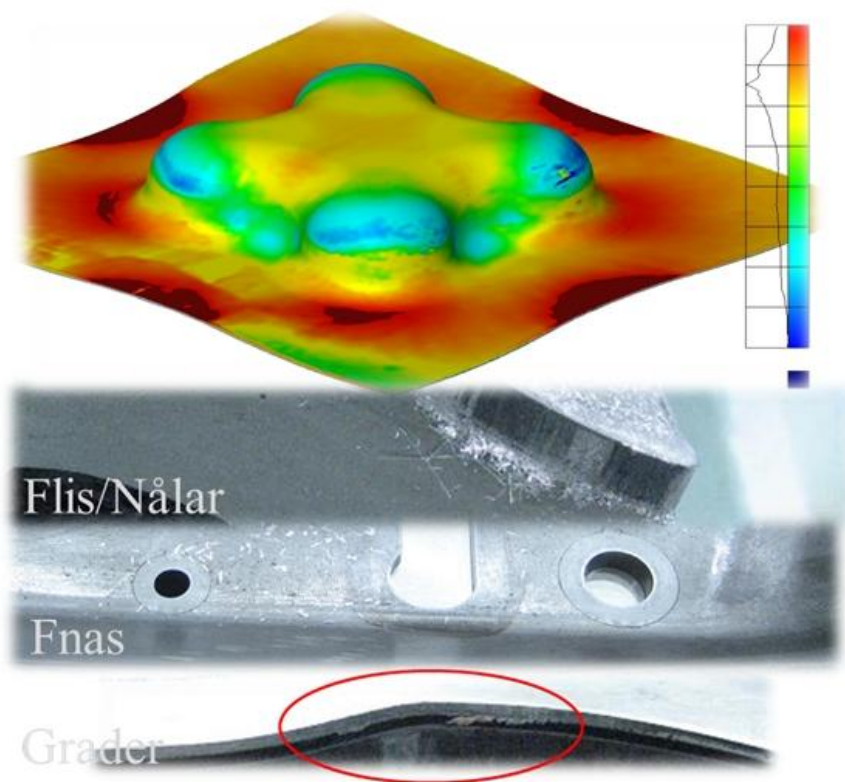


Högvolymsproduktion av aluminiumkomponenter, ALKOMP



Författare Mats Sigvant, Peter Ottosson, Daniel Wiklund, Mikael Kjellberg, Johan Berglund, Mats Larsson
Datum 2015-04-17
Hållbar produktionsteknik

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund.....	4
3. Syfte.....	4
4. Genomförande.....	5
4.1 Materialdata och materialmodellering	5
4.2 Tribologiskt system, friktionsmodellering och enstegsverktyg	6
4.2.1 Friktionsmodellering	6
4.2.2 Experimentella tribologiska försök	6
4.2.3 Enstegsverktyg	7
4.3 Robusta klipprocesser för aluminiumplåt	8
5. Resultat.....	10
5.1 Bidrag till FFI-mål	10
5.2 Materialdata och materialmodellering	11
5.2.1 Prediktering av återfjädring	11
5.2.2 Simulering av Huv Inre, Volvo XC60.....	12
5.3 Kalibrering av friktionsmodell.....	12
5.4 Robusta klipprocesser för aluminiumplåt	13
6. Spridning och publicering.....	14
6.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	14
6.2 Publikationer.....	14
7. Slutsatser och fortsatt forskning	15
7.1 Slutsatser kring friktionsmodellering.....	15
7.2 Slutsatser och framtida arbete för enstegsverktyget.....	15
7.3 Slutsatser och framtida arbete för Robusta klipprocesser för aluminiumplåt	16
8. Deltagande parter och kontaktpersoner.....	17

