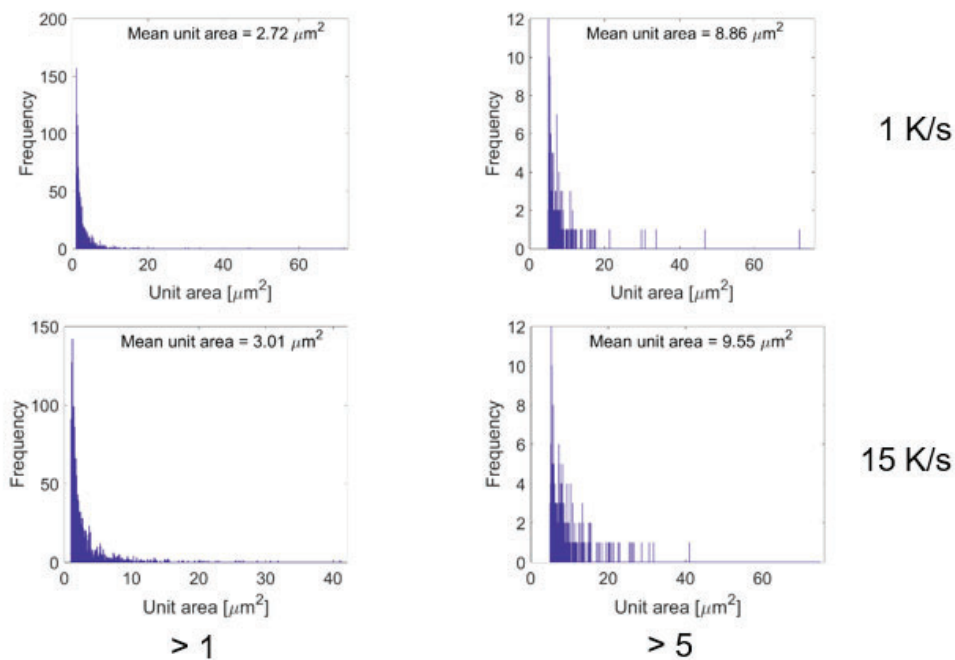


Bild 7 Storlek på martensitenheter för olika kylningshastighet och urval >1 eller $5 \mu\text{m}^2$.

Dilatometerprovning gjordes om vid in-situ synkrotronmätning. Dessa resultat kan sammanfattas enligt:

- Tetragonaliteten hos martensiten förändrades under svalningen vid långsammare kylning, men detta noterades inte vid de snabbare kylförloppen
- Det finns en korrelation mellan tetragonalitet och kolhalt varför medelkolhalten kunde bestämmas, bild 8. Förändringen i medelkolhalten beror på diffusion av kol ut ur martensiten.

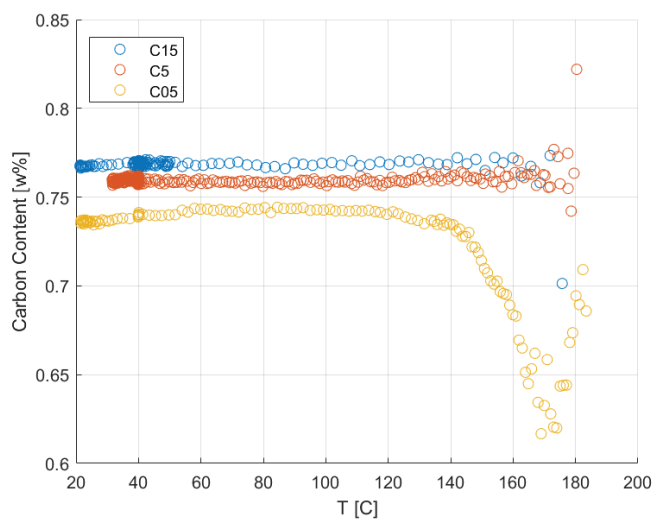


Bild 8 Kolhalt i martensit för olika kylningshastigheter mätt med synkrotron.

Restspänningar påverkar utmattningshållfastheten i hög grad. Där tryckrestspänningar ger en högre hållfasthet. FEM-beräkningar genomfördes för att studera om olika kylförlopp också ger olika restspänningstillstånd. Beräkningar gjordes med programvaran Sysweld med geometri enligt bild 9. Inga skillnader i restspänningstillstånd noterades. Tidsförloppet för spänningarna skiljer sig pga av olika kylningshastigheter. Men då de plottas mot bildad martensitmängd, som endast är temperaturberoende, kan inga skillnader noteras, bild 10. Inga fenomen som tagits med i FEM-beräkningarna kan förklara skillnaden i utmattningshållfasthet.

