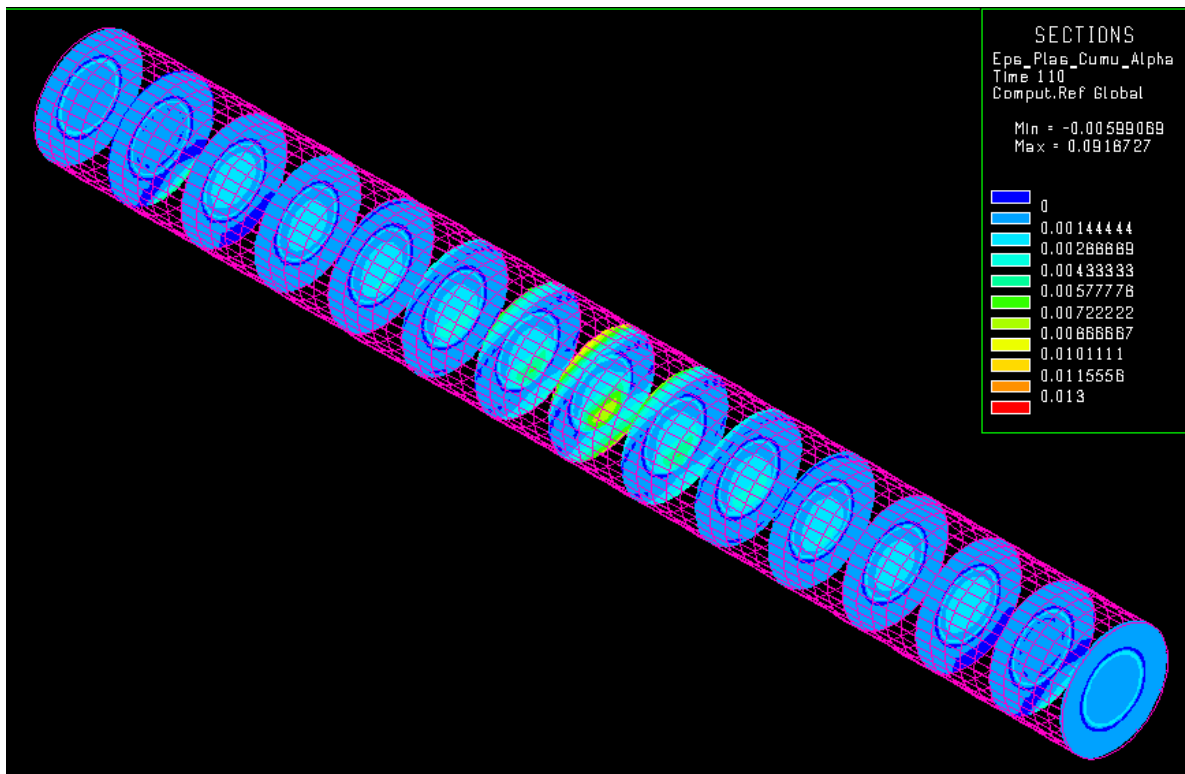


## RIKTVBC



Sven Haglund och Hans Kristoffersen  
2011-10-20  
Hållbar Produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Syfte.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Genomförande.....</b>	<b>4</b>
FEM-simulering .....	5
<b>5. Resultat .....</b>	<b>7</b>
Utmattningsegenskaper efter riktning .....	7
Restspänningar efter riktning .....	7
Resultat från riktningssimulering .....	8
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	11
<b>6. Spridning och publicering.....</b>	<b>11</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	11
6.2 Publikationer .....	11
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning.....</b>	<b>12</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner .....</b>	<b>13</b>
<b>9. References .....</b>	<b>13</b>

### 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](http://www.vinnova.se/ffi)

## 1. Sammanfattning

Riktning av komponenter efter värmebehandling är ett vanligt förfarande i industrin. Vanligtvis är avlånga komponenter som axlar och stänger formförändrade efter värmebehandling på ett sådant sätt att riktning krävs för att uppnå önskad form. Riktningsoperationen leder till en lokal plastisering hos komponenten. Detta har en effekt på till exempel restspänningar och hårdhet, egenskaper med stark inverkan på utmattningshållfastheten hos komponenten.