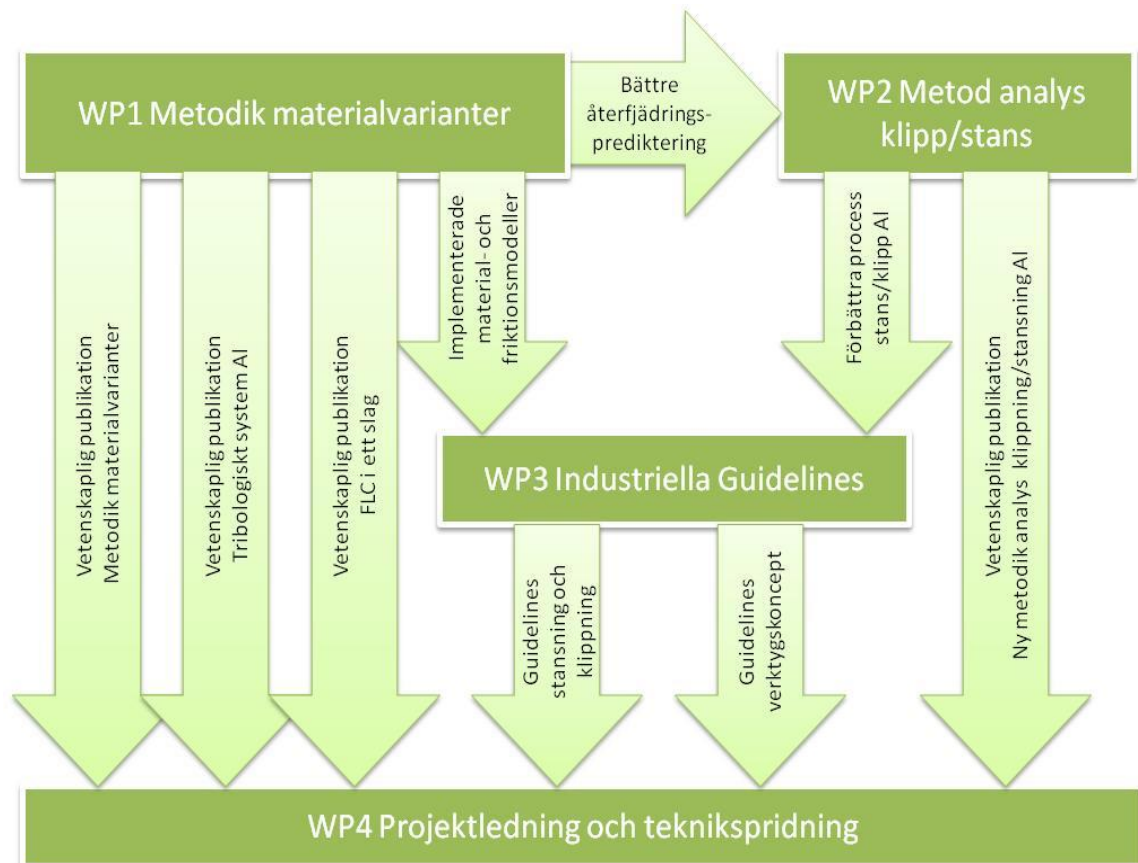
Kort om FFI

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

Projektet ALKOMP har adresserat utmaningar med aluminium i plåtform. Utmaningarna har uppdelats i två områden, dels metodik för att hantera materialvarianter i tidigt skede genom Finita Element (FE) simulering och dels metodik för att analysera och motverka flisbildning vid klipp- och stansning.



Figur 1 Projektbeskrivning, samband mellan projektets fyra delaktiviteter.

Projektets huvudmål har varit att genom framtagning av ny metodik och ny kunskap korta ledtid och kostnad för framtagning av nya tunnplåtkomponenter av aluminiumlegeringar samt säkerställa robust tillverkning av dessa.

Delmål för att uppnå detta var:

1. Ny metodik för framtagning av indata till simulering för varianter av material
2. Ny metodik för utvärdering av flis vid klippning/stansning av aluminium
3. Industriella riktlinjer

Projektet har levererat generisk kunskap i form av:

- Metodik för framtagning av materialdata till valda materialmodeller via experiment och inversmodellering.
- Sammanhållen metodik för utvärdering av formningsuppträdande hos nya materialvarianter.
- Analys av hur återfjädringsprediktering kan förbättras via ny material- och ny friktionsmodell.
- Analys av tribologiskt system kring aluminiumplåtformning.
- Ny metodik för detektering och analys av flisbildning.

2. Bakgrund

Idag är lättviktskonstruktion i fokus för fordonsindustrin. De ökade produktkraven såsom lägre emissioner, tillsammans med förbättrad säkerhet och prestanda, innebär att fler komponenter måste tillverkas i lättviktsmaterial, t ex höghållfasta stål eller olika aluminiumlegeringar. I ett framtida scenario förväntas 20 % av karossen utgöras av aluminium, en betydlig ökning jämfört med idag.

En undersökning från 2012 [2] visar att redan idag finns i medeltal 160 kg aluminium i en personbil. Modeller från Land Rover, Audi och Jaguar sticker ut som mest aluminiumintensiva med karosser och upphängning helt i aluminium. Volvo Car Group befinner sig strax över mitten, med drygt 180 kg aluminium, vilket motsvarar mindre än 10 % av vikten, för de modeller som undersökts.

Dock är **aluminium i tunnplåtskomponenter ännu endast en mindre del av det aluminium som används i en bil, drygt 20 kg per bil i medeltal**. Gjutet aluminium dominerar stort med över 110 kg aluminium i medeltal per personbil.

3. Syfte

Projektet har syftat till att möta två identifierade huvudutmaningar för ett lyckat införande av nya formbara aluminiumlegeringar på bred front i svensk fordonsindustri:

- 1) Robust produktion av olika aluminiumlegeringar genom ökad noggrannhet vid FE-analys av formning genom användning av mer avancerade materialmodeller kombinerat med ny metodik för materialutvärdering.
- 2) Robusta klippprocesser för aluminium genom att skapa ny förståelse för mekanismerna vid flisbildning under klippning/stansning av aluminium

Projektet ger svensk fordonsindustri en förstärkt position inom produktion av lättviktslösningar för karossdetaljer. De generiska resultaten från projektet förstärker och bygger kunskapsbasen kring formning av aluminiumplåt med tonvikt på inverkan av materialvariationer.

4. Genomförande

4.1 Materialdata och materialmodellering

Vilken materialmodell som används i formningssimuleringen har en stor inverkan på noggrannheten hos en formningssimulering. Samtidigt så är det ofta kostsamt att ta fram data för en komplicerad materialmodell och dessutom så ökar beräkningstiden för en avancerad materialmodell jämfört med de som används i dag inom fordonsindustrin.

I detta projekt har två nya materialmodeller, BBC2005 i mjukvaran AutoForm och Yld2000 i mjukvaran LS-DYNA, använts. De är formulerade på olika sätt men om alla parametrarna i respektive modell används så blir de resulterande flytytorna identiska. För att ta fram indata till dem har metodiken presenteras i Banabic et.al.¹ använts. Metoden går ut på att kombinera data från flera olika materialprovningar för att ta fram så många indataparametrar som möjligt. För att få hög noggrannhet så används optiska mätmetoder under försöken. De resterande parametrarna som den valda materialmodellen kräver fås genom inversmodellering, dvs resultat från ett experiment jämförs med simuleringsresultat för samma experiment. Finns det skillnader i resultat, modifieras simuleringsmodellen tills man får acceptabel noggrannhet. En ytterligare fördel med denna metod är man får en kontroll på att även övriga parametrar är korrekta.

Båda modellerna kräver nio olika indataparametrar:

- Fyra sträckgränser R_p i olika riktningar.
- Fyra R -värden i olika riktningar
- En exponent, M , som bestämmer flytytans form.

Dragprov i valsriktningen, diagonalt i förhållande till valsriktningen och tvärs valsriktningen ger tre R_p och tre R -värden. Den equi-biaxiella R_p och det equi-biaxiella R -värdet får ur ett Viscous Pressure Bulge-test. Slutligen fås exponenten M genom att inversmodellera ett sträckpressningsförsök med sfärisk stämpel och friktion mellan plåt och stämpel.

Hårdnandekurvan, dvs förhållandet mellan plastisk töjning och spänning, fås genom att kombinera resultat från dragprovning i valsriktningen och från Viscous Pressure Bulge-testet.

