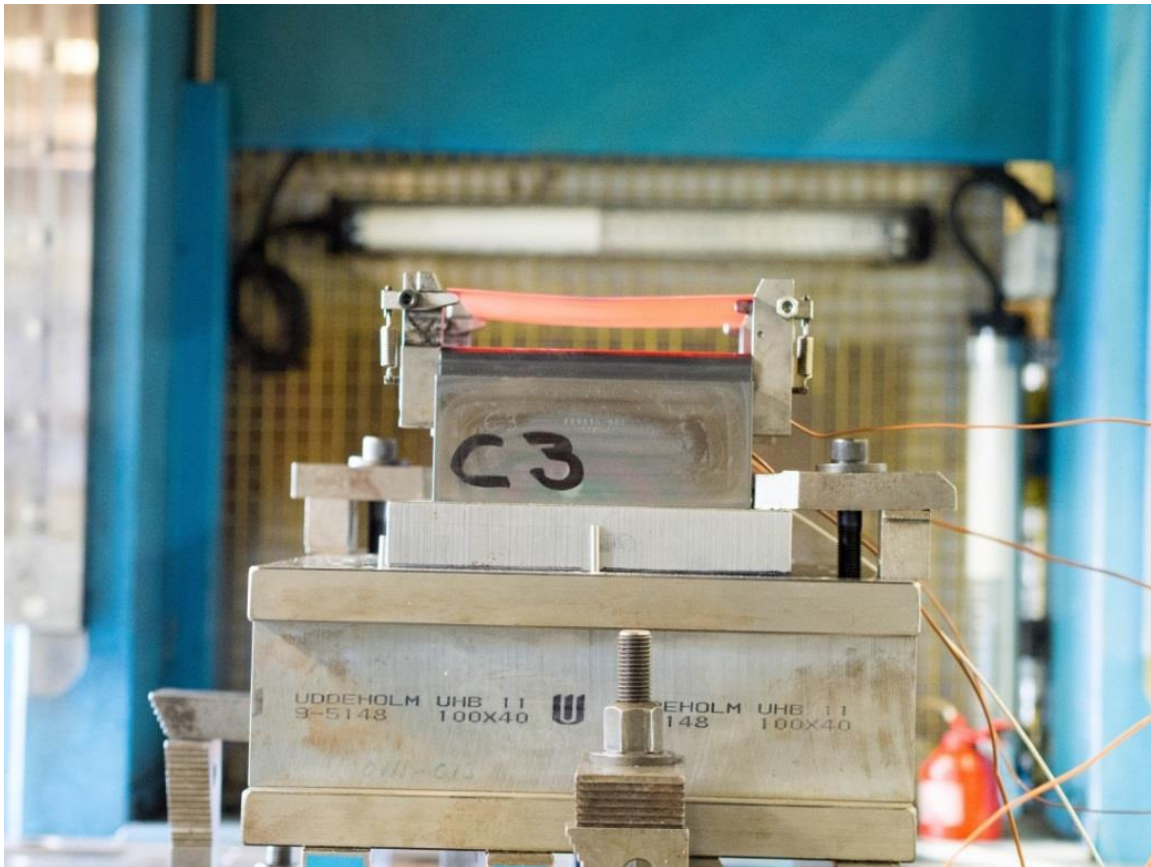


FFI

FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Analys av robusta plåtformningsprocesser vid höga temperaturer - Hotform



David Martin, Håkan Thoors
23e Februari 2015
Delprogram Hållbar produktion

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	5
4. Genomförande.....	6
5. Resultat	8
5.1 Bidrag till FFI-mål	11
6. Spridning och publicering.....	14
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	15

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

Syftet med Hotform-projektet är att ta fram robusta experimentella data för varmformning och därmed förbättra träffsäkerheten hos FE simuleringar som används för design och verifiering av detaljer och verktyg för tillverkning av presshårdade fordonskomponenter.