Syftet med denna studie var att utvärdera påverkan av riktning på utmattningsegenskaper, restspänningar, mikrostruktur och hårdhet hos induktionshårdade provstavar. Riktningen utfördes med trepunktsböjning på cylindriska axlar. Restspänningstillstånd och hårdhet utvärderades före och efter riktning. Utmattningsprov utfördes med trepunktsböjning, efter axeln roterats 60° efter riktningen, dvs mot 120° riktning. Utöver detta genomfördes FEM-simuleringar av riktningen med syfte att formulera riktlinjer för hur denna skall ske. Simuleringarna utfördes på virtuellt induktionshårdad axel med samma dimensioner som användes i försöken.

Slutsatsen var att riktning påverkar restspänningstillståndet längs hela omkretsen av en riktad komponent. Utmattningshållfastheten vid 120° var 7% lägre efter riktning med 80 kN belastning och 20% lägre efter riktning med 97 kN belastning.

Restspänningarna har påverkats på olika sätt runt periferin av axeln. I den punkt där riktningssverktyget anbringades (0 °) övergick tryckrestspänningarna efter värmebehandling till dragrestspänningar. På motsatta sidan vid 180° ökade nivån på tryckrestspänningar jämfört med före riktning. Vid 120° och 240° var påverkades restspänningarna negativt så att dessa blev lägre än före riktning. Vid högre riktningsskrafter erhöles en större negativ inverkan på restspänningarna.

Simuleringarna visade liknande förändringar i restspänningar som i de experimentella försöken. Slutsatsen var också att sk omvänd riktning bör undvikas. Då det krävs större justeringar och därmed högre riktningsskrafter används bör en kombinerad riktning användas som då görs i en vinkel i förhållande till önskad.

De simuleringar som utförts i projektet har varit viktiga för att förstå och förklara påverkan av en riktningsoperationen, speciellt skillnaderna mellan sätthårdade och induktionshårdade komponenter.

## 2. Bakgrund

Inverkan av riktning på sätthärdade provstavar har studerats i tidigare projekt inom VBCentrum. Inverkan av riktning på mekaniska egenskaper har studerats och i en mindre undersökning studerades riktningens inflytande på restspänningar på omkretsen ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  och  $180^\circ$ ) för provstavar [1]. Resultatet var dock något tvetydigt. Möjliga orsaker till detta var att restspänningsmätningarna gjordes på den sätthärdade ytan och att riktningskraften var svår att kontrollera i den riktningstrustning som användes.

En litteraturstudie visade att begränsad forskning har gjorts rörande effekterna av riktning på mekaniska egenskaper och framför allt utmattningsegenskaper hos riktade komponenter.

Fahlkrans et al [2] studerade påverkan på utmattningsegenskaper av riktning på sätthärdade axlar i trepunktsböjning. Axlarna riktades först genom trepunktsböckning och utmattningsprovning gjordes i samma riktning, ( $0^\circ$ ), eller i motsatt riktning, ( $180^\circ$ ) mot riktningensriktningen.

Det visade sig att restspänningstillståndet ändrades efter riktning. Tryckrestspänningarna hade ökat i den punkt där riktlasten anbringats ( $0^\circ$ ) och på motsatt sida ( $180^\circ$ ). Emellertid var tryckrestspänningar påverkas lägre vid den position som representerade  $120^\circ$ .

Utmattningsprov visade att utmattningshållfastheten ökade efter riktning om utmattningsnedböjningen gjordes i  $0^\circ$ .

Endast begränsad utmattningsprovning gjordes för  $120^\circ$  eftersom detta initialt inte ingick i projektet. Det var en kortserietest som gjordes med överblivna axlar. Provningsvisade att utmattningshållfastheten i denna riktning gav minskad utmattningshållfasthet med 4-5%.