För att kunna avgöra om det finns risk för sprickor krävs en Formgränskurva, FGK. I detta projekt har den tagits fram genom att pressa plåtar med olika bredder. Varje sådant prov har filmats med ett optiskt mätsystem, ARAMIS. Analys av resultatfiler från proven ger sedan den FGK som använts i formningssimuleringarna.

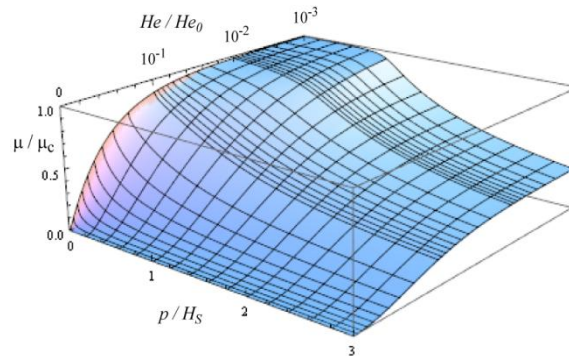
¹ Banabic D et. al., Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation, Springer, 2010.

4.2 Tribologiskt system, friktionsmodellering och enstegsverktyg

4.2.1 Friktionsmodellering

Friktionsförhållandet mellan plåt och verktyg är av största vikt för att kontrollera hur plåtmaterialet flyter in i verktyg. Vid Finita Element simulering (FE) av formning används idag vanligen en klassisk Coulombsk friktionsmodell för att beskriva förhållandet mellan plåt och verktyg. I ALKOMP har därför tribologiska studier genomförts och en ny friktionsmodell utvärderats.

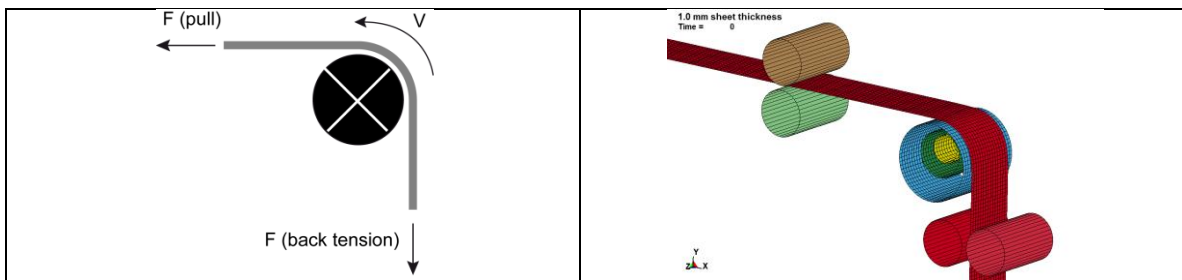
Modellen valdes för att den bygger på en analytisk lösning som gör den lättförståelig samt beräkningseffektiv. Genom att den beskriver första ordningens fysik är den också lämplig för vidare utveckling. Modellen kan ses som en generalisering av de så kallade Shear-cap och Emmens modeller och dess responsyta beskrivs i Figur 2.



Figur 2 Friktionsmodellens responsyta.

4.2.2 Experimentella tribologiska försök

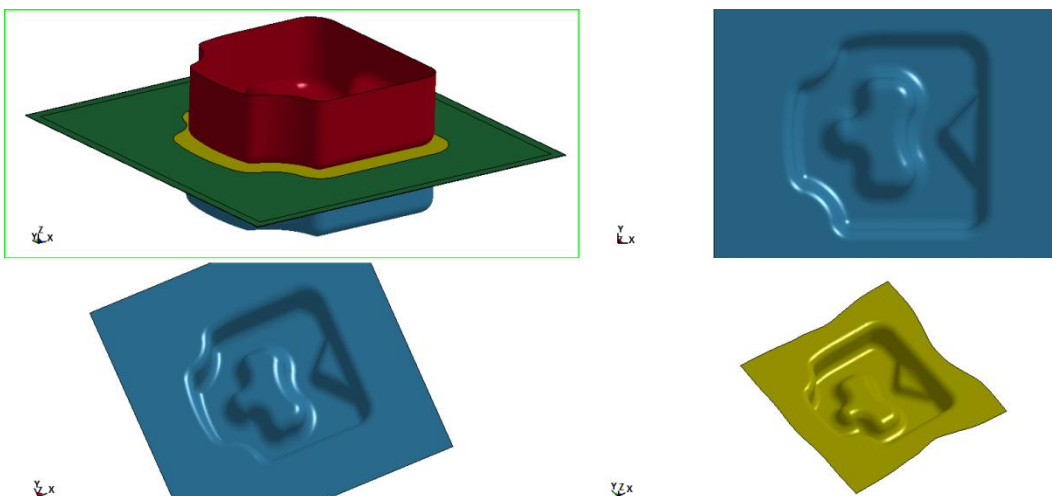
Det tribologiska systemet utvärderades genom BUT-försök (Bending-Under-Tension), se Figur 3. Försöket simulerar dragradien i en formningsoperation med aktuellt smörjmedel och verktygsmateriale, ett hårdförkromat segjärn.



Figur 3 Bilden till vänster visar schematiskt BUT-försök. Bilden till höger visar FE-modellen som användes för kalibrering. Den visar fyra fritt roterande verktyg som minskar oscillation under drag och tre olika böckningsradier som successivt kan växlas in vid kalibrering av friktionsmodell.

