

Materialdata för simulering

Albin Stormvinter, RISE

VBCentrum

Abstract

- Challenge: To predict residual stresses after case carburizing.
- Experimental work to verify reference state, i.e. "truth".
- Selecting material properties to alter during simulations.
- Perform finite element simulations to predict stress state.
- Compare experimental work with simulations and conclude how altering certain material properties affect the stress calculations.

Simulering – ett verktyg för beredning och komponentdesign

- Intresset för och behovet av Computer-Aided Engineering (CAE) är ständigt ökande inom tillverkningsindustrin.
- Begreppet innefattar en bred verktygslåda med olika datorstöda tekniker, däribland Finita Element Analys (FEA).
- FEA möjliggör simuleringar och analys av värmebehandlingsprocesser på komponentnivå. Resultaten kan innefatta temperaturförlopp, strukturförändring, spänningstillstånd och formförändring.
- Resultaten är avhängig tillförlitliga materialdata, vilken finns tillgängligt i viss utsträckning men ofta behöver anpassning för ökad (tillräcklig) noggrannhet.

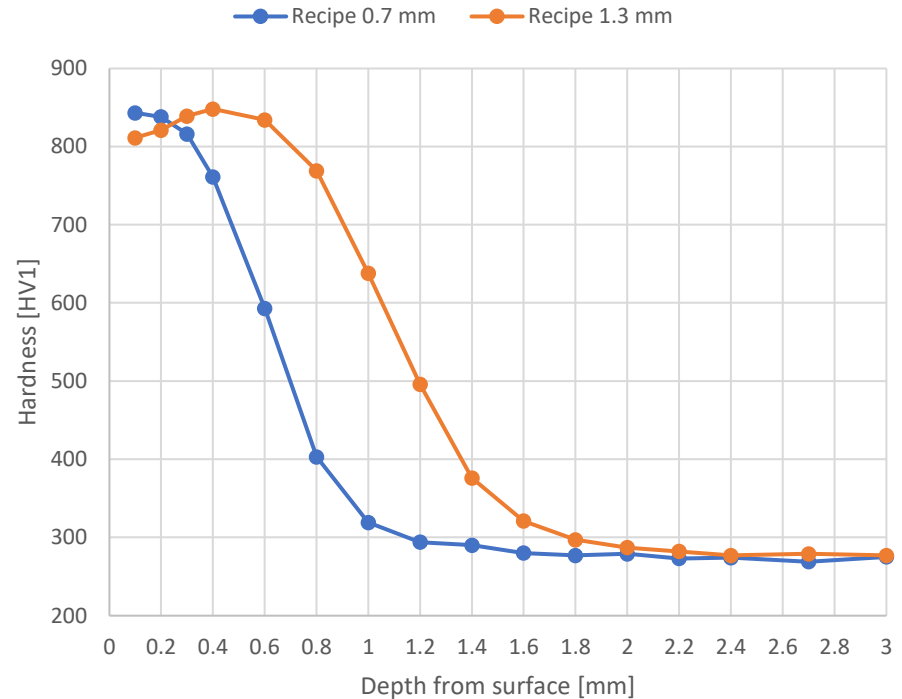
**Hur påverkar osäkerhet i
materialdata beräkning av
tryckrestspänningar i en
sätthärdad komponent?**

Experimentell referens

- Planethjulsämnen tillverkades i stålsort 20NiCrMo2-2.
- Sätthärdades via atmosfärsuppkolning och oljekylning enligt två olika recept för att nå 0,7 samt 1,3 mm härd djup.
- Recepten var av typen boost-diffusion med en sänkt avhärdningstemperatur på 840°C.
- Ingen anlöpning gjordes efter sätthärdning.