Ny information har erhållits angående mikrostruktur och processgång av presshärtningsstål, liksom information om de termofysiska och termoelastiska egenskaperna hos verktyg och plåtämnen. Ett antal nya laboratorie- och semi-industriella testmetoder har utvecklats med vars hjälp ny information har erhållits om friktionsegenskaper, värmeöverföring och formbarhet hos stålplåt vid varmformning. Projektet kunde leverera en stor mängd mät- och processdata relaterad till varmformningsprocessen inkluderande:

1. För fyra moderna varmformningsstål:
 - a. En katalog av mikrostrukturer med förklaringar och motsvarande mikrohårdhetsmätningar.
 - b. Continuous cooling diagram (CCT) och fractional transformation diagram (CFT) med detaljerad information om fasomvandlings-temperaturer och -kinetik.
 - c. Termiska värmeutvidgningskoefficienter för värmning och kylning
 - d. Mätningar av termo-fysiska egenskaper
 - e. Beräkningar och tabuleringar av termo- fysiska egenskaper under givna formningsförhållanden.
 - f. Mätningar av deformationsbeteende under enaxlig dragning.
2. För vart och ett av tre verktygsmaterial använda i projektet:
 - a. Mätningar av termo-fysiska egenskaper
 - b. Mätningar av värmeutvidgningskoefficienter.
3. Utvecklande av en metod för utvärdering av formbarhet vid biaxiell deformation av stålplåt vid varmformningstemperaturer där deformationen görs med gas under tryck.
4. Utveckling av en varmdragprovningssystem där ett Aramis töjningsmätningssystem används och där man kan simulera varmformning i en vanlig dragprovtestrigg.
5. Design och tillverkning av ett verktyg för testning av formbarhetsgränskurvor, FGK, i en semi-industriell press med användning av Aramis töjningsmätningssystem.
6. Detaljerad analys av struktur och sammansättning av Al-Si-ytbeläggningar efter upphettning till austenitiseringsstemperatur både med konvektion och induktion.

7. Utveckling av en robust bending-under-tension test för utvärdering av tribologiförhållanden och friktionsbeteende vid varmformningstemperaturer.

8. Uppmätta friktionskoefficienter för 12 olika kombinationer av verktygsmaterial, verktygsytans ytråhet och tre olika typer av ytbeläggning vid relevanta temperaturer.

2. Bakgrund

Efterfrågan på lättare och starkare fordonskarosser är drivkraften bakom en snabb ökning av användandet av varmformade och presshårdade avancerade höghållfasta stål. Aktuella prognoser visar att presshårdade och varmformade detaljer kan komma att utgöra upp till 35% av vikten av BIW på framtida passagerarbilar. Denna ökning av användandet av varmformningsstål i fordonskarosser markerar övergången av presshårdning från en viktig nischproduktionsteknologi för ett fåtal kritiska strukturelement till en mera generell högvolymsformningsprocess.

Dessutom används tekniker som skräddarsydda ämnen (med svetsning eller valsning) för att foga och anpassa varmformningsämnen av presshårdningsstål av olika hållfasthet, hårdbarhet och tjocklek allt oftare för att förbättra krocksäkerheten, sänka vikten och minska kostnaderna. Denna ökning i volym och komplexitet av varmformade komponenter har ökat kraven på tillförlitliga simuleringsverktyg för design och verifiering av paneler och verktyg.

För att skapa precisa och robusta simuleringar av varmformningsprocessen krävs en detaljerad förståelse av och hög kvalite på kvantitativa data på ett antal nyckelfaktorer i vad som teknologiskt är en mycket komplex process, innefattande:

- Metallurgi, mikrostruktur och egenskaper hos moderna varmformningsstål under och efter varmformningsprocessen.
- Termiska egenskaper (termisk diffusivitet, -expansion) hos moderna plåtmaterial och verktygsstål som används i varmformningssammanhang.
- Konstitutivt beteende (hållfasthet, deformationshårdnande, anisotropi) hos stålämnet under formningen.
- Temperatur-tid-historik av det formade ämnet under varmformningen liksom värmeöverföring mellan plåt och verktyg under presshårdningsoperationen.
- Uppförandet under värmning och formning av den Al-Si-beläggning som oftast är pålagd på moderna varmformningsstål.
- Inflytandet av verktygsmaterial och verktygsytans råhet samt av olika klasser av ytbeläggningar på värmeöverföring, friktionen och tribologin vid varmformning.