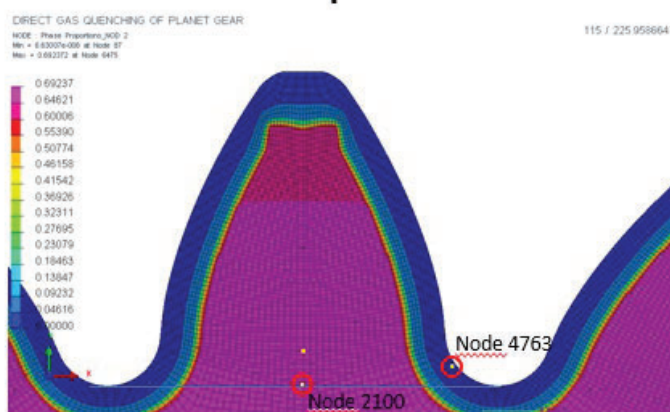


Bild 9 Del av geometri för FEM-beräkningar.

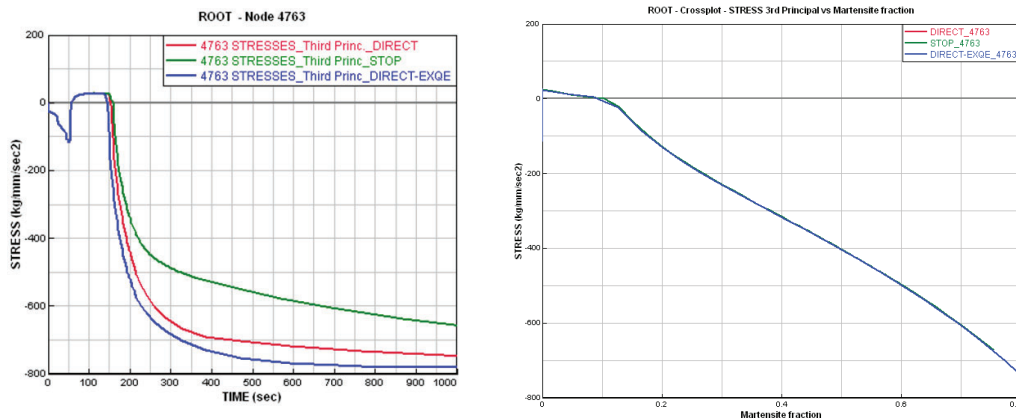


Bild 10 Maximal tryckspänning i rot, i nod enligt bild 9, för olika kylningshastighet. Tv) som funktion av tid
Th) som funktion av martensitandel.

En stor del av ovanstående redovisas utförligt i Thomas Kohnes doktorandarbete, se 7.2 Publikationer.

Övergripande mål för FFI	Bidrag från projektet
Att öka forsknings- och innovationskapaciteten i Sverige och därmed säkra fordonsindustriell konkurrenskraft och arbetstillfällen	En utökad, gemensam FoU-verksamhet inom området har nåtts. Fortsatt samarbete krävs för att klargöra mekanismerna.
Att utveckla internationellt uppkopplade och konkurrenskraftiga forsknings- och innovationsmiljöer i Sverige	Arbetet har genomförts med ett doktorandarbete på KTH, med en doktorand från Tyskland. Försök har gjorts i Tyskland på PETRA III och hos Skoda i Tjeckien. Pga Covidpandemin har resor inte varit möjliga för att sprida resultatet på internationella konferenser.
Att främja medverkan av underleverantörer	Bodycote Värmebehandling och AGA är underleverantörer och har medverkat i projektet. Kunskapen som tas fram inom projektet kan de använda direkt i sina respektive verksamheter.
Att främja samverkan mellan industri och universitet, högskolor och institut	I projektet har företag, institut och högskola samverkat.

Programmets mål – FFI Hållbar Produktion	Bidrag från projektet
Konkurrenskraft	Optimerad utmattningshållfasthet ger möjlighet att ta ut högre moment utan dyrbara omkonstruktioner. Avbruten kylning kan användas för att öka utmattningshållfastheten.
Miljö	Minskad miljöbelastning under produktion genom gaskylning istället för oljekylning och minskad energiåtgång genom kortare cykeltider vid lågtrycksuppkolning.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Detta kommer ske på företagen
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

- En stor del av projektiden var under Coronapandemin vilket har försvårat möjligheterna till spridning av projektresultatet.
- Projektet presenterades på Euromat 13 – 17.9.2021: "In-situ study on the impact of cooling rate on the martensitic transformation in high carbon steels", T. Kohne¹, A. Winkelmann², P. Hedström¹, A. Borgenstam¹. ¹ KTH Royal Institute of Technology, ² AGH University of Science and Technology Kraków
- Projektet har presenterats på Klusterkonferensen i Katrineholm: 01.10.2020 och i samband med Värmebehandlingscentrums årsmöten.
- Doktorandarbetet har/kommer resultera i fyra papers – se 7.2 Publikationer