## 3. Syfte

Huvudsyftet med projektet har varit utvärdera riktningens inverkan på böjutmattningshållfasthet, restspänningstillstånd, hårdhet och mikrostruktur på induktionhärdade provobjekt samt att utforma riktlinjer med hjälp av FEM-beräkningar för hur riktning skall göras för minimal försämring av produkttegenskaper efter riktning.

## 4. Genomförande

Axlar med diameter 25,7 och längden 250 mm i materialet SS2244 (EN 42CrMo4) användes i försöken. Dessa induktionhärdades progressivt och där kylningen gjordes med en polymer/vatten-baserad lösning. Härddjupet (DI) var 6.5 mm vid 400 HV1.

Riktningsoptionen simulerades genom tre-punktsböjning i en MTS-maskin med 100 kN lastcell. Utmattningsprovningen genomfördes i samma MTS-maskin. Den genomfördes genom tre-punktsböjning med ett avstånd på 200 mm mellan stöden. För anbringande av lasten vid utmattningsprovningen användes en cylindrisk rulle. Provuppställningen visas i *bild 1*.



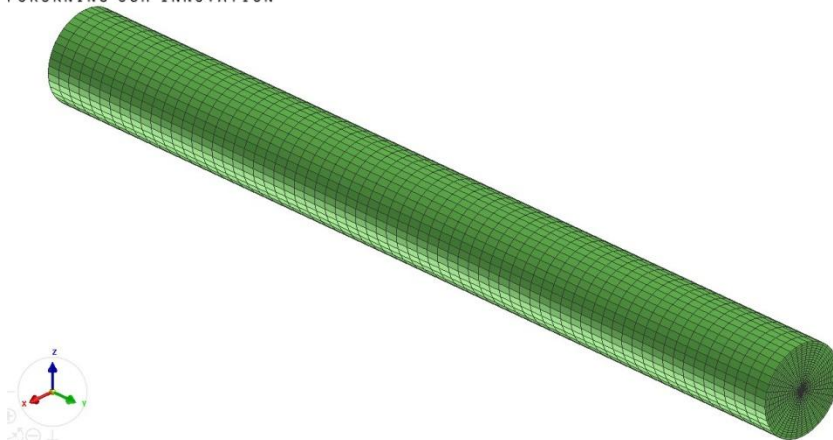
*Bild 1 Experimentell uppsättning vid utmattningsprovning*

## FEM-simulering

Värmebehandlingen och riktningen av axelkomponenten som utmattningsprovades har också simulerats (programvara: Sysweld from ESI). Materialdata som användes i beräkningarna gällde för 42CrMo4 och hämtades från Syswelds egen materialdatabas. I de flesta beräkningarna användes standardmodell för isotropiskt hårdnande. Effekten av transformationsplasticitet (TRIP) ingick med standardinställningar som rekommenderats av programvaruleverantören. Komponentens geometri modellerades som fullständig 3D-modell, se bild 2, med 67200 element 57871 noder.

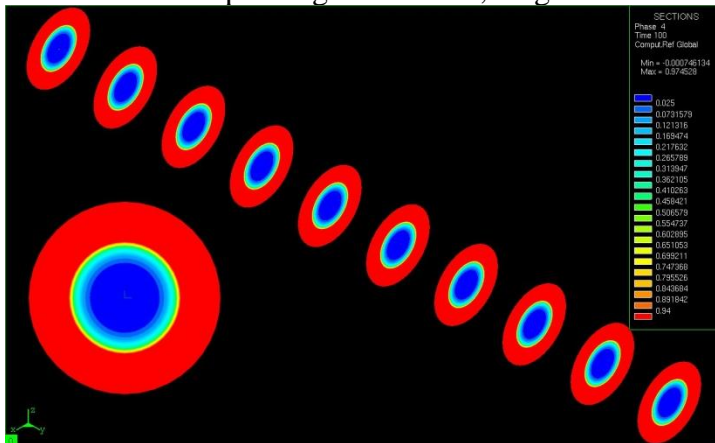
Simuleringen av induktionshärdningsprocessen vid värmningen gjordes genom att applicera en yteffekt på komponenten som anpassades för att ge det önskade härdjupet på ca 6,5 mm utan att överskrida en yt-temperatur på 1050°C. Härdjupet vid simuleringen definierades som det djup beräknad martensitmängd överskred 40%. Hela komponentens yta värmdes samtidigt och inte progressivt. Vid kylningen ansattes yttemperaturberoende värmeövergångstal med ett maximalt värde på 12600 W/m<sup>2</sup>·°C vid 500°C. [3]

