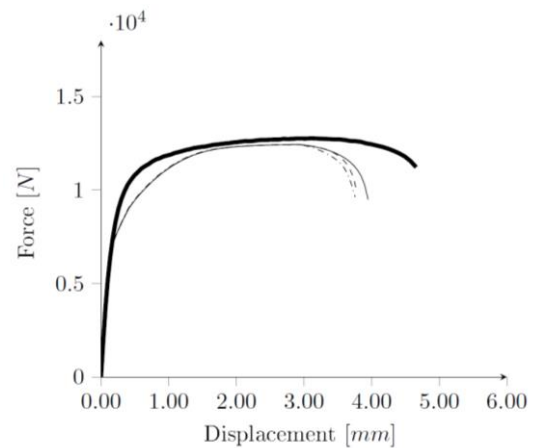
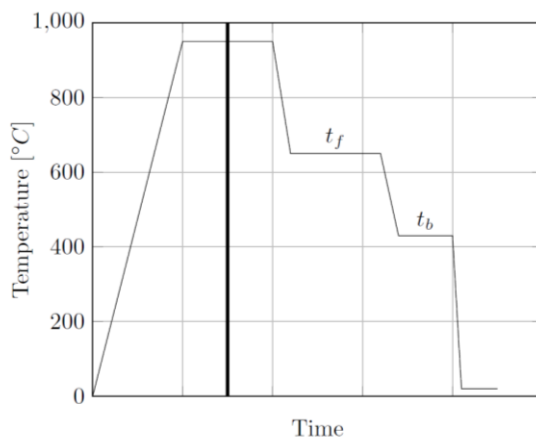
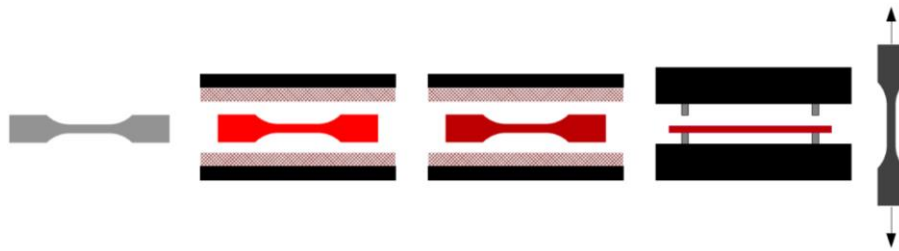


## OPTUS 2

### Modellering av brottkriterier baserade på mikrostruktur i borlegerade stålkomponenter



Författare: Stefan Golling  
 Datum: 2014-10-30  
 Delprogram: Elektronik, mjukvara och kommunikation

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b> .....	<b>3</b>
2.1	Varmformning av plåt.....	3
<b>3</b>	<b>Syfte</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Genomförande</b> .....	<b>5</b>
4.1	Värmebehandling av provmaterialet .....	5
4.2	Numerisk simulering.....	7
<b>5</b>	<b>Resultat</b> .....	<b>9</b>
5.1	Bidrag till FFI-mål .....	9
5.2	Resultaten av fyra homogeniserings modeller .....	9
5.3	Utvärdering av fraktur i blandade mikro.....	10
<b>6</b>	<b>Spridning och publicering</b> .....	<b>12</b>
6.1	Kunskaps- och resultatspridning .....	12
6.2	Publikationer .....	12
<b>7</b>	<b>Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>12</b>
7.1	Framtida forskning baserad på resultat från Optus 2 .....	12
<b>8</b>	<b>Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>14</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

Under senare år har efterfrågan på presshårdade ultrahöghållfasta stål (UHSS) för säkerhetsstrukturer i bilar ökat och trenden förväntas fortsätta. Fordonskomponenter med skräddarsydda materialegenskaper kan tillverkas genom att kontrollera kylhastigheten i plåten genom att värma vissa områden i verktyget. En förutsättning för införandet av högpresterande material är tillgången till effektiva och noggranna modeller för deformation och brott i krockberäkningar.

I detta arbete har dragprovstavar med olika fassammansättningar producerats. Materialet som studerats är borstål (22MnB5). Med hjälp av uppmätta mekaniska egenskaper hos enskilda faser och volymfraktionen av bildade faser har olika homogeniseringsmetoder jämförts. Homogeniseringsmetoderna används för att beskriva elastisk och plastisk deformation av materialet. En skademodell används för töjningslokalisering och ett skjuvspänningskriterium används för att prediktera brott. Materialmodellen för homogenisering av blandade mikrostrukturer inklusive skademodellen har implementerats i det kommersiella finita elementprogrammet LS-Dyna. Validering genom jämförelse med experimentella resultat visar på god överensstämmelse för de flesta fassammansättningar. Den största svårigheten har varit tillförlitlig mikrostrukturkaraktisering.