Ythårdhet och härddjup

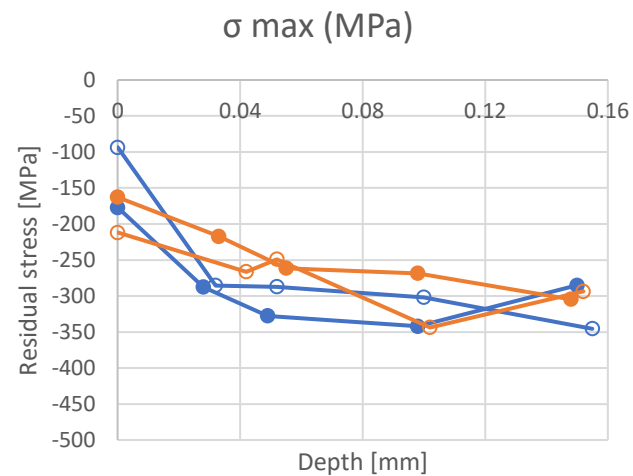
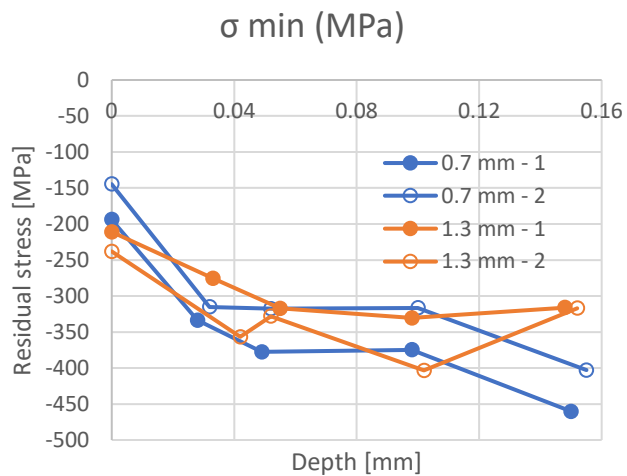
Efter sätthårdning, men utan anlöpning visade ämnena en ythårdhet på drygt 800 HV1 och ett härddjup på 0,7 respektive 1,1 mm.



Restspänningsmätningar

- Restspänningsprofiler bestämdes via röntgendiffraktion (XRD) på planethjulsämnen med 2 mm kollimator.
- Mätningar utfördes i tre riktningar: -45° , 0° och 45° , där -45° var axiell riktning och 45° tangentiell riktning.
- En profil (0-150 μm) per ämne, vilket ger två profiler per serie (0.7 och 1.3 mm CHD).
- Osäkerheten för en mätpunkt ligger typiskt i intervallet $\pm 10\text{-}30$ MPa.

Restspänningsmätningar



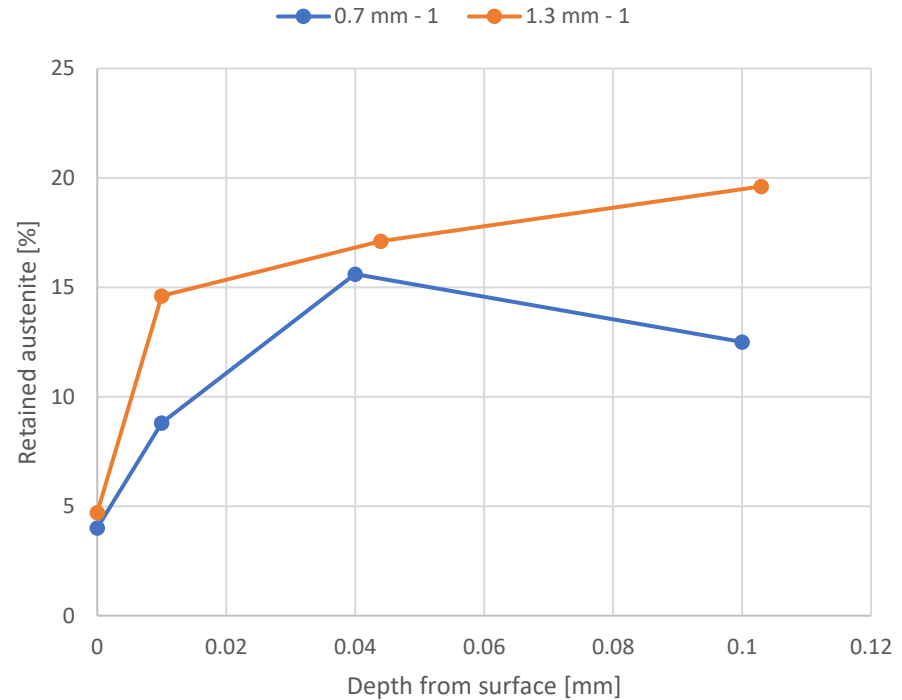
Signifikanta resultat

- Restspänningsmätning vid ett djup av cirka 0.1 mm med tre punkter runt ytterdiametern.
- Medelvärdet är relativt konstant, trots relativt stor spridning.