Riktningsoptionen simulerades genom att ansätta nodkrafter enligt ett mönster som motsvarade riktverktygets kontaktmönster på komponentens yta. Mothållarnas verkan approximerades genom att låsa motsvarande noder i X- och Y-riktningarna

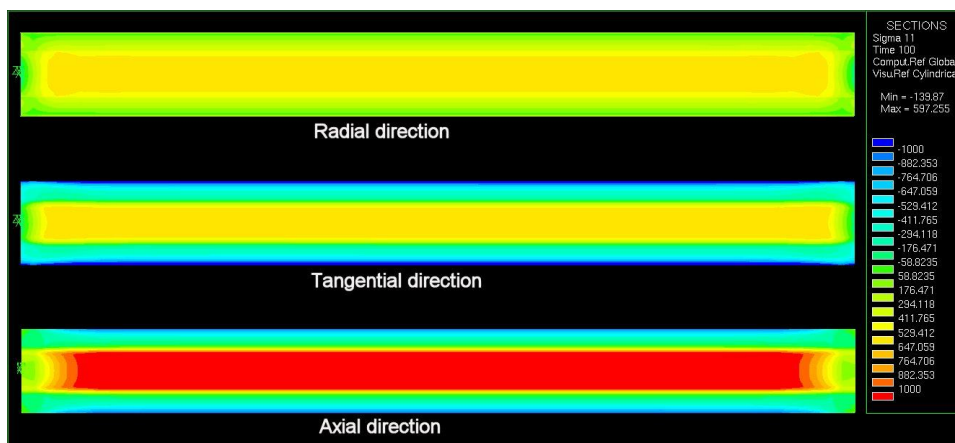


*Bild 2 Meshad axel geometri med 67200 element och 57871 noder*

I bild 3 visas beräknad martensitfördelning efter värmning och kylning för fallet med ett härd djup ner till halva provets radie. I bild 4 visas för det axiella tvärsnittet resultatet för de beräknade restspänningarna i axiell, tangentiell and radiell riktning före riktning.



*Bild 3 Martensitfördelning hos den beräknade axeln. Nere till höger visas en förstoring*

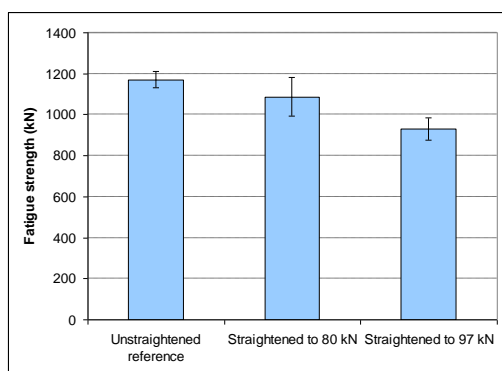


*Bild 4 Beräknade restspänningar efter induktionshärdning*

## 5. Resultat

### Utmattningsegenskaper efter riktning

Utmattningshållfastheten bestämdes genom den sk trappstegsmetoden. Resultaten visas i *bild 5*. Utmattningshållfastheten minskade med 7 % efter riktning med 80 kN, och med ca 20 % efter riktning med 97 kN. De uppmätta resultaten var statistiskt signifikanta vilket kunde med hjälp av t-testmetoden.