## 2 Bakgrund

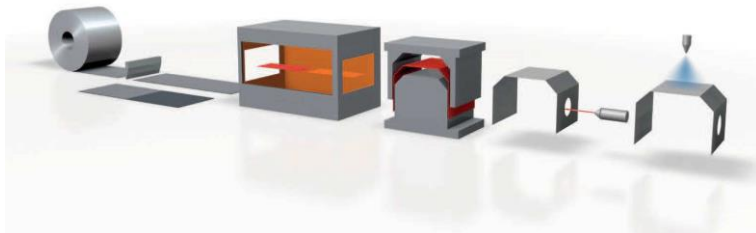
### 2.1 Varmformning av plåt

Under det senaste decenniet har varmplåtformningstekniken, även kallad presshårdning, blivit alltså närvarande i fordonens body-in-white design. Drivkraften för utvecklingen av denna teknik är efterfrågan på ytterligare förbättring av bränsleeffektiviteten och passagerarnas säkerhet.

Efterfrågan på varmplåtformningsteknik ökar stadigt och vi upplever nu en enastående tillväxt i olika tillämpningar, främst inom fordonssektorn. För utformningen av fordonsstrukturer har presshårdning bli den ledande teknologin för lösningar i syfte att minska vikten i kombination med bibehållen eller ökad passagerarsäkerhet.

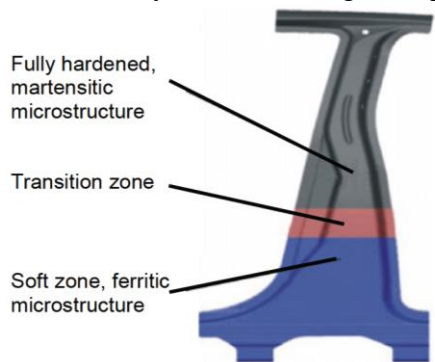
Presshårdning är en produktionsprocess för varmformning av plåt. Den kombinerar både formning och värmebehandling av plåtkomponenter i ett enda processteg. Processen omfattar att sätta plåt, som har austenitiserats, in i ett kylt formverktyg, i vilket de är släckt. Den termiska bearbetning producerar en martensitisk mikrostruktur som ger de presshårdade delar en extremt hög draghållfasthet.

Fig. 1 illustrerar processen för tillverkning av en press hårdad komponent. Från att ämnen skärs från rulle, antingen i färdigskurna form eller obearbetade. Ämnena austenitiseras i en ugn innan släckning i verktyg. Beroende på plåtens geometri vid början av processen tillsätts efterbehandlingssteg efter formningen.



Figur 1: Schematisk process av presshärdning, från plåt skärning till färdig produkt (Bild med tillstånd från voestalpine Steel division).

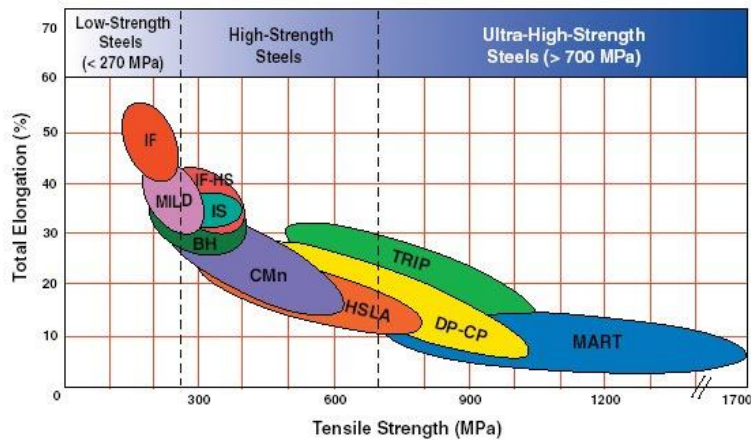
Inom tekniken för presshärdning en metod som kallas skräddarsydda egenskaper har utvecklats. Komponenter med skräddarsydda egenskaper har olika materialegenskaper i önskade zoner inom en komponent. Mekaniska egenskaper i plåten ändras genom formningsverktyg, som sekventiellt värms och kyls. Denna typ av värmebehandling leder till regioner med hög hållfasthet och låg duktilitet var direkt placerad vid sidan av en zon med lägre hållfasthet och hög seghet. Regionerna är mikromekanisk länkade med en övergångszon som består av en blandad mikrostruktur eller en mikrostruktur med hållfastheten mellan martensit och ferrit. En B-stolpe är ett typiskt exempel på en presshärdad komponent med skräddarsydda materialegenskaper, se figur 2.