| Ämne | 0° | -120° | +120° | Medel | STDAV |
|-------|------|-------|-------|-------------|-------|
| 0.7-1 | -375 | -320 | -300 | -330 | ±40 |
| 0.7-2 | -315 | -320 | -360 | -330 | ±25 |
| 1.3-1 | -330 | -270 | -320 | -310 | ±30 |
| 1.3-2 | -400 | -280 | -310 | -330 | ±60 |

Restaustenit

Restaustenitprofiler bestämdes med röntgendiffraktion med en profil på ett prov från respektive serie.



Sammanfattning experimentella data

- Givet osäkerheten och den spridning mellan restspänningsprofiler från olika ämnen, är det rimligt att uppskatta ett intervall och ett djup där tryckrestspänningarna är som störst. För båda serierna rör det sig om cirka 300-400 MPa i tryckrestspänningar över djupet 0.05-0.15 mm. Noteras kan dock att trenden är stigande samt avtagande för låg- respektive hög härddjup vid 0.15 mm.
- Lägre halter restaustenit vid ytan och vid 10 μm djup tyder på bildning av High-temperature transformation products (HTTP). Restaustenithalten är likvärdig för de två serierna vid djup 40-45 och ligger på 15-17 %. Vid större djup 100 μm har restaustenithalten för serie 1.3 ökat till 20%, medan den sjunkit till 13 % för serie 0.7.

Behovet av materialdata

- För att prediktera restspänningar behöver man lösa ett termo-metallurgiskt-mekaniskt beräkningsproblem via FEA.
- Materialegenskaperna är i många fall beroende av både temperatur, kolhalt och metallurgisk fas.



ESI Sysweld: Behovet av materialdata

| Materialdata för termisk FEA beräkning | SYSWELD |
|--|----------|
| Värmekapacitet och fasomvandlingsvärme, i SYSWELD kombineras dessa egenskaper i en funktion | ENTH |
| Värmekonduktivitet | KX |
| Densitet | RHO |
| Fasomvandlingskinetik för diffusionstyrd omvandling, vanligen modellerat utifrån TTT-/CCT-data | (Tabell) |
| Fasomvandlingskinetik för martensitomvandling, i regel Koistinen-Marburger ekvationen | Ms, KM |

| Materialdata för mekanisk FEA beräkning | SYSWELD |
|--|----------------|
| Elasticitetsmodul | E |
| Skjuvmodul | NU |
| Sträckgräns | YIELD |
| Deformationshårdnande, beror av deformationshastighet vilket ger en komplex sub-tabellstruktur som är svåröverskådlig. | SLOPE |
| Termisk längdutvidgning, kan anges med riktningsberoende men sätts normalt lika och blir därmed termisk volymutvidgning. | LX, LY, LZ |
| Transformationsplasticitet | KY (0=default) |

Vilken materialdata?

1. Fasomvandlingskinetik för martensitomvandling, genom att justera de två parametrar som ingår Koistinen-Marburger-ekvationen (M_s -temperatur, K_M -konstanten)
2. Termisk volymsutvidgning, genom att studera effekten av relativa och absoluta förändringar för aktuella faser och strukturer.

Martensitbildning

Fasomvandlingskinetik för martensitombildning modelleras vanligtvis med Koistinen-Marburger ekvationen (KM-modellen), vilken ger mängden martensit som funktion av temperatur under M_s :

$$f = 1 - \exp(k(M_s - T))$$

där f är volymsandelen martensit, T är temperaturen man "släckt" till och k en konstant (KM-konstant), ofta med värdet ca -0,011 i enlighet med originalreferensen.