4.2.3 Enstegsverktyg

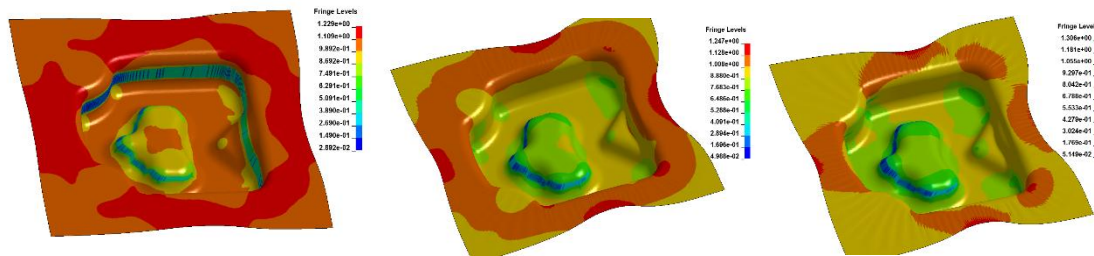
I en artikel av Oh et al² beskrivs en metod för att erhålla en formgränskurva i ett enda slag. Det här möjliggörs av ett verktyg har utformats så att flera distinkta töjningsvägar erhålls i olika delar verktyget. Tesen är att möjligheten till att erhålla en tillräckligt god approximation av formgränskurva för ett material utan att vara tvungen till det väsentligt mer tidskrävande arbete som erfordras för att på traditionellt sätt experimentellt erhålla en formgränskurva. Vidare så erbjuder verktyget en metod för att rangordna formbarheten för till synes liknande material, dvs material med samma varunamn tillverkade av olika leverantörer eller till och med samma materialbeteckning från samma leverantör men i olika varianter. För att verifiera verktygets funktionalitet så har en CAD-modell skapats och utifrån den har en finit element modell genererats. Uppsatsen ger inte en fullständig entydig beskrivning av geometrin, så den bästa möjliga bedömningen av det som fattats har gjorts. Fyra stycken olika stålqualiteter redovisas och för att verifiera modellen har dessa material använts i det här projektet för att verifiera modellen. Figur 4 visar geometrin hos verktyget samt ett resultat där enbart formen hos ämnet visas.



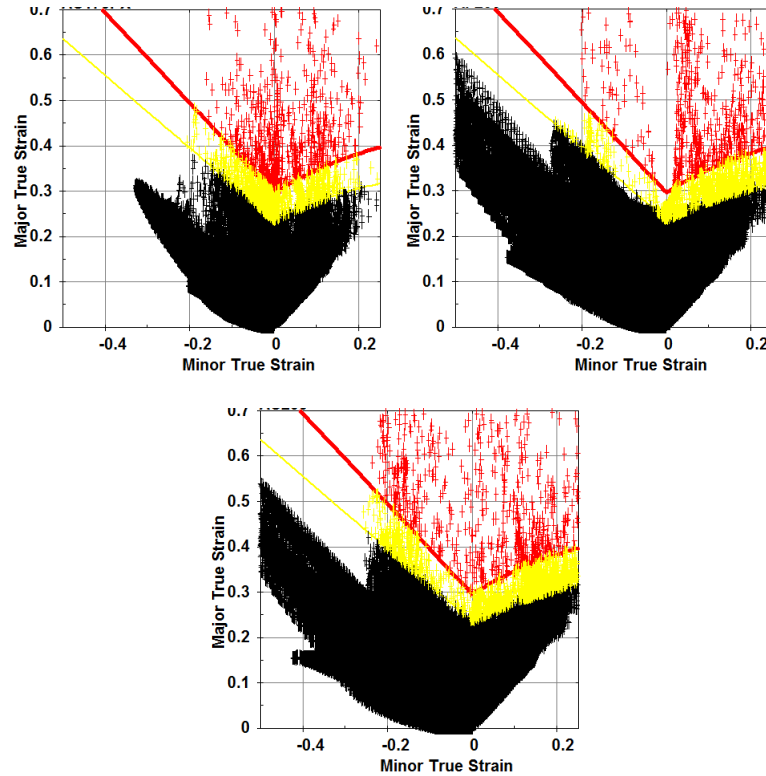
Figur 4 Enstegsverktygets geometri

De tre olika aluminiumlegeringarna som använts i projektet har också simulerats i verktyget. Ett flertal kombinationer av friktionskoefficienter och tillhållartryck har använts för att utvärdera aluminiumlegeringarnas egenskaper. Figur 5 visar tjockleksfördelningen hos de olika materialen vid i övrigt identiska förhållanden. Figur 6 visar motsvarande formgränsdiagram.

² K.S. Oh, K.S., Oh, K.W., Jang, J. H., Kim, D.J., Han, K.S., Design and analysis of new test method for evaluation of sheet metal formability, International Journal of Plasticity, Vol. 211, pp. 695-707 (2011)



Figur 5 Tjockleksfördelning hos de tre utvärderade legeringarna



Figur 6 Formgränsdiagram för de tre olika aluminiumlegeringarna

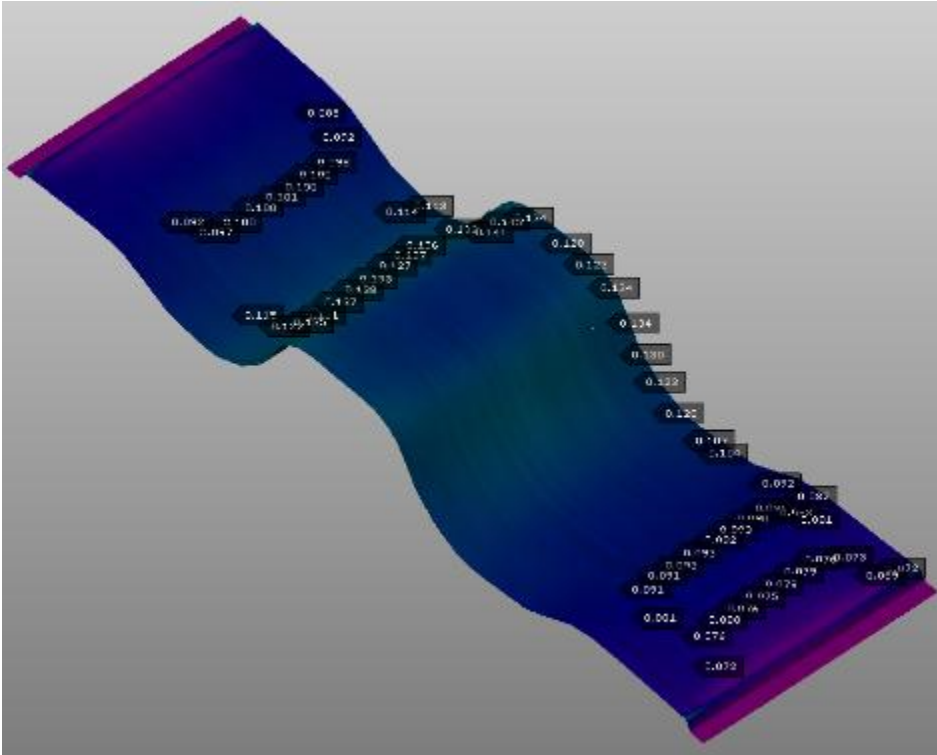
De olika aluminiumlegeringarna uppvisar väsentliga skillnader, i synnerhet för en av dem där väggtöjningen tidigt blir så stor att ”koppen” spricker i två delar, dessutom är töjningsfördelningen mer koncentrerad för det materialet. Formgränsdiagrammen mellan visar en töjningssignatur som indikerar att risken för ”failure” ger ett bredare spann för en av legeringarna. Det här tas som en intäkt för att verktygsgeometrin är känslig för små skillnader i materialegenskaper mellan olika material. En anpassning av verktygsgeometrin för aluminium är nödvändig så att fullt djup kan erhållas utan att materialen helt separerar som indikerats för en legering.