Figur 2: Exempel för en komponent med skräddarsydda materialegenskaper, delvis härdad B-stolpe.

Detta arbete fokuserar sig kring den borlegerat stålet 22MnB5 med en aluminium-kiselbeläggning som vanligtvis används i presshärdnings processer. Det studerade bor-mangan legerade stålet finns från olika ståltillverkare. I levererat tillstånd består stålet av ett finkornigt, homogent fördelat ferritisk-perlitisk mikrostruktur. Den pålagda aluminium-kisel (AlSi) beläggningen fyller två syften, under austenitisering i ugnen och transfer till formningsverktyget skyddas ämnet från oxidation, under livslängden av komponenten förhindrar beläggningen korrosion.

Presshärdning ökar materialets hållfasthet med upp till 250-300% jämfört med basmaterialet. Anledning till denna ökning är den överlägsna styrkan i martensit jämfört med ferritisk-perlitisk mikrostruktur. I Fig. 3 olika typer av stål jämförs i töjning och draghållfasthet. Stålet i fokus här är i ohärdat tillstånd i området CMn, kolstål legerat med mangan. Efter bearbetning ändras stålets egenskaper och den lokaliseras i fältet MART, som står för martensitisk.



Figur 3: Draghållfasthets - töjnings relation för Ultra Höghållfaststål i jämförelse med konventionella höghållfaster stål.

### 3 Syfte

Syftet med detta arbete är att studera och skapa relationer mellan fas sammansättning och lokalisering och brott beteende i ett borlegerat stål. Den studerade stål används för UHSS komponenter inom bilindustrin. Kunskap av metoder för brott prediktering i t.ex. krocksäkerhets analyser är nödvändiga förutsättningar för ett optimalt utnyttjande av UHSS material i bilens struktur. Värmebehandling och svetsning är viktiga industriella process inom tillverkningen av komponenter i borlegerade stål. På grund av temperaturhistorik i dessa processer förändras de mekaniska egenskaperna i materialet. Exakt modellering är viktigt för simulering av belastade komponenter i fordonstillämpningar.

### 4 Genomförande

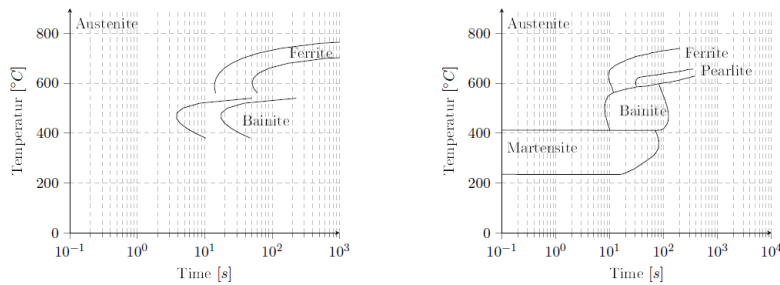
Forskningsprojektet har genomförts i samarbete mellan Avdelningen för material- och solidmekanik vid Luleå tekniska universitet, det världsledande företaget inom tekniken presshårdning Gestamp HardTech och Volvo Car Corporation.

#### 4.1 Värmebehandling av provmaterialet

Avsnitt 2.1 varmformning av plåt, är en introduktion till den industriella processen presshårdning. Presshårdning utnyttjar möjligheten att förändra de mekaniska egenskaperna hos stål med hjälp av värmebehandling. Med hjälp av tid-omvandlingsdiagram är det möjligt att uppskatta mängden av bildade faser. I allmänhet två typer av diagram är användbara för planering av experiment, tid-temperatur-transformation (TTT) och kontinuerlig kylning transformation (CCT), se Fig. 4. Isotermiska värmebehandlingar användas inte i industriella tillämpningar som gäller presshårdning eftersom de inte är de mest praktiska. De flesta industriella processer

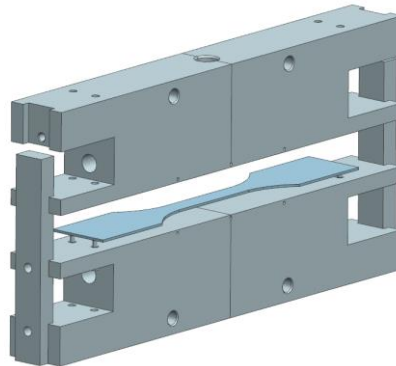
involverar kontinuerlig kylning av ett prov till rumstemperatur. För kontinuerlig kylning, är den tid som krävs för en reaktion för att börja och sluta fördröjd. Därför skiftas de isoterma kurvor till längre tider och lägre temperaturer.