Svaren på dessa frågor kan kokas ner till en serie tekniska parametrar och materialdata vilka krävs som indata i FEM simuleringar och CAD verktyg. Projektet har inriktats mot



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

att utveckla metoder och utföra experiment för att leverera dessa tekniska parametrar som ett sätt att öka produktivitet, kvalitet och användbarhet för CAD design och simuleringsverktyg för varmformningsprocessen.

3. Syfte

De övergripande målen för projektet var:

1. Att öka förståelsen av tekniska nyckelfaktorer hos varmformningsprocessen.
2. Att utveckla nya experimentella metoder för analys av varmformning för att kunna ta fram kritiska indata för förbättrad CAD och simulering av varmformade komponenter.
3. Att öka träffsäkerheten vid simulering av varmformning.
4. Att minska ledtiden för design, verifiering och production av verktyg för varmformning.
5. Att maximera effektiviteten hos formningsverktygen i förhållande till deras kostnad.
6. Att öka produktiviteten hos varmformningsprocessen

4. Genomförande

Projektkommittén valde ut fyra kommersiellt tillgängliga presshärdningsstål vilka används ett och ett eller som delar insvetsade i skräddarsydda ämnen.

Arcelor Mittal Usibor 1500P AS150 Al-Si metallbelagt borstål
Arcelor Mittal Ductibor 500 AS150 Al-Si metallbelagt mikrolegerat stål
Thyssen Krupp MBW1500 AS150 Al-Si metallbelagt borstål
Thyssen Krupp 500 AS150 Al-Si metallbelagt mikrolegerat stål

Volvo Car försåg projektet med cirka 500 kg formatplåt av vardera av ovanstående material. En ytterligare coil av 50mm brett Usibor 1500 material levererades av Arcelor-Mittal till projektet för användning i KIMABs hot bending-under-tension maskin. En uppsjö av metallurgiska, mekaniska och temofysiska undersökningar utfördes på dessa stål för att skapa en tillräcklig databas för FE simulering av varmformningsprocessen.

En matris med tre verktygsmaterial, två ytfinheter och fyra olika ytbeläggningar togs fram för utvärdering av värmeövergångsdata och friktionsegenskaper vid varmformning med olika verktygstyper. Den slutliga matrisen innehöll 12 kombinationer av material, ytfinhet och beläggning (se Figure 1). Verktyg till pressförsök och friktionstester togs fram av konsortiet utgående från denna matris.

Verktygs- material	Ytbehandling							
	Obelagd		Nitrerad		Balinit Alcrona Advanced		Balinit Lumena Advanced	
Orvar Supreme	0.1 Ra	0.4Ra	0.1 Ra	0.4Ra	0.1 Ra	0.4Ra	0.1 Ra	0.4Ra
Unimax	0.1 Ra	0.4Ra						
QR090	0.1 Ra	0.4Ra						

Figure 1: Matris av verktygsmaterial och ytfinheter för framtagning av verktyg.

4.1 Projektkonsortiet och dess roll inom projektet.

Projektkonsortiet innefattade nio partners, inklusive två industriella forskningsorganisationer, ett universitet och sex företag och bestod av följande aktörer:

Vinnova finansierade partners

Swerea KIMAB AB, *koordinator*
Tekniska Högskolan i Jönköping
IUC i Olofström AB

Deltagande partners

AP&T Automation and Tooling AB
Dynamore Nordic AB
Oerlikon Balzers Sandvik Coating AB
Uddeholms AB
Volvo Lastvagnar AB
Volvo Personvagnar AB

De olika parternas roller och utförda aktiviteter summeras nedan:

Swerea KIMAB AB

Swerea KIMAB är koordinator i projektet. KIMAB utförde dilatometer analys på varmförningsstål för att ta fram CCT och fraction transformation diagram, termiska utvidgningskoefficienter, mikrostrukturanalys och mikrohardhetsmätningar. KIMAB utvecklade nya simulationsmetoder i laboratorieskala för utvärdering av friktion och tribologiska fenomen under varmförningsprocessen och för utvärdering av formbarhet under biaxiella förhållanden och relevanta temperaturer.. KIMAB assisterade också under planering, instrumentation och utförande av pressförsök utförda hos AP&T och i utvärderingen av de där erhållna data.