Martensitbildning

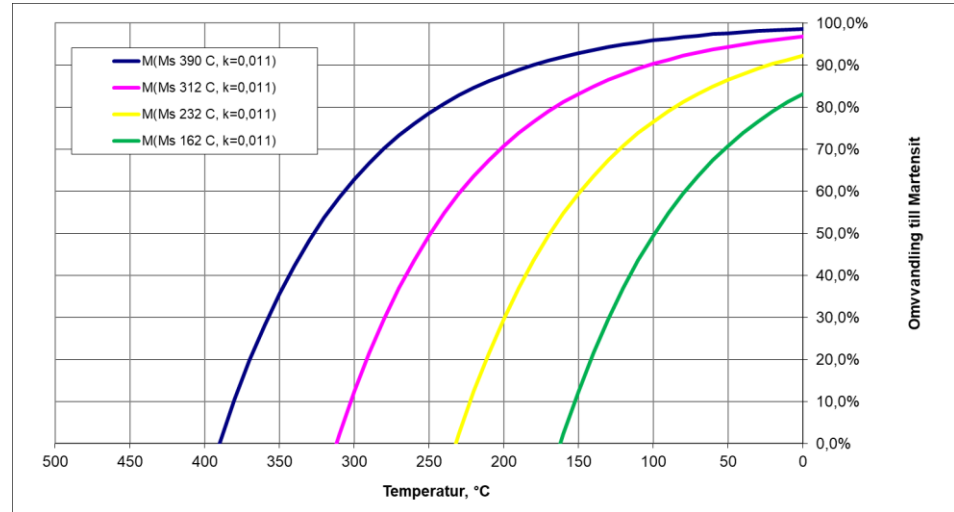
- Enligt grunduppsättningen av materialdata (referens) erhålls följande omvandling för martensit för de fyra kolhalterna:

0.2 C = Blå

0.4 C = Rosa

0.6 C = Gul

0.8 C = Grön

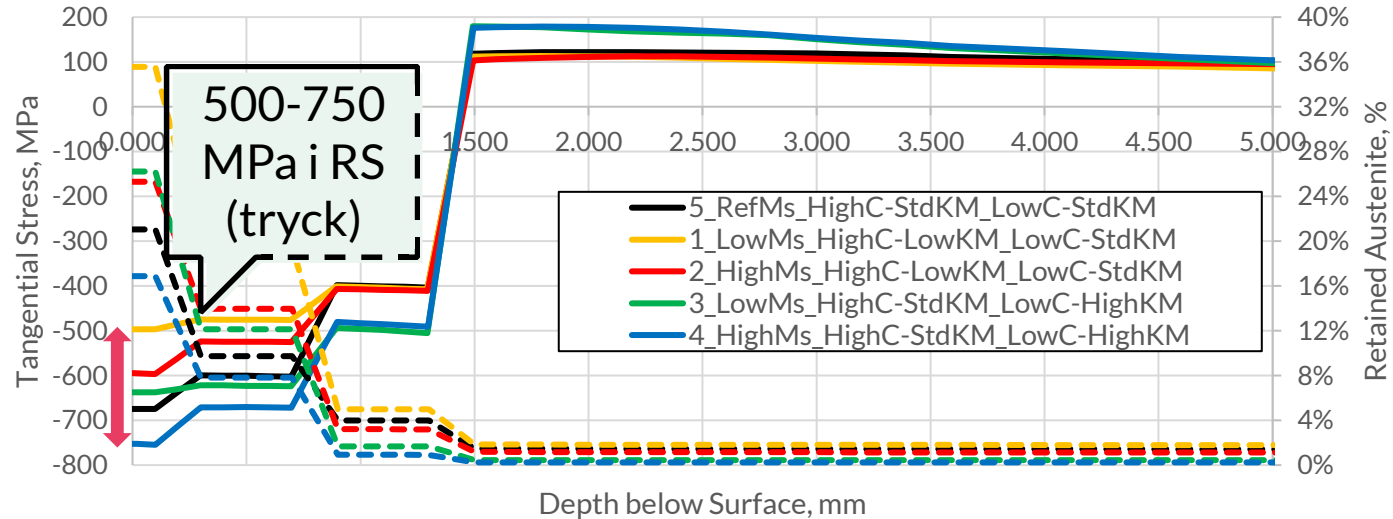


Beräkningsplan – Martensit

En referensberäkning utfördes enligt grunddata, därefter varierades både M_s -temperatur och KM-konstanten likt ett faktorförsök.