4.3 Robusta klipprocesser för aluminiumplåt

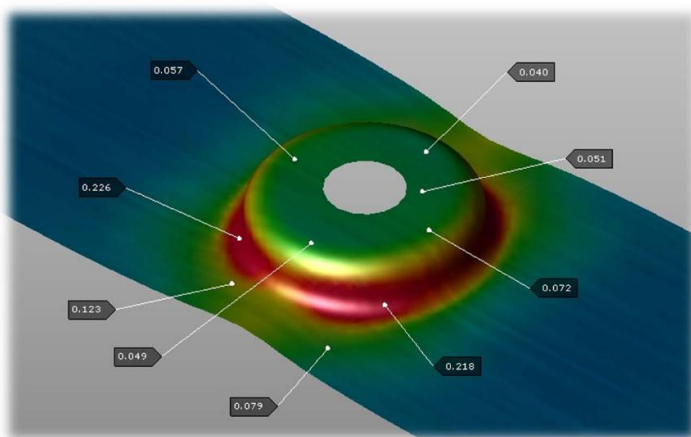
Bättre förståelse för mekanismerna vid flisbildning under klippning och stansning av aluminium behövdes för att på ett förutsägbart sätt kunna skapa robusta klipprocesser. Med syfte att kunna arbeta experimentellt med detta modifierades en befintlig

utvärderingsmetodik för att inkludera fler processparametrar och på så sätt bättre kunna efterlikna riktig produktion. Den tidigare metodiken hade visat sig inte ge resultat gällande bildning av flis, fnas och påkladdning på ett sätt som speglade riktig produktion på ett tillräckligt bra sätt.

Den största förändringen var att spänningar och töjningar infördes i detaljen som skulle klippas eller stansas. En töjningsnivå på 7-9 % efterstävades i de områden på plåten som skulle klippas. För att uppnå rätt nivåer användes simulering för både klippning och stansning. Se Figur 7 respektive Figur 8 nedan.

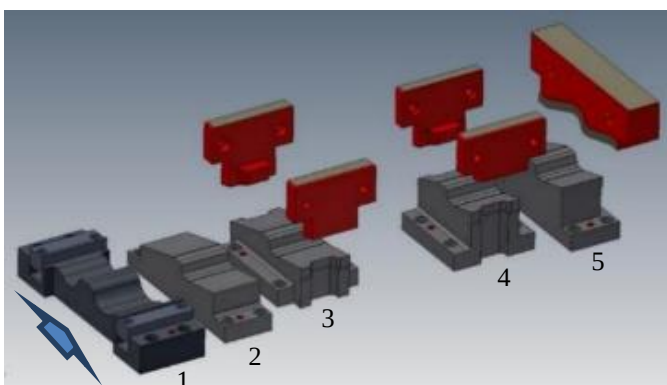


Figur 7 Simulerad töjningsbild för utfallet efter en av formningsstationerna före klippning

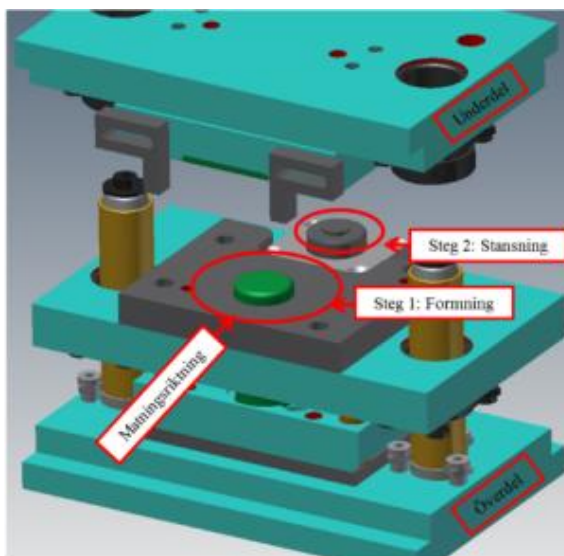
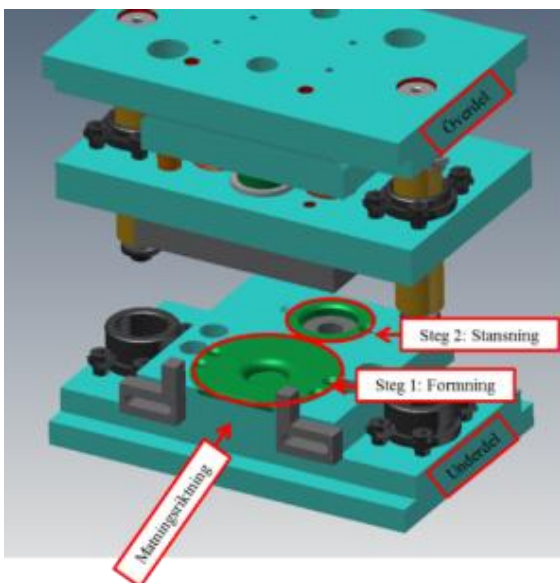


Figur 8 Simulerad töjningsbild för utfallet efter formningsstationen före stansning

Erfarenheter och resultat från tidigare genomförda industriella tester användes som en bas för den testmatris som togs fram. Både klippning i olika vinklar och stansning testades. Parametrar som varierades var t.ex. två olika typer av smörjmedel, två olika eggradier, tre nivåer på klippspel och tre typer av beläggning samt ingen beläggning. Se Figur 9 respektive Figur 10 nedan för schematiska illustrationer av klippverktyget och stansverktyget.