Den viktigaste värmebehandling som används i presshårdning är släckning. Definitionen av hårdning är snabb kylning av ett arbetsstycke för erhållandet av vissa materialegenskaper, i fallet presshårdning en austenitiserad plåt kyls snabbt för att bilda martensit. I en CCT diagram, se fig. 4 till höger, syns detta om kylningshastigheten väljs på ett sådant sätt att varken ferrit- eller bainit-fältet berörs, denna kylningshastighet benämns kritisk kylningshastigheten. Kylningshastigheter under de kritiska bildar andra faser än martensit. För kylhastigheter som passerar genom flera fält bildandet av olika faser är möjlig.



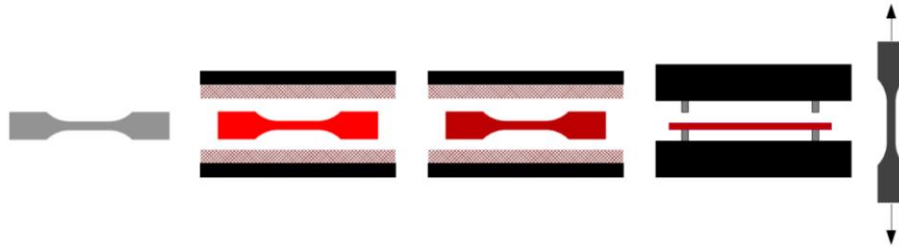
**Figur 4: Tid temperatur transformation (TTT) och kontinuerlig kylning transformation (CCT) schema för stålet som används i studien.**

Ett verktyg med plana ytor och möjlighet till att uppvärmas används för hårdning till martensit och isotermska bainit transformationer. För att uppnå dubbelsidig kontakt av provet med verktyget används fjäderstödda hållare. I Fig. 5 visas en schematisk ritning av verktyget och provet. Medan värmebehandlingen i verktyget pågår appliceras ett tryck av 20 MPa på provet. Temperaturen i verktyget mäts vid sex punkter två millimeter under verktygsytan. Dessutom mäts provets temperatur i tre punkter längs mätsträckan.



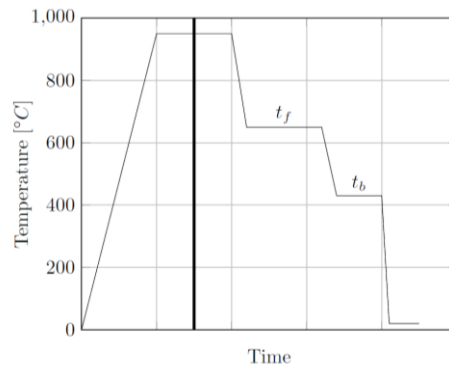
**Figur 5: CAD-ritning av verktyget som används för produktion av värmebehandlade dragprov.**

Totalt fjorton faskompositioner producerades. Tre faskompositioner är referensdata för rena faser och elva temperaturhistorier används för att producera prover bestående av ferrit-martensit, ferrit-bainit, bainit-martensit och ferrit-bainit-martensit. Alla prover austenitiserades vid 900 C i fyra minuter innan kylningen, är en grafisk illustration av processen visas i Fig. 6.



**Figur 6: Produktionsprocess av prover med olika volymandel av faser. En utskuren dragprovstav austenitiseras vid 900 C. För att bilda ferrit hålls provet vid 650C i andra ugnen. Bainit bildas i verktyget som uppvärms till 430C.**

En schematisk temperaturhistoria för framställning av prover visas i Fig. 7. Ferrit bildas genom att hålla provet på 650C i en ugn, bainit bildas vid 430 C. För att producera bainitisk-martensitiska mikrostruktur kyls proverna efter austenitisering i verktyget med olika hålltider som används för att bilda olika volymfraktioner av bainit. Den kvarvarande austeniten omvandlas till martensit genom släckning i vatten.