IUC i Oloström AB

IUC Olofström utvecklade två metoder för mätning av lokala deformationer under simulerad varmförning med hjälp av Aramis töjningsmätningssystem. Den ena möjliggjorde varmdragprov med en termisk cykel liknande den som används i verklig produktion. Den andra metoden använder sig av ny verktygsdesign i en semi industriell press för att utvärdera formbarhetsgränskurvor vid temperature upp till 600°C.

Tekniska Högskolan i Jönköping

Jönköping University utförde mätningar av termofysiska egenskaper på både arbetsmaterial och verktygsmaterial och levererade en uppsättning av numeriska resultat och ekvationer för dessa egenskaper.

Volvo Personvagnar AB

Volvo Cars försåg projektet med krav och specifikationer på material och processdata samt stålplåt från Arcelor Mittal och Thyssen Krupp för användning i projektet. Volvo bidrog också med varmdragprovdata för de i projektet ingående plåtmaterialen. Volvo cars implementerar nu resultat och know-how från projektet in i sina beräkningsverktyg för simulering av varmförningsoperationen.

AP&T Automation and Tooling AB

AP&T koordinerade och utförde design och tillverkning av verktyg för pressning och BUT tester och utförde en stor testkampanj med pressverktyg för temperaturmätningar i sin fabrik i Blidsberg.

Uddeholms AB

Uddeholm Tooling bidrog med tre olika verktygsstål för analys och för tillverkning av verktyg för pressning hos AP&T och till labskaleförsök för BUT pinnar hos KIMAB. Uddeholm stod också för råd och hjälp till konsortiet angående lämplig värmehandling och processgång för de olika stålen under tillverkningen av verktygen.



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Oerlikon Balzers Sandvik Coating AB

Oerlikon Balzers utförde slutpolering och ytbeläggning på experimentella formningsverktyg och BUT-pinnar i projektet. Oerlikon bidrog också med råd angående lämplig ytfinhet på de verktyg som skulle beläggas.

Dynamore Nordic AB

Dynamore Nordic har följt projektet och kommer att implementera de resultat och know-how som framkommit in i sina beräkningsverktyg för simulering av varmformning.

Volvo Lastvagnar AB

Volvo Trucks integrerar resultat och know-how från projektet in i sina designprocesser för varmformningskomponenter och verktyg.

Basrapporten till projektet inlämnades till Vinnova den 9e Oktober 2012 och startmöte hölls den 28e November 2012. Under projektets gång har konsortiet hållit möten vid 12 tillfällen för att planera arbetet och följa framsteg och resultat. Delrapporter inlämnades till Vinnova i Juli 2013, September 2013 och April 2014. I Februari 2014 beslutade konsortiet att ansöka om en sex månaders förlängning av projektet, huvudsakligen för att kompensera för de kumulativa effekterna av små förseningar i leveranser av material och utrustning nödvändig för vissa experiments genomförande. Denna begäran tillstyrktes av Vinnova den 5e Mars 2014. Slutmöte i projektet hölls den 26e September 2014.

5. Resultat

Huvuddelen av resultaten i projektet är i form av en stor databas med materialdata för både plåt- och verktygsmaterial samt nya experimentella metoder för att simulera och mäta parametrar i kontakten mellan de Al-Si belagda presshärdningsstålen och olika typer av verktygsytor och –material. Från dessa metoder kunde friktionskoefficienter och värmeövergångstal tas fram och relateras till processvariabler i varmformningsprocessen.

Materialdata för plåt och verktyg avsedda för varmformning

En databas har skapats för materialegenskaper hos fyra vanligt förekommande plåtmaterial och tre stycken verktygsstål avsedda för varmformning inkluderande:

1. För vart och ett av de i projektet ingående plåtmaterialen:
 - a. En katalog av mikrostrukturer med förklaringar och motsvarande mikrohårdhetsmätningar framtagna under olika simulerade varmformningsförhållanden.
 - b. Continuous cooling diagram (CCT) och fractional transformation diagram (CFT) med detaljerad information om fasomvandlings-temperaturer och –kinetik.