Figur 9 Schematisk layout av det semi industriella klippverktyget som har använts i projektet



Figur 10 Schematisk layout av det semi-industriella stansverktyget som har använts i projektet

5. Resultat

5.1 Bidrag till FFI-mål

Projektet har haft relevans för programmet genom att det syftar till att öka konkurrenskraften hos svenska fordonsleverantörer och OEM genom ökad effektivitet

vid högvolymproduktion av lättviktskomponenter. ALKOMP har strävat att bidra till **mål för 2015 inom FFI Hållbar produktionsteknik** genom följande projektmål:

- **Reducera utsläpp av fossilt CO₂ och övriga emissioner**
- **40 % högre produktivitet i tillverkningsberedning**
- **30 % lägre miljöpåverkan i tillverkningsprocesserna**
- **30 % högre produktivitet i produktionsprocesserna**

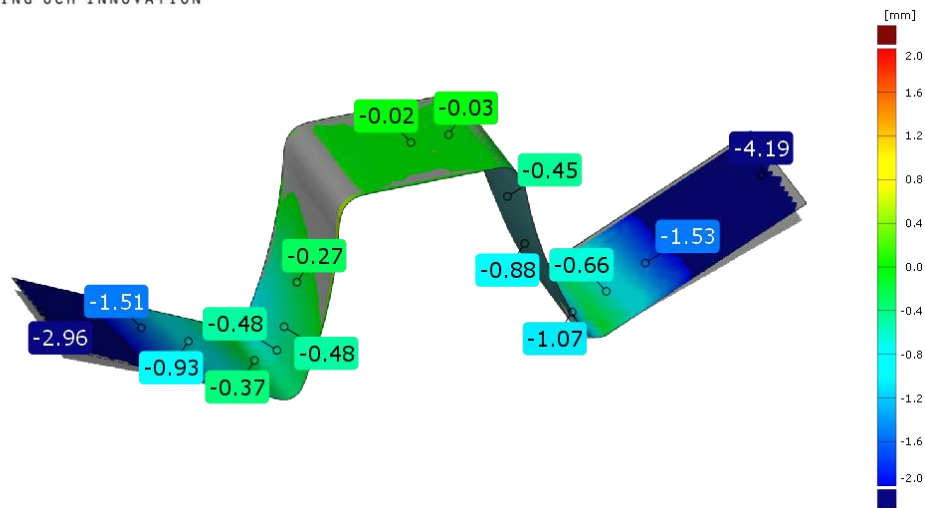
Ökad aluminiumanvändning i fordon ger lägre bränsleförbrukning genom viktnedskning i personbilar och lastbilar. Införande av aluminium i form av karosplåt på bred front kräver förbättrad noggrannhet vid FE-analys som projektet bidrar till genom material och friktionsmodellering. Förbättrad produktkvalitet med minskat spill och minskad kassation kan uppnås med förbättringar inom process- och produktberedning såväl som på klipp och stansområdet vilket projektet bidrar till. Att reducera spill och kassation ökar resursutnyttjandet vilket ger lägre miljöpåverkan. Minskad förbrukning av smörjolja vid formning och klippning kräver kunskap om tribologi och processer som tas fram i projektet. Målet att eliminera av minst en inprovningsloop ger sänkt startkostnad samt minskad ledtid för formnings- och klippverktyg. Produktiviteten förbättras med minskat behov av verktygsunderhåll på grund av mindre av flisbildning.

Projektets resultat i form av riktlinjer kan direkt eller indirekt komma till nytta för tillverkande företag även utanför projektgruppen. Erfarenheter och praxis kring materialkaraktärisering, materialmodellering och användning av mer avancerade friktionsmodeller tillsammans med hur de ska kalibreras kan gagna svensk industri framgent då de står inför behov att simulera formningsbeteende i samband med införandet av nya material. Vidare kan uppnådda resultat och identifierade utvecklingsmöjligheter på sikt leda till forskningsprojekt som ytterligare flyttar fram kunskapsfronten.

5.2 Materialdata och materialmodellering

5.2.1 Prediktering av återfjädring

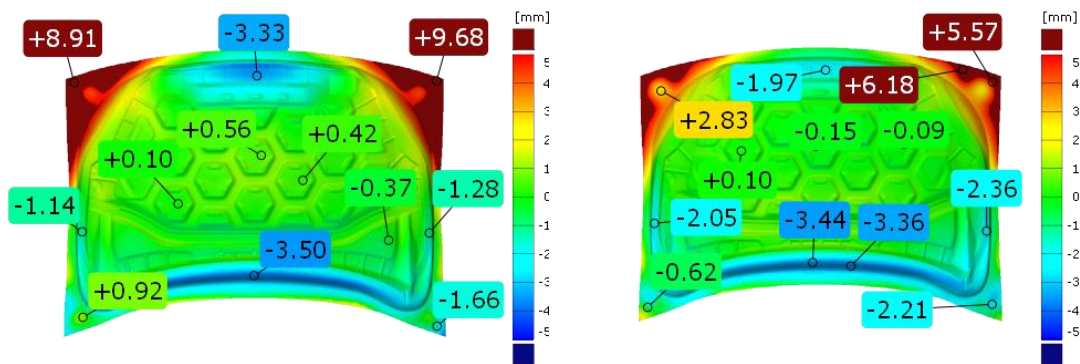
Återfjädring är ett stort problem vid pressning av aluminiumlegeringar. Trots att materialet är ganska mjukt så blir återfjädringen stor. Detta beror på den låga E-modulen, ca 65-70 GPa. Att noggrant prediktera återfjädringen med formningssimuleringar är därför mycket viktigt. I WP1 har provning av två olika aluminiumlegeringar genomförts i ett U-bock verktyg som finns på IUC i Olofström. I Figur 11 visas avvikelser mellan skannad geometri efter formning och resultatet från simulering för ett prov. I stora delar av detaljen är överensstämmelsen mycket god. Den stora avvikelsen på detaljens kanter beror på att det finns en liten avvikelse vid dragradien och denna ger en stor avvikelse ute på kanten.