**Figur 1: Schematiskt representation av värmebehandlingen som används för att producera olika volymfraktioner av faser i dubbla och flerfasiga mikrostrukturer.**

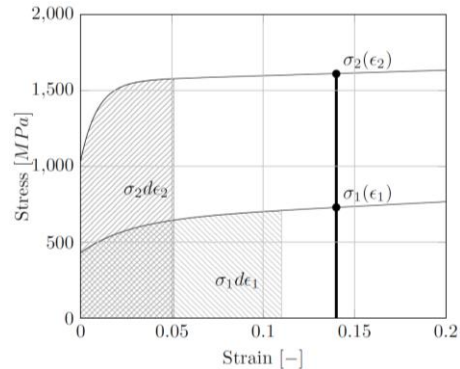
Alla tidigare beskrivna proverna består av två faser och små mängder austenit som inte omvandlades. Ett prov innehållande tre faser produceras med hjälp av två temperatur nivåer, en för ferrit och en för bainit omvandling.

## 4.2 Numerisk simulering

Homogeniseringsmetoder används i stor utsträckning om ett material som består av två eller flera beståndsdelar, faser eller material som uppvisar olika mekaniska egenskaper. Syftet med homogenisering för legeringar är en uppskattning av det makroskopiska beteendet beroende på egenskaper hos faser eller beståndsdelar.

Två fenomenologiska modeller är iso-strain och iso-work antagande. För iso-strain modellen antas att alla närvarande faser upplever samma töjning. Detta är sant för material som består av faser med liknande mekaniska egenskaper. För material där mekaniska egenskaperna hos faserna varierar är en töjningspartition mer realistisk. Iso-work antagande använder mekaniskt arbete för att dela töjningen i komponenter som

tillämpas på de olika faserna. I Fig. 8 en grafisk representation av de två fenomenologiska metoder presenteras.



Figur 8: Schematiskt representation av iso-strain och iso-work antagandet.

Med undantag för de två fenomenologiska modeller som presenterats, är två metoder baserade på arbetet av Eshelby. Eshelby-metoden löser problemet med en enda ellipsoid i en oändlig matris. En töjningskoncentrationstensor används för att beräkna töjningen i inneslutning och matris. Interaktion mellan faserna måste beaktas om volymfraktionen av inneslutningen är högre några procent. Ett antagande i denna modell är en perfekt bindningen mellan inneslutning och matrisfasen. Mori och Tanaka använde Eshelby-lösningen för en ellipsoid-inhomogenitet med hänsyn till vissa effekter av inhomogeniteten genom att använda den genomsnittliga töjningen i matrisen när alla inhomogeniteter är närvarande. Detta är i motsats till Eshelby-lösningen där medeltöjningen i matrisen tas när ingen inhomogenitet är närvarande. Weng utvecklade en analytisk modell för uppskattningen av kompositens beteende. För att uppskatta de elastiska konstanterna beräknas sekantmodulerna, därför namnet Sekantmetoden. Metoden antar sfäriska inneslutningar i en homogen matris. Användaren måste avgöra vilken fas är matrisen, om faserna flyttas om ändras kompositens beteende avsevärd. Den andra modellen baserad på Eshelby's arbete kallas double inclusion-metoden. Den största skillnaden i jämförelse med den tidigare modellen är beräkningen av töjningskoncentrationstensorerna. I double inclusion-metoden beräknas tensorerna genom en interpolering mellan två töjningskoncentrationstensorerna. Dessa tensorer har samma indata där den första beräknas med en fas som matris och den andra som inneslutning, den andra beräknas med permuterade faser d.v.s. matris och inneslutning är omvända.

Homogeniseringen kombineras med en fenomenologisk lokaliserings- och brottmodell. Lokaliseringen och brottmodellen är en modifiering av ett vanligt radial-return algoritmen för isotrop von Mises-plasticitet. Brott inträffar när lokaliseringsfunktionen når sitt kritiska värde eller maximal-skjuvspänningskriteriet är uppfyllt. Fenomenet med lokaliserad deformation är typiskt för ett brett område av solida ämnen. En töjningslokalisering, eller skjuvband, utvecklas vanligen under kraftigt plastiskt deformation av formbara material. Under pålastning av en kropp är deformationen homogen tills en punkt där all deformation börjar begränsas till ett smalt område. Vanligtvis inleder töjningslokalisering brott i dragbelastning av duktila material.

Homogeniserings- och skademodellen har implementerats i den kommersiellt tillgängliga finita element-koden LS-Dyna via ett användardefinierat subrutin. Avsikten med



materialmodellen är användningen i plåttillämpningar därför är modellen anpassat för skalelement. Tjockleksreduktion beaktas med hjälp av planspänningsiterationer.