7.2 Publikationer

Publicerade och planerade papers från doktorandarbetet:

- Evolution of martensite tetragonality in high carbon steels revealed by in-situ high energy x-ray diffraction. Thomas Kohne a, Johan Fahlkrans b, Albin Stormvinter c, Emad Maawad d, Aimo Winkelmann e, Peter Hedström a, Annika Borgenstam
a Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, b Scania CV AB, Södertälje, c RISE Research Institutes of Sweden, Mölndal, d Institute of Materials Physics, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany, e Academic Centre for Materials and Nanotechnology (ACMiN), AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland. Corresponding author: Thomas Kohne, email: kohne@kth.se
- Early martensitic transformation in high carbon steel. Thomas Kohne a, Tuerdi Maimaitiyili b, Aimo Winkelmann c, Emad Maawad d, Peter Hedström a, Annika Borgenstam a, Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden b, Materials and Process Development, Swerim AB, Stockholm, Sweden c Academic Centre for Materials and Nanotechnology (ACMiN), AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland, d Institute of Materials Physics, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany. Corresponding author: Thomas Kohne, email: kohne@kth.se
- A mechanism study of the impact of cooling rate on fatigue performance in case-hardened gears, title preliminary and authors TBD. Corresponding author: Thomas Kohne, email: kohne@kth.se
- Atom probe tomography study of influence of cooling rate on carbon distribution in high carbon steel, preliminary authors and title: Thomas Kohne a, Alexander Dahlström a, Aimo Winkelmann b, Peter Hedström a, Annika Borgenstam a, a Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, b Academic Centre for Materials and Nanotechnology (ACMiN), AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har resulterat i en ökad förståelse för avbruten kylning. Ett flertal olika förklaringsmekanismer har studerats men har visat sig inte ge den fullständiga bilden av vilka mekanismer det är som påverkar utmattningshållfastheten. Vi ser resultat i utmattningsindustriellt och i mikrostruktur i insitu-provning, men har inte hittat länken däremellan.

En fortsatt inriktning kan vara att vidare verifiera industriella utmattningsresultat i förhållande till akademiska analyser. Här har vi tittat ner till en "nivå" med aktuella tekniker. För att ytterligare förstå mekanismerna behöver man gå vidare med högupplösta tekniker för att titta på nästa längdskala.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektid: 2016-10-10 – 2021-12-31

Projektpartners: Scania CV, Linde Gas, Bodycote värmebehandling, KTH Materialvetenskap, RISE IVF (fd Swerea IVF) och Swerim (fd Swerea KIMAB)

Erik Spolander	Bodycote
Mikael Eisenbeisser	Bodycote
Annika Borgenstam	KTH
Peter Hedström	KTH
Thomas Kohne	KTH
Alexander Angre	Linde Gas
Magnus Dahlström	Linde Gas
Eva Troell	RISE (Projektledare)
Albin Stormvinter	RISE IVF
Hans Kristoffersen	RISE IVF
Harald Nyberg	Scania
Johan Fahlkrans	Scania (Industriell projektledare)
Jérôme Senaneuch	Scania
Kim Furuberget	Scania
Emil Stålnacke	Swerim
Sven Haglund	Swerim



10 Referenser

1. G Hiller (ECM Technologies), "Substitution of atmosphere heat treatments by LPC, LPCN and vacuum quenching: integrability, energy gains and strong cut of CO2 footprint," nov 2020.
2. Kleff J., Kellermann I., Mallener H., Wirth M-S., "Low-pressure carburizing and high-pressure gas quenching-comparison of performance with conventional case hardening" *Harterei-Technische Mitteilungen* (Germany), vol. 57, no. 4, (2002), pp. 257-266
3. Clausen B., Laue S., Burtchen M., Hoffmann F., Mayr P., "Surface damage due to low pressure carburizing", *Harterei-Technische Mitteilungen* (Germany), vol. 58, no. 1, Jan.-Feb. (2003), pp. 13-19
4. Johan Åslund, Eva Troell, Sven Haglund, Krister Johansson, "Influence of gas quenching sequence on fatigue properties of 16MnCr5– Interrupted gas quenching subsequent to low pressure carburising", (2010) VBC-report
5. Jing Xiaotian, Lou Bingzhe, Gu Chenqing, Shen Fusan, "Transformation of Retained Austenite in Carburised Case During Fatigue Crack Growth", *ACTA Metallurgica Sinica* (English edition) series A, Vol 3, No 4, pp 268-275, July 1990