- M_s : $\pm 20^\circ\text{C}$ från referensvärdet för respektive kolhalt
- KM-konstanten (anpassat för rimlig mängd RA)
 - 0,2-0,4 C: På referensnivå 0,011 samt ett högre värde 0,015
 - 0,6-0,8 C: På referensnivå 0,011 samt ett lägre värde 0,0085

Beräknade restspänningar



Volymexpansion

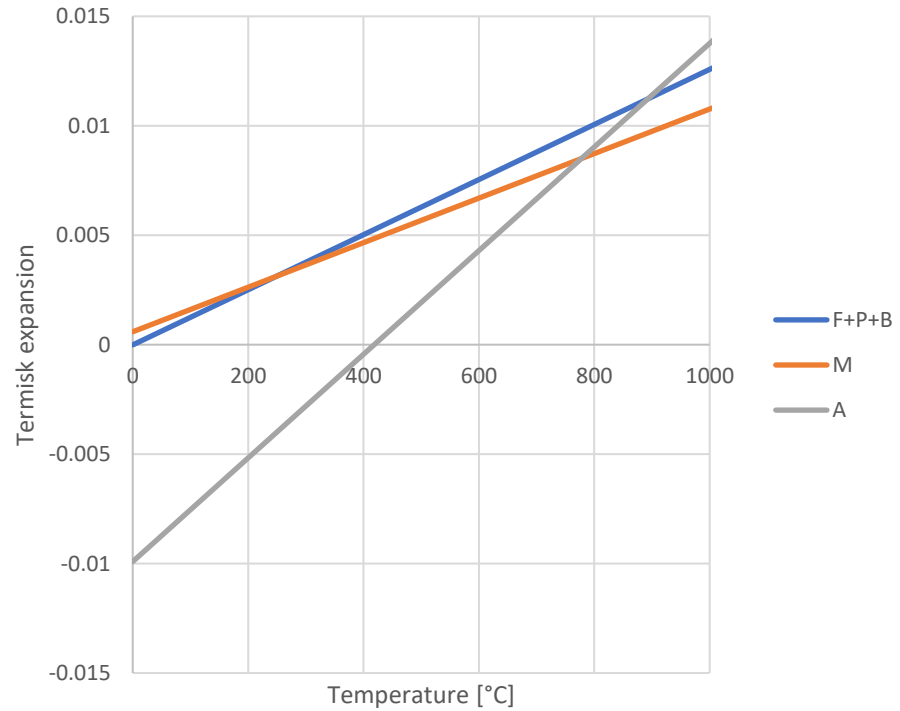
Termisk längdutvidgning är den materialparameter som ger de metallurgiska fasernas expansion som funktion av temperatur. Parametern ingår i mekaniska beräkningsdata. Dock, för att underlätta vid beräkningar och materialdataframtagning görs i regel en rad approximationer för termisk längdutvidgning:

- Approximeras linjärt temperaturberoende över hela intervallet.
- Antas oberoende av riktningen, dvs. x-, y- och z-riktning ges samma värde.
- Strukturerna perlit och bainit behandlas vanligtvis som ferrit, dvs. ansätts samma.

Sammanfattningsvis ger det att termisk längdutvidgning blir volymexpansion med olika linjära samband för austenit, martensit respektive ferrit/perlit/bainit.