## 5 Resultat

### 5.1 Bidrag till FFI-mål

Ett av programmets mål är att skapa metoder och verktyg för snabb och effektiv fordonsutveckling. Detta projekt har ökat kunskapen inom området brottmodellering vilket skapat förutsättning för att utföra mer noggranna krockanalyser. Detta reducerar kostnaden och framförallt tiden för utveckling av nya presshårdade komponenter till fordonsindustrin.

### 5.2 Resultaten av fyra homogeniserings modeller

En allmän iakttagelse av experimentella resultat är beteendet av den initiala sträckgränsen i alla prover. Ökad mängd av hårdare fas ökar den initiala sträckgränsen men inte på ett linjärt sätt som de fenomenologiska modellerna predikterar. När det gäller prediktering av plastisk deformation visar de mikromekaniska modellerna bättre resultat. Beräkningen av kompositens beteende har ett starkt beroende av skillnaden i mekaniska egenskaper hos rena faser. Ferrit och martensit visar den största skillnaden mellan rena faser, de representerar den övre och nedre gränsen för alla kompositer. En korrekt representation av dessa kompositioner har därför den högsta känsligheten för förändringar i fasvolympfraktion. I ferrit-bainit och bainit-martensit-blandningar är de mekaniska egenskaperna i rena faserna mindre uttalad. I Fig. 8, visas två exempel för ferrit-bainit och bainit-martensit kompositer. Prediktering av ferrit-bainit provet visade god överensstämmelse med experimentella resultat. Jämförbar med ferrit och bainit, bainit och martensit uppvisar igen ingen stor kontrast i mekaniska egenskaper. Men, ett fenomen som liknar en lödningsförbindning förändrar den mekaniska responsen betydande. Bainit-martensit kompositer med en volymandel på mindre än 25% bainit i martensit visar ett starkare beteende än den modellen kan prediktera.

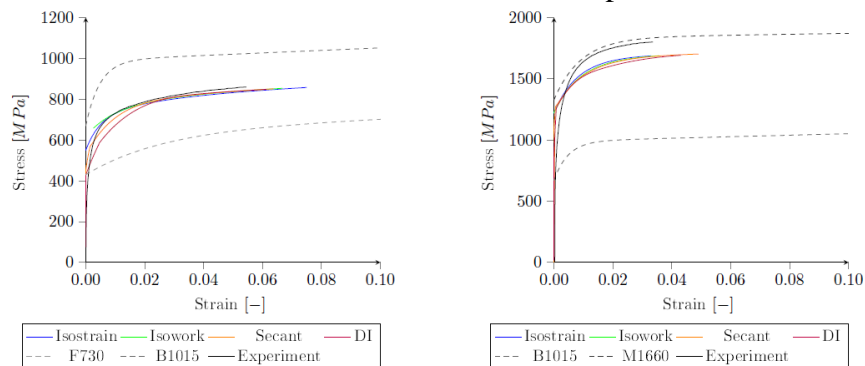


Figure 8: Jämförelse av flyttkurva av två prover. I figuren till vänster 50% ferrite och 50% bainit, till höger 22% bainit och 78% martensit.

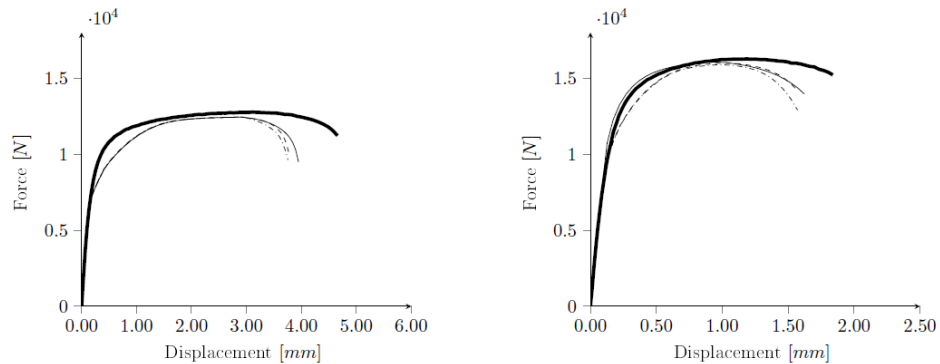
Utöver de tvåfas-kompositer en blandning som innehåller tre faser producerades och har jämförts med modellerna. I överensstämmelse med modelleringsantaganden som tagits för två faser kompositer, resultatet presenteras i fig. 9. Alla modeller är inom räckhåll av de experimentella resultaten. Sekantmetoden är den enda modellen som underskattar mätningar. Detta förväntades eftersom denna modell visade oftast den lägsta flyttkurvan.