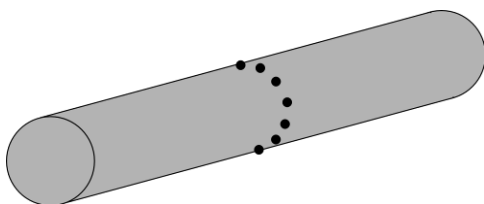


*Bild 5* Resultat från utmattningsprovning

### Restspänningar efter riktning

Restspänningar uppmättes med röntgendiffraktion på ett djup av 25  $\mu\text{m}$  under ytan före och efter riktning. Före riktning var spänningarna i axiell och tangentiell riktning -300 till -350 MPa respektive -350 till -450 MPa.

Mätningarna gjordes runt halva varvet med en delning på 30°. *Bild 6* visar schematiskt mätpunkternas lokalisering



*Bild 6* Schematisk illustration av punkter restspänningsmätning

*Bild 7* visar de uppmätta axiella spänningarna före och efter riktning. Riktningen medförde att tryckrestspänningarna blev låga i positionen 120°, såsom tidigare undersökningar också visat. Vid riktkraften 80 kN minskade tryckspänningarna från -350 MPa till -215 MPa och vid rikt kraft 97 kN till -100 MPa efter riktning.

Vid 150° och 180° ökade tryckspänningarna efter riktning. Orsaken till detta var att elastisk återhämtning efter avlastning. Vid 0° to 30° uppmättes dragspänningar efter

riktningen. Dessa har uppstått som en följd av plastisk deformation pga av det höga yttrycket under riktverktyget.

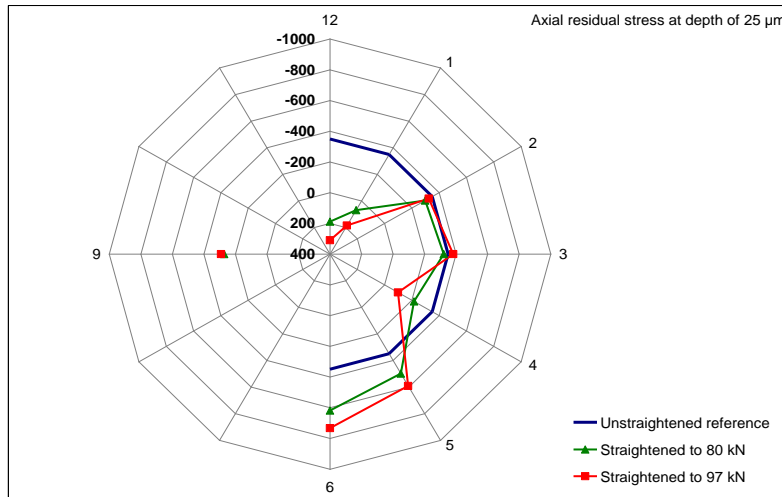


Bild 7 Polär diagram för restspänningar i axiell riktning vid djupet 25 µm

### Resultat från riktningssimulering

Nedan visas resultaten från ett urval av genomförda riktningssimuleringar. De åskådliggörs som de restspänningsförändringar som erhållits runt periferin i det område som påverkats mest vilket var på halva provets höjd. Vidare är det de axiella spänningarna som visas eftersom de är dessa som framförallt påverkar böjutmatningsegenskaperna. Erhållen slutlig deformation, dvs den riktverkan som erhållits, visas också.

### Riktning med olika kraft

Effekten av olika riktningskraft på restspänningarna efter riktning visas i bild *bild 8*. Riktningskraften är pålagd som en utbredd last med centrum i 0°. Erhållen permanent riktverkan visas i *bild 9*.

Notera att de största restspänningsförändringen erhålls i 0°. Stora förändringar fås även 120° and 240°. Detta är precis i linje med de uppmätta resultaten som visades i bild 7. Även de beräknade måtten på riktverkan var i samma storleksordning som de uppmätta.