- c. Termiska värmeutvidgningskoefficienter för värmning och kylning
 - d. Beräkningar av fasomvandlingstörningar
 - e. Mätningar av termo-fysiska egenskaper
 - f. Beräkningar och tabuleringar av termo- fysiska egenskaper under givna formningsförhållanden.
 - g. Mätningar av deformationsbeteende under enaxlig dragning.
2. För vart och ett av de tre verktygsmaterialen använda i projektet:
- a. Mätningar av termo-fysiska egenskaper (värmekapacitet, termisk ledningsförmåga, termisk diffusivitet)
 - b. Mätningar av värmeutvidgningskoefficienter.

Temperaturmätningar och värmeöverföring vid kontakten mellan verktyg och ämne.

En ny verktygsdesign utvecklades för online-mätning av temperaturen hos ämne och verktyg under formningen. En kombination av in-situ optisk pyrometri och fastsvetsade termoelement. Tolv verktyg med olika kombinationer av material och ytbehandling tillverkades med denna design och användes i en stor presskampanj. De resulterande temperaturdata användes för att med en invers metod baklänges räkna fram värmeöverföringstal. En illustration av processen och exempel på resultat visas i Figure 3.

Mätningar av friktion mellan plåt och verktyg under simulerade presshärtningsförhållanden på labbskala

Modifieringar har gjorts på en befintlig bending-under-tension-utrustning vid SwereaKIMAB. Apparaturen som normalt används för att utvärdera tribologi och friktion i kallformningsprocesser liknande djupdragning har modifierats för att möjliggöra liknande studier vid varmformning. En plan induktionsspole togs fram och ett automatiskt temperaturkontrollsystem baserat på optisk pyrometri utvecklades för att efterlikna den temperaturcykel som råder i industriella förhållanden i varmformningslinan. Detaljerad analys av struktur och sammansättning av Al-Si-beläggningen efter uppvärmning till austenitiseringsstemperatur både med gängse konvektionsugn och med induktion visade att mikrostrukturen efter induktionsuppvärmningen var jämförbar med den som erhålls industriellt i konvektionsugn

Med hjälp av denna testmetod erhöles friktionskoefficienter under typiska formningsförhållanden för 12 olika fall av verktygsmaterial, verktygsyttråhet och tre olika beläggningstyper. Resultaten visar att adhesiv kontakt dominerar den glidande friktionen mellan plåt och verktyg i temperaturområdet 600-700°C där AlSi-beläggningen är i kompression vilket leder till förvånansvärt höga friktionsvärden. En illustration av detta test med exempel på resultat visas i Figure 4.

Nya laborietestmetoder för simulering av varmformning

Ett antal nya mekaniska testmetoder i labbskala utvecklades och utprovades i projektet i syfte att generera formbarhetsdata vid förhöjda temperaturer:

1. Utvecklande av en metod för utvärdering av formbarhet vid biaxiell deformation av stålplåt vid varmformningstemperaturer där deformationen görs med gas under tryck och töjningarna mäts online med hjälp av töjningsmätningssystemen Autogrid eller Aramis.
2. Utveckling av en varmdragprovningss metod där ett Aramis töjningsmätningssystem används och där man kan simulera varmformning i en vanlig dragprovtestrigg.
3. Design och tillverkning av ett verktyg för testning av formbarhetsgränskurvor, FGK, i en semi-industriell press med användning av Aramis töjningsmätningssystem.

Några av dessa testapparaturer visas i Figure 2.