### 5.3 Utvärdering av fraktur i blandade mikro

För att testa skad modellen som kompenserar för mesh beroendet i lokalisering och brott för ett stål bestående av ferrit, bainit och martensit fyra prover med olika volymfraktioner producerades och jämförts med finita elementberäkningar. Från DSP mätningar och med hjälp av en utvärderingsrutin som är baserad på en vanlig elasto-plastisk plasticitetsmodell i en radial-return algoritmen utvärderas brotttöjning och spännings-triaxialitet. Brott observerad i experimentet är alltid brott på kompositnivån, d.v.s. på makroskopisk skala. I finita elementet analysen ett "svagaste-länk" kriterium tillämpats. I detta fall antas att brott sker om brotttöjningen i en av faserna är nådd.

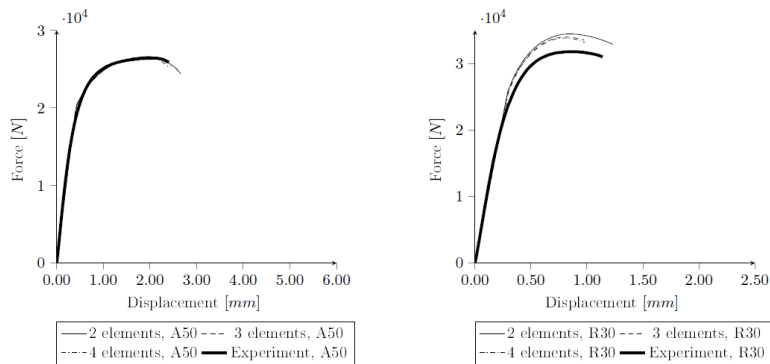
Efterföljande resultat av finita elementanalyser för tre olika nätstorlekar jämförs med de experimentella resultaten. Indata för materialmodellen är hårdnandekurvan, skadeparametrarna och fas-volymfraktioner av faserna.

I följande fig. 10-12, visas resultatet av den finita elementsimulering för tre utvalda faskompositioner, som tjänar som ett exempel.



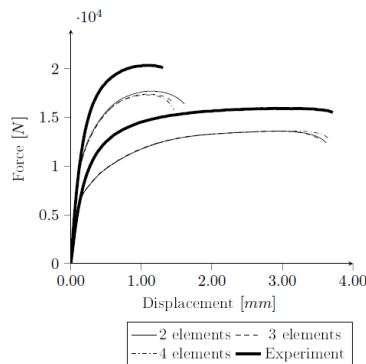
Figur 10: Jämförelse av experimentella och numeriska resultat av ett prov som består av 50% ferrit och 50% bainit. Till vänster för en rak provstav, till höger provstav med midja.

I Fig. 10 visas resultatet för en ferrit-bainit komposit med lika volymfraktioner. För detta prov är predikteringen av flyttkurvan upp till lokalisering redan visat sig vara i god överensstämmelse i studiet av olika homogeniseringscheman. Från studien var det redan förväntat att initiala lokaliseringen överskattas, och därmed kunde den lokaliserade delen av flyttkurvan inte predikteras väl. Den allmänna iakttagelsen är att den kvalitativa formen av lokaliseringen stämmer bra överens, både för raka provstavar och för provstavar med midja.



**Figur 11: Jämförelse av experimentella och numeriska resultatet av ett prov som består av 23% bainit och 77% martensit. I figuren till vänster resultatet för en rak provstav, till höger för provstav med midja.**

För prov som består av bainit och martensit jämförs experimentella med numeriska resultat i fig. 11. I detta fall har homogeniseringsystemen inte nått samma nivå som de experimentella resultaten. I litteraturen rekommenderas att använda flytkurvan av martensit. Detta tillvägagångssätt leder till bra överensstämmelse mellan experimentella resultat och beräknat. För provstaven med midja är det numeriska resultatet och experimentet inte i god överensstämmelse. En möjlig förklaring är tillverkningsprocessen. Bainitomvandlingen är i jämförelse med ferrit omvandlingen snabbt. På grund av hantering och små skillnader i tid som kan förekomma är en variation i fassammansättningen möjligt. Skillnaden mellan experiment och de beräknade resultatet ligger inom felmarginalen för fasernas karakterisering. Lokaliseringen och brott är nära den experimentella observationen.