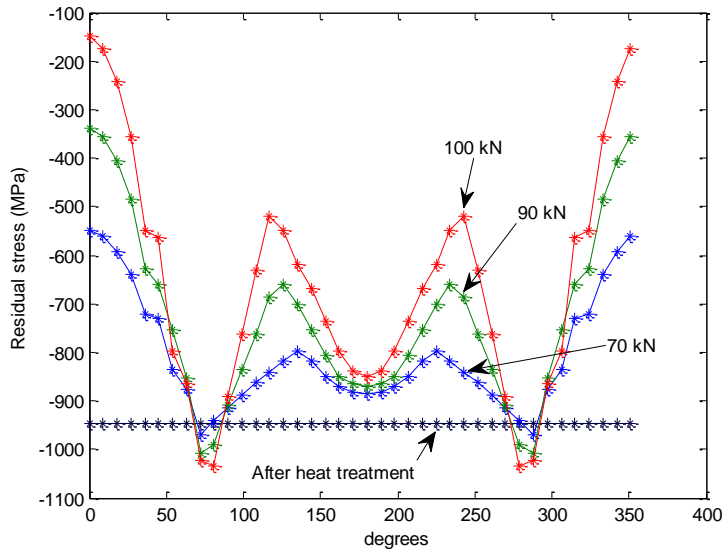


Bild 8 Effekten av olika rikt kraft på axiella restspänningar

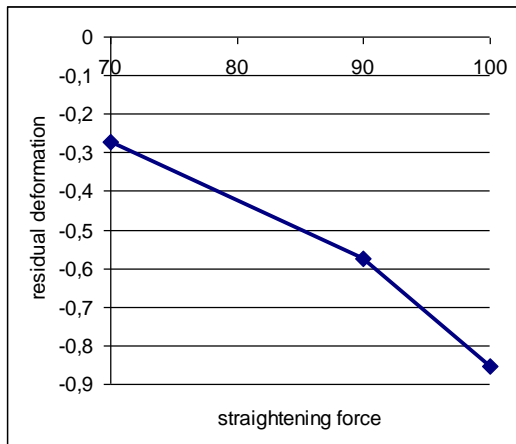


Bild 9 Effekten av olika rikt kraft på erhållen riktverkan

### Kombinerad riktning i $\pm 15^\circ$ and $\pm 30^\circ$ riktningar

Vissa kommersiella utrustningar för riktning använder sig av en princip med kombinerad riktning. Detta innebär att i stället för en riktningsrörelse utförd i motsatt riktning mot det fel som skall korrigeras utförs två riktningar i positioner med +/- ett antal grader som avviker från felets riktning. Bild 10 och 11 visar hur restspänningarna påverkas efter denna typ av riktning med lasten 90 kN och med lastförskjutning på  $15^\circ$  respektive  $30^\circ$  av riktkraften. Bild 10 visar resultatet av det första riktsteget vid en kombinerad riktning, som väntat är kurvorna ar bara förskjutna  $15^\circ$  resp  $30^\circ$ . I bild 11 visas resultaten efter det andra riktsteget. För  $15^\circ$  kan man se att spänningarna påverkats svagt negativt jämfört  $0^\circ$  och för  $30^\circ$  har spänningarna påverkats ytterligare svagt negativt. Men bild 12 visar att

det är möjligt att erhålla en högre grad korrigering dvs en ökad riktverkan, ca 10 %, genom kombinerad riktning.

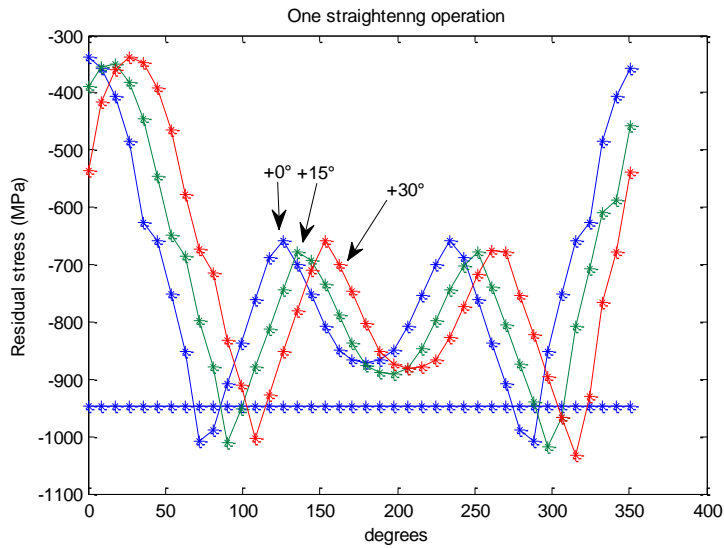


Bild 10 Effekten av kombinerad riktning efter riktning 1.