5.1 Bidrag till FFI-mål

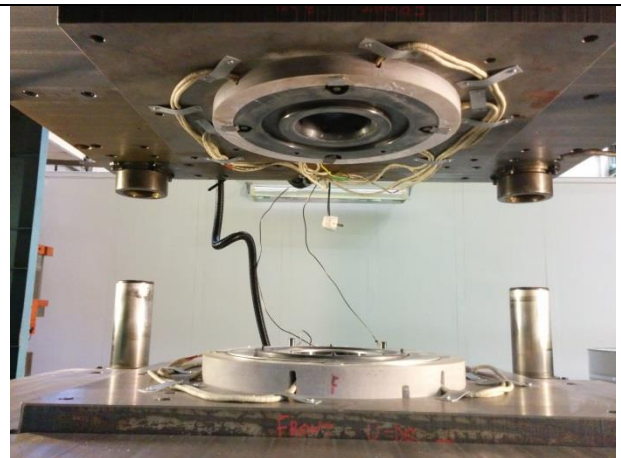
Projektets forskningskonsortium är ett bra exempel på tvärforskning där materialleverantörer, en maskin- och presslinje -leverantör, två fordonstillverkare (varav en med presshärldningslina) och en mjukvaruleverantör för simulering ingår. Sammansättningen av konsortiet möjliggör på så sätt spridning av projektresultaten till hela leveratörs- och framställningskedjan inom svensk fordonsindustri, och snabb implementering och utnyttjande av projektresultaten pågår redan. På så sätt uppfyller projektet FFI's program mål att säkerställa att ny kunskap genereras och implementeras och att befintlig kunskap verkligen implementeras i industriella applikationer.

Resultat och producerade data från projektet används också direkt för att stödja uppstart av och aktiviteter vid Volvo Personvagnars två nya presshärldningslinor i Olofström. Projektet har alltså också bidragit till FFI's program mål att bidra till konkreta produktionsförbättringar hos deltagande företag.

Figure 2: Utrustning och testmetoder utvecklade för utvärdering av varmformbarhet hos kommersiellt tillgängliga presshärldningsstål.



(a) Varmdragprovningssystem där Aramis töjningsmättningsapparat används för att utvärdera deformationsbeteendet vid förhöjd pressnings-temperatur, utvecklat vid IUC Olofström.



(b) Uppvärmrt formningsverktyg för formbarhetsprovning vid biaxiell töjning och temperaturer upp till 600°C, utvecklat vid IUC Olofström

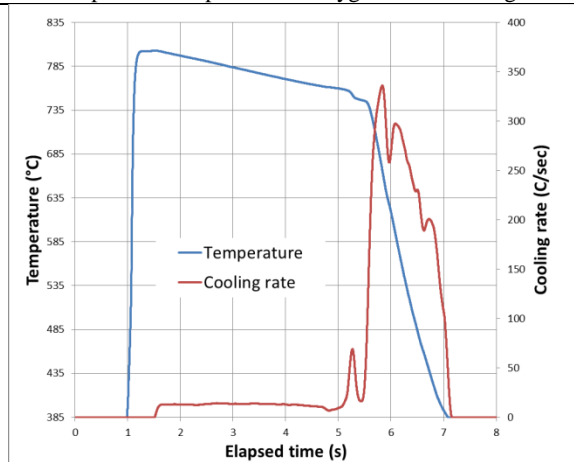
Figure 3: Utrustning utvecklad för on-line-uppmätning av temperatur och beräkning av värmeövergångstal använd vid pilot plant presstester.



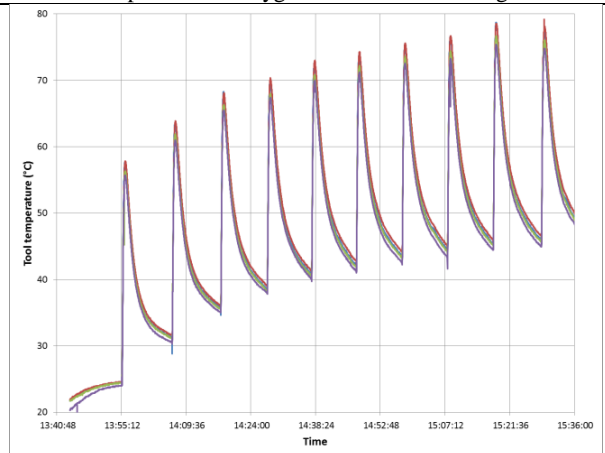
(a) Instrumenterat pressverktyg utvecklat för mätning av temperatur hos plåt och verktyg under formningen.