Figur 11 Avvikelse mellan scannad geometri och resultat från simulering efter återfjädring.

5.2.2 Simulering av Huv Inre, Volvo XC60

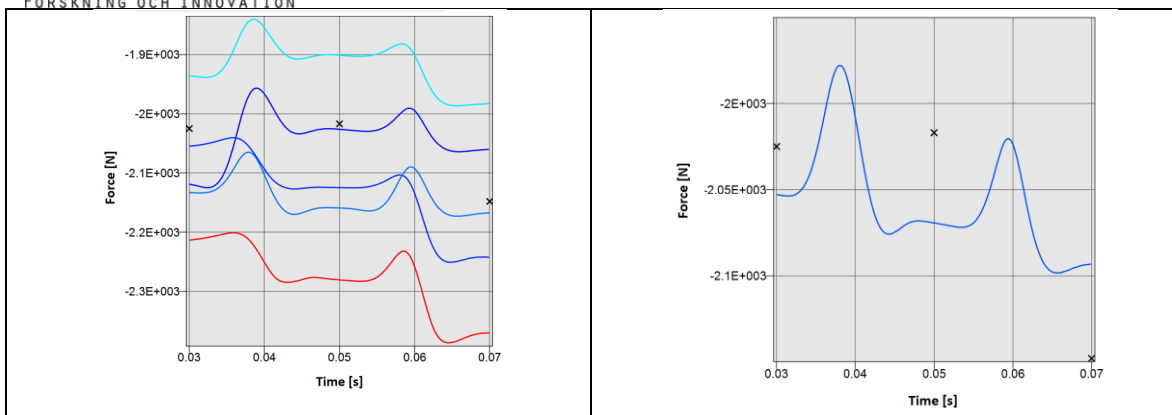
För slutlig verifiering av resultaten har även Huv Inre till den första versionen av Volvo XC60 simulerats med både Barlat 89' och BBC2005. En analys av töjningarna efter formningen visade på små skillnader men vad det gäller återfjädringen så var skillnaderna betydande i vissa områden, se Figur 12.



Figur 12 Återfjädring med Barlat '89 (vänster) och BBC2005 (höger).

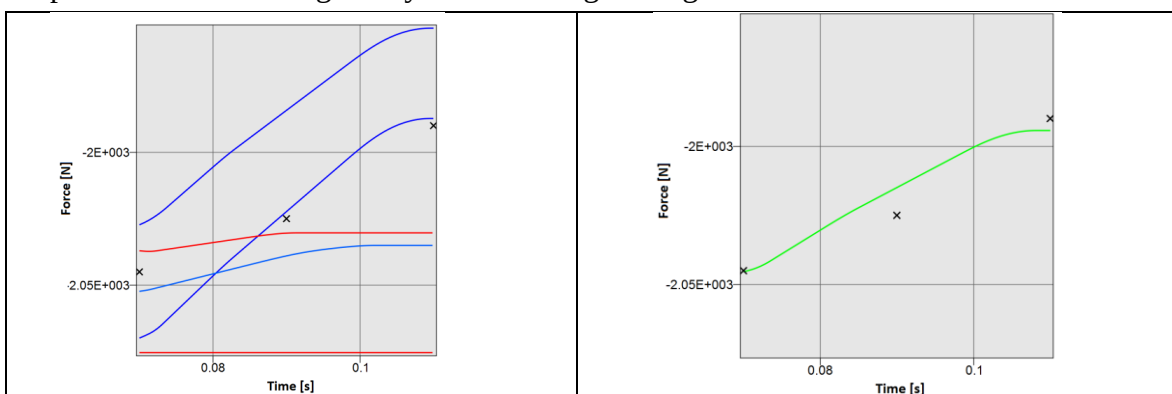
5.3 Kalibrering av friktionsmodell

Figur 13 visar olika utfall av kraftresponsen vid kalibrering av Shear-cap samt den optimerade lösningen. Resultatet visar tydligt att friktionsmodellen inte kan anpassas med önskvärd noggrannhet till det tribologiska systemet.



Figur 13 Bilden till vänster visar olika utfall av FE-simuleringar med variabel friktion (iteration 1). Kryssen representerar experimentella värden. Bilden till höger visar optimerad lösning av Shear-cap modellen.

Figur 14 visar olika utfall av kraftresponser vid kalibrering av Emmens samt den optimerade lösningen. Resultatet visar att modellen kan med acceptabel noggrannhet anpassas till det tribologiska systemet vid låga hastigheter.



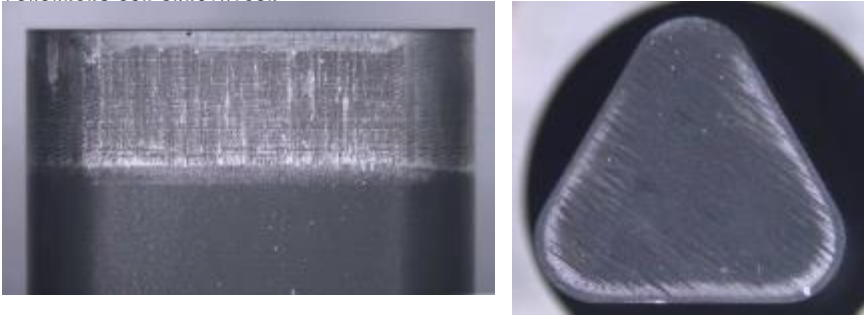
Figur 14 Bilden till vänster visar olika utfall av FE-simuleringar med variabel friktion (iteration 1). Kryssen representerar experimentella värden. Bilden till höger visar optimerad lösning av Emmens modell.

5.4 Robusta klipprocesser för aluminiumplåt

De genomförda testerna gav resultat gällande kvalitet på de klippta respektive stansade kanterna, bildning av flis och fnas samt påkladdning på klipp- och stansverktygen. Flera av de processparametrar som varierades hade påverkan på utfallen. Parametrar och faktorer som hade stor påverkan var exempelvis typ av beläggning, klippspel och hur bra stöd det var för den delen som klipptes bort.