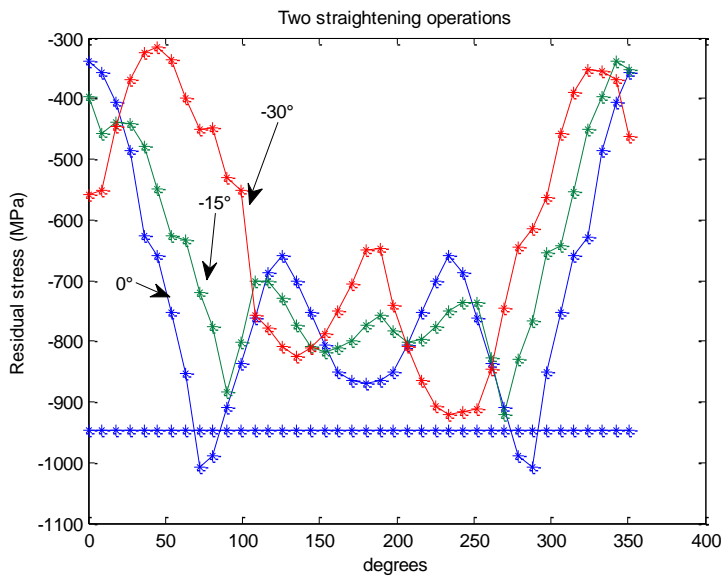


Bild 11 Effekten av kombinerad riktning efter riktning 1.

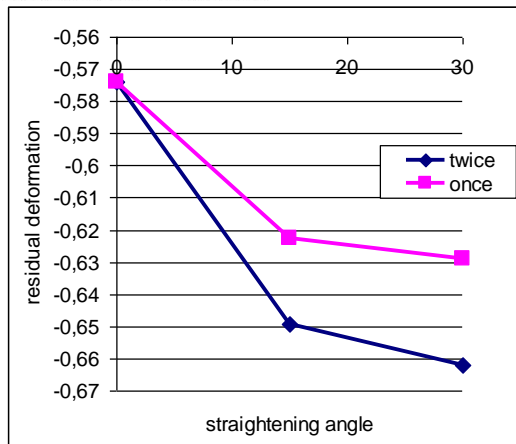


Bild 12 Effekten av kombinerad riktning på erhållen riktverkan efter riktning 1 och 2.

Det är alltså möjligt att erhålla en större riktverkan med samma last om kombinerad riktning görs och samtidigt fås bara en mindre försämring av restspänningarna. Det är också möjligt att man vid kombinerad riktning kan introducera nya, mindre, måttfel i andra riktningar. Dessa går dock att styra genom att styra lasten i det andra riktsteget.

## 5.1 Bidrag till FFI-mål

Projektets har inriktat sig främst mot FFI-målet reducerade CO<sub>2</sub>-emissioner genom minskad vikt eller ökad prestanda, genom att söka möjligheter att förstå och därmed minimera negativa effekter av riktning på transmissionskomponenter. Genom den ökade förståelsen som projektets genomförande medfört har det också tagits fram riktlinjer för hur riktning skall göras för att minska dess negativa påverkan.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Resultaten sprids i första hand till VBCentrums medlemmar där bl.a. två stora lastbilsföretag ingår. Projektet har även presenterats vid FFI-konferensen i Katrineholm 2011. Ett nära samarbete mellan KT-klustret och Utbildningsklustret vore också en viktig kanal för att vidare sprida resultaten från projektet.

### 6.2 Publikationer

Resultaten från projektet har varit en del i Johan Fahlkrans lic-arbete. Projektet har gett upphov till artikeln "Straightening of induction hardened shafts – influence on fatigue

strength and residual stress” av Johan Fahlkrans, Arne Melander och Johannes Gårdstam som inom kort skickas till tidskriften HTM för publicering.