**Figur 12: Jämförelse mellan FE och experimentellt resultat för ett prov som består av tre faser. Övre kurvorna representerar geometrin med midja, nedre kurvorna den raka provstaven.**

Provet som består av tre faser visas i fig. 12 för båda provstavsgeometrierna. Numeriska resultat underskattar klart den experimentella observationen men när det gäller förlängning innan brott är god överensstämmelsen god. Materialmodellen använder för alla kompositerna samma indata och sfärisk inneslutningsgeometri, den enda parametern som kan ändras är volymfraktionen av faser. Mikrostrukturkarakteriseringen av proverna visade en betydande felmarginal och därmed har den enda parametern som är möjligt att justera en hög osäkerhet.

## **6 Spridning och publicering**

### **6.1 Kunskaps- och resultatspridning**

Resultaten av detta forskningsprojekt har spridits muntligen genom presentation vid en internationell konferens och kommer att spridas skriftligt genom tidskriftsartiklar och licentiatavhandling. Vidare har Avdelningen för material- och solidmekanik vid Luleå tekniska universitet haft en lång och framgångsrikt samarbete med Gestamp Hardtech AB om modellering och simulering av presshårdning. Denna forskning har lett till möjligheten att ytterligare utveckla, förbättra och utvärdera materialmodeller och analysmetoder för numeriska simuleringar av formnings- och hårdningsprocesser. En komplett termomekanisk materialmodell för simulering av presshårdning och liknande processer är implementerad i den kommersiella FE-koden LS-Dyna och används av Gestamp Hardtech AB i produktutvecklingsprocessen för att utveckla komponenter och verktygsgeometrier. Modellen som utvecklats i detta arbete är implementerad i LS-Dyna och vid utveckling av presshårdade komponenter.

### **6.2 Publikationer**

S. Golling, R. Östlund and M. Oldenburg, Implementation of Homogenization Scheme for Hardening, Localization and Fracture of Steel with Tailored Material Properties, Proc. 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High Performance Steel, July 9-12 2013, Luleå, Sweden

## **7 Slutsatser och fortsatt forskning**

Genom att tillämpa den implementerade materialmodellen på andra mikrostrukturkompositioner, med några modellantaganden i beräkningen, är det möjligt att få rimliga resultat för de flesta kompositerna. Den största svårigheten hittat är tillförlitlig uppskattning av fas-volympfraktioner. Mikrostrukturer som består av två distinkta faser är enklare att karakterisera och felmarginalen är jämförbar liten. Trefasprovet visade en större felmarginal och därmed påverkas resultatet till högre grad eftersom fas-volymandelen är den enda parameter som är möjlig att ändra utan att ändra modellantaganden.

### **7.1 Framtida forskning baserad på resultat från Optus 2**

I en pågående studie utreds detaljerade modeller av punktsvetsar och jämförs med experimentella resultat som bygger på DSP-mätningar. Syftet är att validera den implementerade modellen på punktsvetsar och deras värmepåverkade zon. Studien

motiveras av att punktsvetsning är den viktigaste metoden för fogning a komponenter i en ”body-in-white”. I experimentet används provstavar med två olika grundmikrostrukturer, en ferritisk och en fullhärdad martensitisk. Dessa typer av mikrostrukturer är vanligt förekommande i presshårdade komponenter med skräddarsydda materialegenskaper.

För att ytterligare utvärdera materialmodellen planeras tester på komponentnivå. I ett första steg kommer ett prov med mer komponentliknande geometri att utvecklas. Kravet på provet är att provning är genomförbar i en standard dragprovsmaskin. Målet är att med förändring i geometrin av provet ändra spännings-triaxialiteten i ett visst område av provgeometrin. Experimentella resultat kommer att jämföras med materialmodellen som är implementerad i LS-Dyna.

En uppsättning provstavar som består av ferrit och bainit med varierande mängder av respektive fas har producerats. För alla kompositioner finns fem olika provstavsgeometrier som representerar olika spännings-triaxialiteter tillgängliga. Denna planerade studie syftar till att öka förståelsen och förbättra modellering av brott för denna typ av blandad mikrostruktur. Baserat på ökat antal provstavsgeometrier och studerade spänningstillstånd är avsikten att förbättra kalibreringen av brottmodellerna.

## 8 Deltagande parter och kontaktpersoner



Gestamp HardTech  
Box 828  
Ektjärnsvägen 5  
SE-971 25 Luleå

Greger Bergman, Ph.D.  
gbergman@se.gestamp.com



Luleå tekniska universitet  
Institution för teknikvetenskap och  
matematik

Avdelning för material- och solidmekanik  
Professor Mats Oldenburg, Ph.D.  
Tel: +46 920 49 17 52  
mats.oldenburg@ltu.se



Volvo Car Corporation  
SE-405 31 Göteborg

Johan Jergeus  
jjergeus@volvocars.com