Figur 15 Exempel på resultat gällande påkladdning på klippegg vid klippning av aluminiumplåt med klippspalt på 5, 10 eller 15 % av plåtens tjocklek



Figur 16 Exempel på resultat gällande påkladdning vid av aluminiumplåt



Figur 17 Exempel på resultat gällande bildande av flis och fnas vid klippning av aluminiumplåt med klippspalt på 5, 10 eller 15 % av plåtens tjocklek



Figur 18 Exempel på resultat gällande kvalitet på den klippta kanten vid stansning av aluminiumplåt. Man kan även se fnas som har bildats och smetats fast i slutet av blankzonen

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Framtagen kunskap och dokumentation kommer till användning internt på de medverkande företagen. Delar av projektet har och kommer att redovisats vid den årligen återkommande FFI konferensen. Sammanställningen från arbetspaket 3, Industriella Guidelines, kommer att publiceras inom nätverket Plåtforum genom nätverkets nyhetsblad.

6.2 Publikationer

Berglund, Johan; Kjellberg, Mikael; Liljengren, Magnus; Kjellsson, Kenneth; ,New Test Method for Detection and Analysis of Burrs and Slivers in Trimming and Punching

Aluminium Sheet Metal, Proceedings of the 6th International Swedish Production Symposium, Gothenburg 16-18 September, 2014.

Arbetet med att utvärdera och utveckla friktionsmodeller har resulterat i en artikel, "Evaluation of a first order friction model in deep drawing of aluminum sheet metals". Denna artikel kommer att skickas in till "7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes".

7. Slutsatser och fortsatt forskning

7.1 Slutsatser kring friktionsmodellering

Följande slutsatser har dragits kring modellering av friktion:

- Utvärderad friktionsmodell är korrekt implementerad, har full funktionalitet och är beräkningseffektiv.
- En metodik för att kalibrera första ordningens fysik har utvecklats och metodiken fungerar väl.
- Den utvärderade friktionsmodellen kan inte beskriva det aktuella tribologiska systemet.

Följande förändringar av friktionsmodellen är föreslagna:

- Kontaktdefinitionen bör baseras på Pullen & Williamsson³ i) vilket antar att volymen av deformerade toppar resulterar i samma volym av uppstigande dalar och ii) att andelen verklig kontaktarea ökar mindre än proportionellt med det nominella trycket, dvs. $P_{nom}/H = \alpha/(1-\alpha)$ där P_{nom} är det nominella trycket, H är hårdhet och α är verklig kontaktarea. Detta skulle skapa en betydligt bättre beskrivning av tryckberoendet.
- Inverkan av skjuvspänningar i smörjmedlet bör inkluderas. Detta kommer skapa en bättre beskrivning av hastighetsberoendet vid höga hastigheter.
- Inkludera en töjningsberoende hårdhet eftersom inverkan av töjning är betydande.

7.2 Slutsatser och framtida arbete för enstegsverktyget.

- Verktyget visar stor potential för formgränsbestämning i ett slag.
- Verktyget visar stor potential för rangordning av olika material med avseende på formbarhet
- Att erhålla så olika töjningsvägar i ett verktyg gör att studier av variabla friktionsmodeller förväntas ge mycket värdefull kunskap. Den kalibrering som gjorts för X-die och U-bend med en av aluminiumlegeringarna kommer att implementeras efter projektets avslutning.
- För att kunna balansera mellan djupdragning och sträckpressning på ett bättre sätt än vad som är möjlig med nuvarande geometri föreslås att verktyget kompletteras med anordningar för att kunna styra indraget av ämnet längs ämnesperiferin

³ Pullen, J. & Williamson, J.P.B. (1972). *On the plastic contact of rough surfaces*, Proc. R. Soc. London, Series A 327: 159-173.

- Att i kommande projekt kunna genomföra fysiska experiment med verktyget

7.3 Slutsatser och framtida arbete för Robusta klipprocesser för aluminiumplåt

Följande slutsatser har dragits efter det genomförda arbetet med robusta klipprocesser för aluminiumplåt:

- Hur bra plåthållningen är påverkar mängden flis och fnas som skapas vid klippning.
- Val av beläggning och ytornas råhet har tydlig påverkan på mängden påkladdning som uppstår.
- Klippvinkeln påverkar påkladdningen. En större negativ vinkel skapar mer påkladdning som är svårare att polera bort.
- Storlek på klippspalt påverkade påkladdningen i vissa fall och gradhöjd gällande stansning.
- Typ av smörjmedel har inte påverkat utfallet.

Följande frågeställningar kunde inte utredas inom projektet och kan vara förslag för fortsatt forskning:

- Hur ytornas råhet påverkar utfallet är inte helt utrett. Det var tydligt att råheten spelade roll, speciellt i kombination med val av beläggning.
- En begränsning i det experimentella förfarandet gällande klippning var att bara spänningar och töjningar i en riktning kunde inkluderas i testupplägget. Om spänningar och töjningar i flera riktningar kunde inkluderas skulle eventuellt den experimentella uppställningen bättre kunna representera produktionslika förhållanden.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

	Volvo Car Group Mats Sigvant msigvan1@volvocars.com Kenneth Kjellson kenneth.kjellsson@volvocars.com
	Swerea IVF, Daniel Wiklund Daniel.wiklund@swerea.se
	IUC/OSAS, Mikael Kjellberg mikael.kjellberg@iuc-olofstrom.se IUC/OSAS, Per Thilderkvist per.thilderkvist@iuc-olofstrom.se
	Högskolan Väst, Mats Larsson mats.larsson@hv.se
	Uddeholms AB, Berne Högman berne.hogman@uddeholm.se
	EBP AB, Magnus Ingesson magnus.ingesson@ebp.se
	Oerlikon Balzers Sandvik Coating AB, Susanna Wedefelt Lindgren susanna.lindgren@oerlikon.com
	Volvo GTO, Samuel Bäckström samuel.backstrom@volvo.com