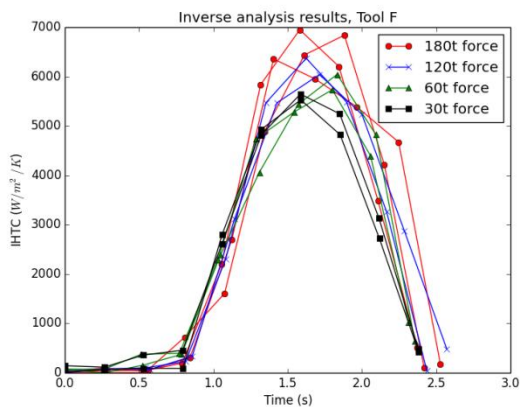
(b) Varmt borststålsämne under pressförsöken med experimentverktyg hos AP&T i Blidsberg



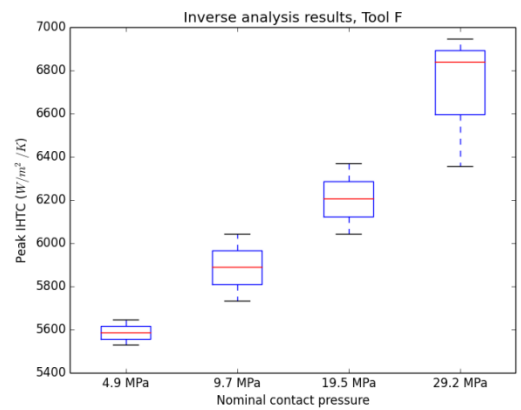
(c) Uppmätt temperatur och kylhastighet hos plåten under ett pressförsök.



(d) Uppmätt verktygstemperatur under en serie av 10 pressningar

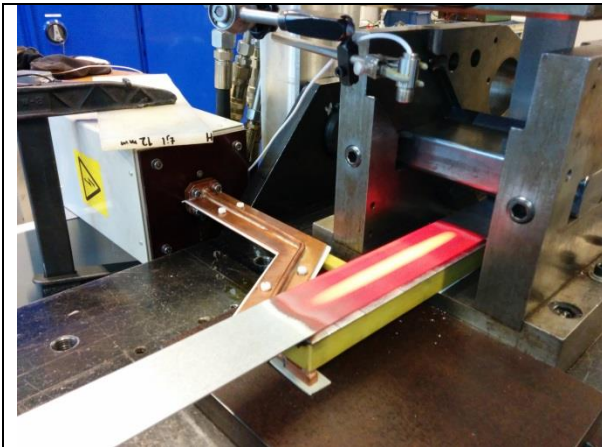


(e) Invers analys gav följande historik för framräknade värmeövergångstal under formningen.



(f) Korrelation mellan kontakt-tryck och and inversberäknat värmeövergångstal.

Figure 4: Modifierad BUTmetod för utvärdering av friktion under varmformning



(a) Al-Si- belagt borstål under in-situ värmning i BUTmaskinen hos Swerea KIMAB



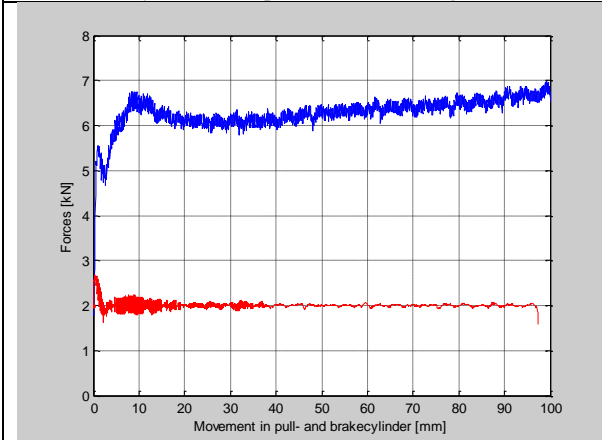
(b) PVD-belagda BUT verktygscylindrar tillverkade av AP&T och Oerlikon med verktygsmaterial från Uddeholm.