Termisk expansion

Termisk expansion för 0.2 C ferrit (F), perlit (P), bainit (B), martensit (M) och austenit (A)

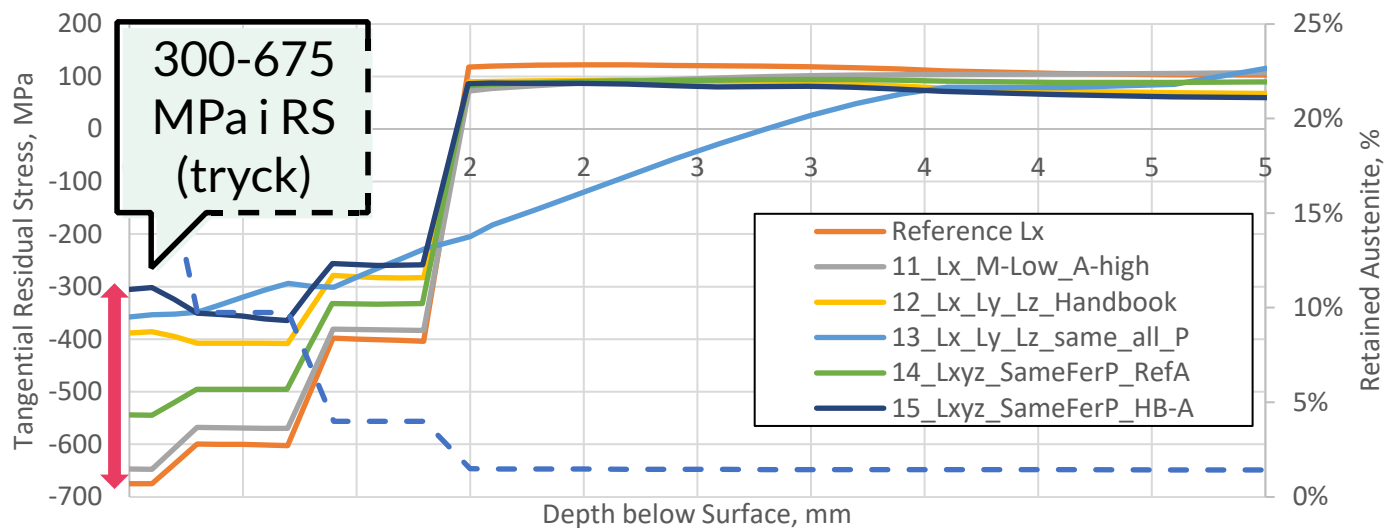


Beräkningsplan – Volymexpansion

Sex olika hypoteser/varianter/koncept för termisk expansion undersöktes:

1. **Referens:** Enligt ESI Sysweld referensdata.
2. **$\Delta\alpha'/\gamma$:** Minskad volymsförändring mellan austenit och martensit jämfört referens.
3. **VBC Handbok:** Kolhaltsberoende expansion för martensit och austenit, från handboken.
4. **Alla lika:** Samma absoluta värde och temperaturberoende för samtliga faser.
5. **α lika:** Martensit behandlas som ferrit enligt referensdata, inget kolhaltsberoende.
6. **α lika + γ VBC handbok:** Martensit enligt (5) och austenit enligt (3).

Beräknad restspänningar



Sammanfattning

- Experimentell karaktärisering av sätthärdade planethjulsämnen visade på cirka 300-400 MPa i tryckrestspänningar över djupet 0.05-0.15 mm. Dvs, lika trots att härddjup ändras från 0,7 till 1,3 mm. Även restaustenit var likvärdig runt 15-17% vid djup 40-45 μ m.
- Simuleringar predikterade 500-750 MPa i tryckrestspänningar vid ytan, beroende på hur M_s och KM-parameter valdes. Parametervälet påverkar i huvudsak hur mycket restaustenit som återstår vid avslutad kylning. Här motsvarar 500 MPa cirka 35 % och 800 MPa 15 %. Jämfört med experiment överskattas tryckrestspänningar med ungefär en faktor två (2), när restaustenitmängd liknar experiment.
- Simuleringar predikterar 300-675 MPa i tryckrestspänningar vid ytan beroende på hur termisk expansion anpassas för olika faser. Från simuleringar är det tydligt att den relativa volymsexpansionen mellan austenit och martensit har stor påverkan. Ansatsen med kolhaltsberoende expansion för austenit enligt VBC handboken ger en restspänningsnivå liknande experimentella resultat, cirka 400 MPa.

Albin Stormvinter

`albin.stormvinter@ri.se`

070-780 60 80