Ett bidrag till 6<sup>th</sup> Conference of Thermal process modeling and heat treatment simulation 2013 är planerad.

Resultat från projektet har presenterats på KT-kluster-dagarna i Katrineholm 2010 och på VBCentrums årliga medlemsmöten år 2010 och 2010.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

De viktigaste slutsatserna från det genomförda projektet är:

- Riktning av komponenter påverkar restspänningarna runt periferin vilket också resulterar i minskad utmattningshållfasthet.
- I området vid 120° hade tryckrestspänningarna vid riktning med 80 kN sjunkit från -350 MPa till -215 MPa och vid riktning 97 kN till -100 MPa. Vid utmattningsprovning i samma riktning kunde en minskad utmattningshållfasthet påvisas med 7% respektive 20 %.
- Sättet på vilket tryckrestspänningarna påverkades negativt varierade runt periferin på komponenten. I 0° erhöles dragrestspänningar och vid 180° erhöles ökade tryckrestspänningar och vid 120° erhöles en minskning av tryckrestspänningarna.
- Restspänningstillståndet förändrades olika runt omkretsen av provstaven. I den punkt där lasten anbringats (0°), gick de kompressiva restspänningarna från värmebehandlingen över i dragspänningar. På motsatt sida (180°) blev tryckrestspänningarna högre. Vid 120°, erhöles också en negativ inverkan på tryckrestspänningarna, dock inte lika stor som i pålastpunkten.
- Vid högre riktningar riktningens negativa inverkan på restspänningar och utmattningshållfasthet.
- Någon signifikant inverkan av riktning på hårdheten hos komponenten gick inte att påvisa.
- Genom sk kombinerad riktning är det möjligt att få en ökad riktverkan med minimal negativ påverkan av komponentens tryckrestspänningar.
- Vid kombinerad riktning kan nya deformationer i andra riktningar erhållas. Dessa går dock att styra genom anpassning av riktningen i det andra riktningssteget.
- Vid stora härdjup (som vid t ex induktionshärdning) fås störst negativ inverkan på restspänningarna vid 0°. Vid grundare härdjup sker den största negativa inverkan vid 120° och 240°. Detta beror av att man vid lägre härdjup får en högre plastisk deformation under den härdade zonen vid låga härdjup.
- Omvänd riktning, som kan vara aktuellt om en överriktning, skett skall undvikas.

Följande områden har identifierats som intressanta för fortsatt forskning:

- I det beskrivna arbetet har en mindre studie genomförts för att studera skillnaden mellan olika koncept för att beskriva hur deformationshårdnande sker vid simulering. Detta är ett område som studeras vidare för att bättre kunna prediktera omvänd riktning och kombinerad riktning.
- Det är känt att anlöpning och om den görs före eller efter riktning påverkar hur stora formfel som går att åtgärda. Detta är ett ytterligare område där fortsatt forskning behövs för att bättre kunna bereda riktningssprocesser för olika typer av sätthärdade och induktionshårdade komponenter.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Swerea KIMAB, KTH, Swerea IVF, Volvo AB, Scania CV AB, Parker Hannifin AB, Bodycote Värmebehandling AB, Ovako Steel AB, EFD Induction AB, Teknoheat AB, Inomec AB, Atlas Copco Secoroc AB

Kontaktperson: Sven Haglund, Swerea KIMAB



## 9. References

- [1] Mats Randelius, Johan Åslund, Seyed Hosseini (2008). Straightening of case hardened bars before or after tempering – a literature survey and experimental study. VBCentrum report VBC-R-2008-001.
- [2] Johan Åslund, Seyed Hosseini, Sven Haglund (2009). Influence of straightening on fatigue properties – a study of bending fatigue and residual stresses of case hardened SS2511 steel. VBCentrum report VBC-R-2009-004.
- [3] H.Kristoffersen; Kylning vid induktionshårdning– mätning av kylförlopp, VBC-R2007-005