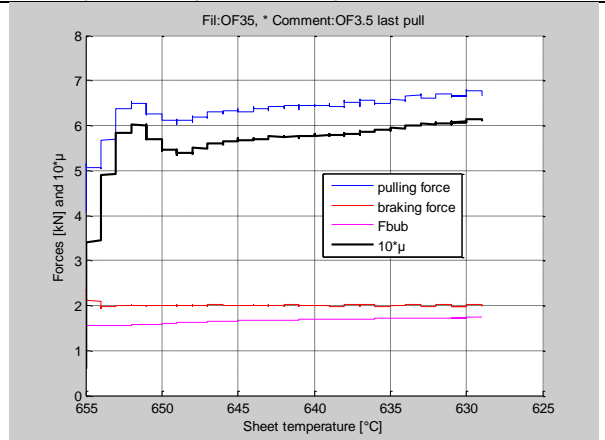
(c) Kontaktyta hos BUTpinne efter fem drag.



(d) Böjda och dragna Al-Si belagda borstålsremсор.



(e) Uppmätta drag- och bromskrafter under ett BUTförsök.



(f) Uppmätt/beräknad friktionskoefficient under ett drag varierar här mellan 0.5 och 0.6.

6. Spridning och publicering

Det första steget i resultatspridningen kommer att bli en sammanställning av alla resultat som producerats i projektet till ett detaljerat tekniskt appendix och databas för projektets alla deltagare. Ett uppföljningsseminarium med diskussioner om implementering av resultaten planeras till 2015. För det fall immateriella och sekretessfrågor kan lösas inom konsortiet planeras en presentation av utvalda resultat på FFI's workshop på plåtformning i maj 2015 och vid den 3:e workshopen om högtemperaturtribologi som hålls på Luleå Tekniska Universitet in juni 2015. Ytterligare spridnings- och publiceringsaktiviteter på specifika aspekter av erhållna resultat förväntas under 2015, inkluderande en artikel i en vetenskaplig tidskrift.

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Aktiviteterna inom projektet har lyckats med att skapa en stor mängd högkvalitativa data relaterade till de termiska, metallurgiska, tribologiska och mekaniska aspekterna hos den moderna presshärtningsprocessen med AlSi-belagda borstål. Dessa data kommer att ge ett positivt bidrag till att förbättra state-of-the-art inom simulering av presshärtning och varmformning.

Ett område som emellertid visat sig vara mycket utmanande är att generera formningsdata och maximala töjningar för biaxiell och plan töjning vid temperaturer över 600°C, vilket är nödvändigt för att kunna konstruera formbarhetsgränskurvor. KIMAB testade en gas-baserad apparatur för biaxiell töjning i projektet, men denna visade sig ha flera svaga punkter. IUC Olofström utvecklade ett funktionellt pressbaserat system med uppvärmda verktyg och en varm enaxlig dragprovtest i projektet, men lösningen är för närvarande begränsad till temperaturer under 600°C och kan inte på ett enkelt sätt följa den termiska cykeln vid kommersiell presshärtning. Plantöjningstester utförda av KIMAB i en Gleeble termomekanisk simulator med konventionella grid och specklemönstersystem för optisk töjningsmätning vid 600-900°C misslyckades också med att leverera data av god kvalitet. Goda mekaniska provningsmetoder för höga temperaturer i mening att konstruera formbarhetsgränskurvor kvarstår som en stor utmaning som kommer att kräva ytterligare forskningsinsatser.



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Swerea KIMAB AB	David Martin	david.martin@swerea.se
IUC i Olofström	Magnus Liljengren	magnus.liljengren@iuc-olofstrom.se
Tekniska Högskolan i Jönköping	Anders Jarfors	anders.jarfors@jth.hj.se
Volvo Lastvagnar AB	Mats Sigvant	mats.sigvant@volvocars.com
AP&T Tooling and Automation AB	Lars-Olof Jonsson	larsolof.jonsson@aptgroup.com
Oerlikon Balzars Sandvik Coating AB	Susanna Lindgren	susanna.lindgren@oerlikon.com
Uddeholms AB	Anna Medvedeva	Anna.medvedeva@uddeholm.se
Volvo Lastvagnar AB	Samuel Bäckström	samuel.backstrom@volvo.com
Dynamore Nordic AB	Mikael Schill	mikael.schill@dynamore.se



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION