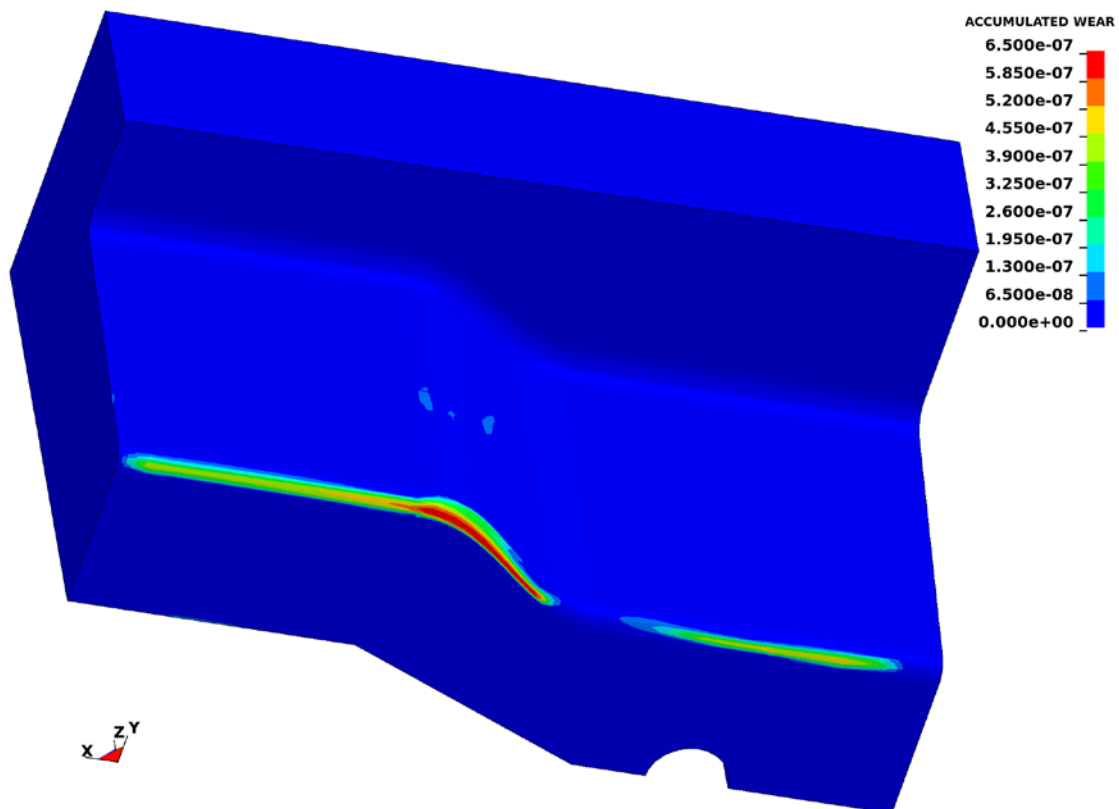


# Modellering av termo-mekaniska processer för förbättrad produktivitet och kvalitet

## *Prediktering av verktygsslitage*



Sergej Mozgovoy, Liang Deng och Mats Oldenburg  
2014-06-26  
Hållbar produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Syfte.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Genomförande.....</b>	<b>5</b>
4.1 Tribologiska studier .....	5
4.2 Grunddata för verktygsmodellen.....	7
4.3 Modellering av verktygsslitage baserat på laboratorieförsök.....	7
<b>5. Resultat .....</b>	<b>8</b>
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	8
5.2 Friktions- och nötningsbeteende .....	8
5.3 Numeriska simuleringar .....	11
<b>6. Spridning och publicering.....</b>	<b>13</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	13
6.2 Publikationer .....	13
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning.....</b>	<b>14</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner .....</b>	<b>14</b>

Omslagsbild: Ackumulerad slitage i metrar på en fjärdedel av den numeriska djupdragningsmodellen.

## 1. Sammanfattning

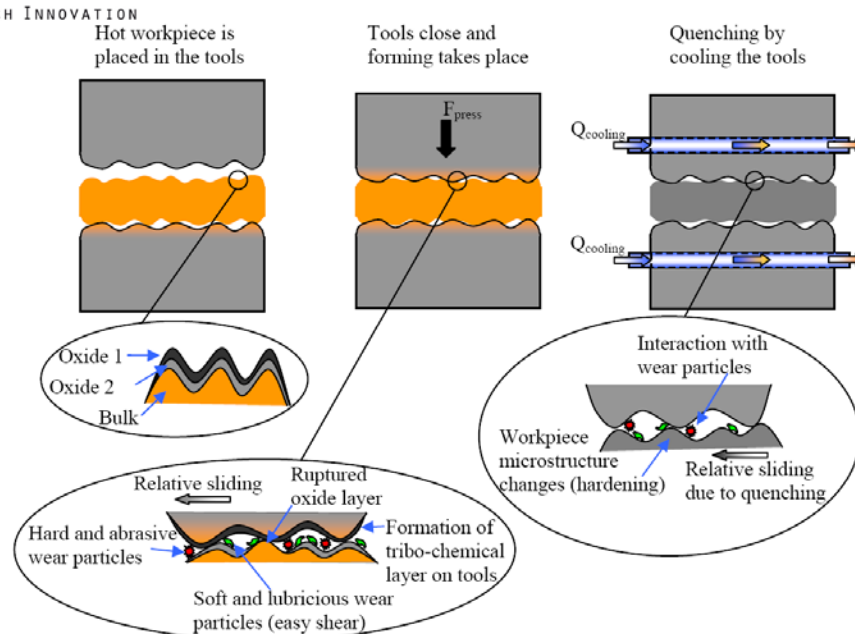
Prediktiva processmodeller för termomekaniska formningsprocesser som presshårdning har utvecklats i detta projekt. Tribologiska experiment som simulerar förhållandena vid presshårdning har utförts på obelagda och ytbehandlade verktygsstål som nöts mot obelagt och Al-Si-belagt 22MnB5-stål. Verktygsbeläggningar verkar avsevärt minska slitaget, men det krävs ytterligare analys av proverna för att bekräfta dessa resultat. Resultaten från oscillerande testuppställning med obelagt verktygsstål skilde sig markant från friktionsvärden som observerades i de simulerande högtemperaturtesterna på grund av skillnaden i experimentuppställning. De simulerande testerna representerar de villkor som råder i presshårdning på ett bättre sätt. Resultaten användes för att föreslå två modifierade Archard slitage-modeller där slitage-koefficienten fastställs som en funktion av temperatur, tryck och glidhastighet. De två verktygsslitagemodellerna har implementerats och använts i finit elementsimulering (FE).

FE simuleringar visade medelkontakttryck som överensstämmer mycket väl med mätresultat tagna från verkliga presshårdningsfall. Geometriuppdatering har också integrerats i FE-simuleringar för prediktion av verktygsslitage, då geometrin kommer att påverka kontaktförhållanden efter ett antal slag. Slitagedjup beräknade från de simulerande testerna var högre än de värden som baseras på oscillerande tester vilket innebär att slitagepredikteringen är känslig för valet av laboratorieexperiment.

Kombinationen av FE-simulering och simulerande tribologiska tester har skapat en unik plattform som snabbt och kostnadseffektivt kan bidra till att utveckla optimerade kombinationer av verktygsstål och plåtmaterial samt utformningen av ytbeläggningar för höga temperaturer. Detta stärker ställningen för den svenska industri som bedriver termomekaniska formningsprocesser såväl som de företag som utvecklar verktygsstål och ytmodifieringstekniker. Alla forskningsresultat har eller kommer inom kort att publiceras i konferensbidrag, tidskriftsartiklar och två licentiatavhandlingar.

## 2. Bakgrund

Presshårdning används vanligen i bilindustrin för tillverkning av komplext formade struktur- och säkerhetskomponenter från avancerade höghållfasta stål. Denna speciella typ av termomekanisk formningsprocess har uppfunnits och utvecklats i norra Sverige och kännetecknas av samtidig formning och hårdning av stålmaterial. Vid upphettning till formningstemperatur utsätts stålplåten för oxidering och komplexa oxidskikt formas. Ämnet överförs sedan till formningsverktyget och formas till önskad form när verktyget stängs som illustrerad i figur 1.



Figur 1: Schematisk bild av termoformningsprocess som visar hur de tribologiska förhållandena ändras under en processcykel

De extrema förhållandena vid termomekaniska formningsprocesser som de höga temperaturerna, förändringar i temperaturer på grund av kylningen av verktygen, fasomvandlingar, den repetitiva mekaniska belastningen och den relativa rörelsen mellan verktyg och plåt leder till stort slitage på formningsverktygen och minskar dess livslängd. Ett prediktivt tillvägagångssätt för analys av verktygsslitage behövs för att förlänga livslängden på verktygen.

Tidigare forskning vid Luleå tekniska universitet har fokuserat på prediktering av material- och processrespons samt det slutliga materialtillståndet och materialegenskaperna. För numeriska simuleringar av dessa processer, används finita elementsimuleringar (FE) som involverar stora deformationer samt termomekanisk koppling och modellering av friktion och värmeöverföring vid kontaktgränssnittet. De utvecklade metoderna har möjliggjort simuleringar av kompletta termomekaniska processer som presshårdning och de utvecklade modeller och metoder har implementerats i den kommersiella FE-koden LS-DYNA, som har en utbredd användning inom industrin för formnings- och krocksimuleringar

### 3. Syfte

Slitaget som förekommer i presshårdning förkortar livslängden på formningsverktygen. Därför är syftet med denna forskning att skapa en prediktiv modell för att med hög precision simulera termomekanisk formning som förorsakar verktygsförslitning, medföljande geometriförändringar och förkortad verktyglivslängd.

Förhållandena vid presshärtningsprocessen kan analyseras med hjälp av FE-simuleringar. Sedan kan motsvarande laboratorieförsöksprogram utvecklas. För att studera slitagebeteendet som förekommer på formningsverktygen under en presshärtningsprocess har ett ”dog-bone”-formad prototypverktyg designats för att bestämma de kritiska områdena för verktygsslitage och motsvarande storlek på slitaget. FE-simuleringarna kan prediktera förhållandena i formningsverktygen som alternativ till komplexa och dyra mätningar i produktionslinjerna. Dock kommer vissa numeriska variabler såsom nät-kvalitet, elementstorlek och penalty-parametervärden att till en del påverka resultaten.

## 4. Genomförande

De tvärvetenskapligt baserade forskningsresultaten har uppnåtts genom ett nära samarbete mellan avdelningarna för Material- och solidmekanik och Maskinelement vid Luleå tekniska universitet, leverantören av presshårdade produkter Gestamp Hardtech, leverantören av verktygsstål SSAB och ytbeläggningsföretagen Oerlikon Balzers Sandvik AB och Ionbond Sweden AB samt forskningsinstitutet Swerea Mefos.

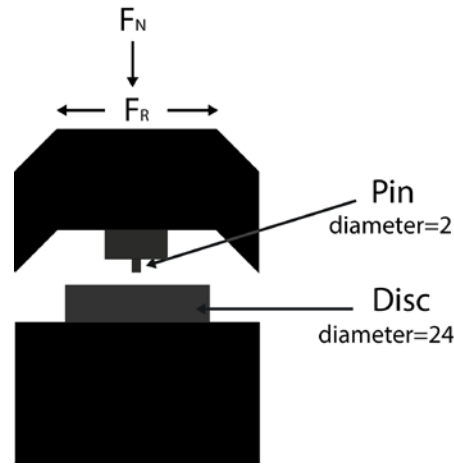
### 4.1 Tribologiska studier

För att studera beteendet hos bulkmaterialiet av verktyget har tribologiska studier vid förhöjda temperaturer utförts med användning av Optimol SRV som är en experimentell standarduppställning för oscillerande friktions- och nötingsexperiment vid höga temperaturer. I denna maskin oscillerar en elektromagnetisk drivet prov på ett stationärt nedre prov så som visas i figur 2. Det övre provet belastas mot det nedre provet med hjälp av en fjäderbelastning. Friktionskraften mäts med ett par piezoelektriska givare. En datoriserad datainsamling och kontrollsystem används för att styra, övervaka och mäta de olika parametrarna under testerna.

De testparametrar som används i denna studie är uppräknade i tabell 1. Testerna utfördes i syfte att erhålla stationära friktionsvärden vid olika temperaturer. Efter nedkylning vägdes proverna och förslitning av proverna bestämdes via viktminskningen.

Tabell 1: Testparametrar för de oscillerande hög-temperaturtesterna

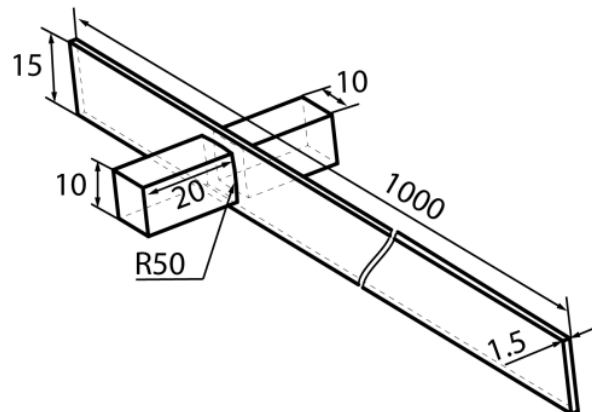
Testparameter	Värde
Last [N]	31
Tryck [MPa]	10
Temperatur [°C]	40, 200, 400, 600, 800
Frekvens [Hz]	25
Amplitud [mm]	4
Tid [min]	15
Atmosfär (1 atm)	luft



Figur 2: Experimentuppställning för oscillerande test; alla mått är i millimeter

FE-simuleringar användes för att identifiera de experimentella parametrar som ska användas i Ducom TR-20M-47 högttemperaturtribometern. Testparametrar inklusive verktygs- och plåttemperaturer var baserade på FE-simuleringar för att säkerställa sådana förhållanden så att de förslitningsmekanismer som uppstår under presshårdning erhålls i testerna. Särskild vikt har lagts vid att utveckla temperatur- och tryckberoende förslitningsmekanismkartor då verktygets livslängd är mycket beroende av den dominerande nötningstypen.

Den grundläggande konfigurationen av den simulerande högttemperaturtribometern visas i figur 3 och involverar ett par verktygspinnar som lastats mot plåtremsans yta (en från varje sida) och därefter glider längs remsan. För att möjliggöra långa glidavstånd och därmed att framkalla snabbare slitageförlopp på verktygsstålsproven, matar en automatiserad plock-och placeringsmekanism in nya remsor från ett fack som innehåller 10 remsor. Detta medför att total glidlängd på 5,5 meter kan uppnås och medför att man kan erhålla mätbart slitage på verktygsstålet.

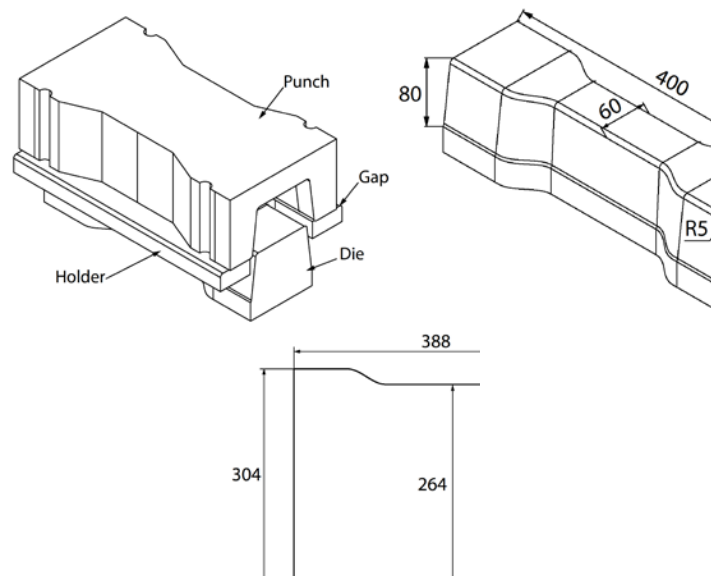


Figur 3: Experimentuppställning för simulerande test; alla mått är i millimeter

De använda kontaktrycken, glidhastigheterna och verktygstemperaturerna var baserade på medelvärden av resultaten från en förenklad modell av en smal del av ”dog-bone”-verktyget eller en kvartsmodell av samma verktyg. Verktygsbeläggningar användes på förslag av företagen som levererar ytbeläggningar.

## 4.2 Grunddata för verktygsmodellen

Som tidigare nämnts, var den numeriska modellen baserad på en fjärdedel av hela presshärdningsverktyget (dimensioner kan hittas i figur 4) och utvecklad för LS-DYNA. Gapet mellan hållare och det övre verktyget var vid 2 mm, 3 mm eller 4,6 mm tills det övre verktyget flyttas till sin slutliga läget, då hållaren trycks mot plåten med en belastning på 100 000 N. Alternativt användes ingen plåthållare. Plåten med tjocklek 1.6 mm är modellerad med rektangulära skalelement med Belyschko-Tsay-formulering med en storlek av 2 mm och verktygen modellerades med åtta-nods solidelement med stelt material. För att minska antalet element, modellerades verktyget med gradvis större elementstorlek i djupled från 1 mm till 8 mm och med 5 mm från verktygsytan. Materialmodellen "MAT\_UHS\_STEEL", en termo-elastisk-plastisk konstitutiv modell som utvecklats av Åkerström, Bergman och Oldenburg vid Luleå tekniska universitet, användes för att modellera plåtmaterialet vid analyserna.



Figur 4: Geometriska data för verktyg och plåtämne, alla mått är i millimeter.

## 4.3 Modellering av verktygsslitage baserat på laborieförsök

Två prediktiva slitagemodeller avsedda för ackumulerat glidande slitage mellan borstål och verktygsstål användes i FE-simuleringar för att förutsäga slitagedjup vid

presshårdning och båda modellerna tar hänsyn till den höga temperaturens effekt på verktygsslitaget. Den första slitagemodellen bygger på Archard nötningsmodell och dess slitagekoefficient kalibrerades genom de oscillerande testerna som utfördes vid förhöjda temperaturer (se figur 2) med de testparametrar som finns i tabell 1. Relationen mellan slitagedjup och förhållandena vid termer av trycket och glidhastighet bestämdes genom att använda följande ekvation:

$$d = \frac{V}{A} = K \frac{W}{H} \frac{1}{A} L = \int K(T) P v dt \quad (3)$$

där V är den nedslitna volymen, L är glidsträckan, A är kontaktarean, W lasten korrigerad mot H som är det mjukare materialets hårdhet, P är trycket, och v är glidhastigheten.

Den andra slitagemodellen erhöles från simulerande tester utförda vid en konstant hög temperatur hos remsorna med varierande tryck och hastighet (se figur 3), där nötningshastigheten antas ha ett bilinjärt förhållande till tryck och hastighet (se ekvation 2). De varierande tryck (15,9 och 47,7 MPa) och hastigheterna (0,01 och 0,1 m/s) som används i simulerande testerna baseras på FE-simulering av presshårdning och avser att få experimenten att efterlikna förhållandena vid presshårdning. Dessa fyra kombinationer av tryck och hastighet bestämde förhållandet mellan nötningsdjup och kontaktbetingelserna. Nötningsdjup beräknades enligt följande ekvation:

$$d = \int \dot{w}(P, v) v dt \quad (4)$$

där  $\dot{w}$  är nötningshastigheten, P är trycket, och v är glidhastigheten. Möjlighet att anpassa verktygsgeometrin till det predikterade slitage har implementerats i slitagemodellen. Med denna strategi kan de förändrade förhållandena under progressiv slitage beaktas vid predikteringen av verktygens livslängd.

## 5. Resultat

### 5.1 Bidrag till FFI-mål

Ett av programmets mål är att reducera alla förluster vid tillverkningsberedning och att reducera tillverkningsprocessernas miljöpåverkan. Detta projekt har ökat kunskapen inom området för virtuell tillverkningsberedning vilket skapat förutsättning för att utföra mer noggranna formlingsanalyser. Detta reducerar kostnaden och framförallt tiden för utveckling av nya presshårdade komponenter till fordonsindustrin.

### 5.2 Friktions- och nötningsbeteende

I de oscillerande testerna nådde friktionskoefficienten ett värde på 1.34 i det stationära tillståndet vid 40 °C som visas i Figur 5. Denna ökning i friktionskoefficienten vid 40 °C var ett resultat av den kontinuerliga borttagningen av det naturliga oxidskiktet vilket



förde med sig förekomsten av kontakt mellan metall och metall och formändringen eller borttagningen av ytasperiteter vilket ledde till en större reella kontaktyta. Uppträdandet av kontakten mellan metall mot metall bekräftades ytterligare genom kännetecknen på adhesivt slitage på de slitna ytorna av disken som visas i Figur 6. Dessutom visade de tester som utfördes vid 40 °C variationer i friktionskoefficienten på grund av plöjning. Denna typ av svår adhesion ledde till lokal sammansmältning mellan de två gnidande ytorna. Därför ökade friktionskoefficienten, vilket ses som stigande toppar i Figur 5, tills ett fragment av vidhäftat material fastnade i sitt plöjningsspår och lossnade från ytan vilket ledde till en minskning av friktionen.

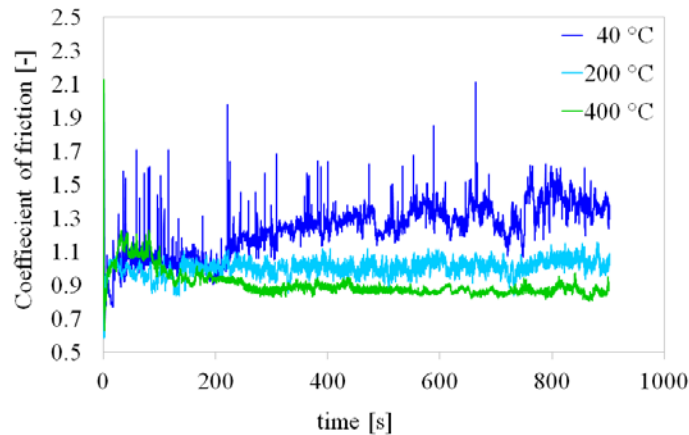


Figure 5: Friktionskoefficient som funktion av tid vid 40 °C, 200 °C and 400 °C uppmätta i oscillerande tester

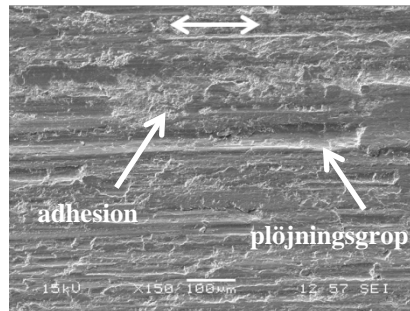
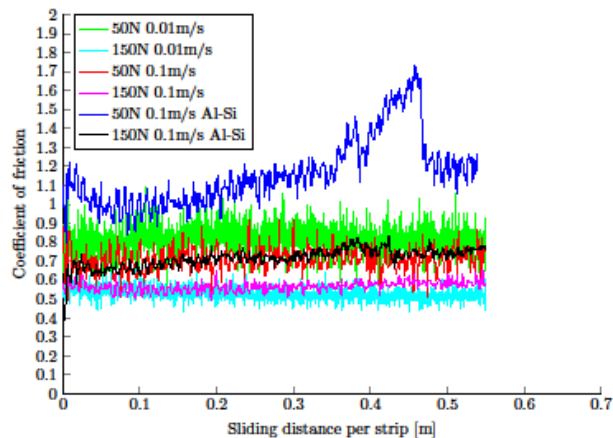


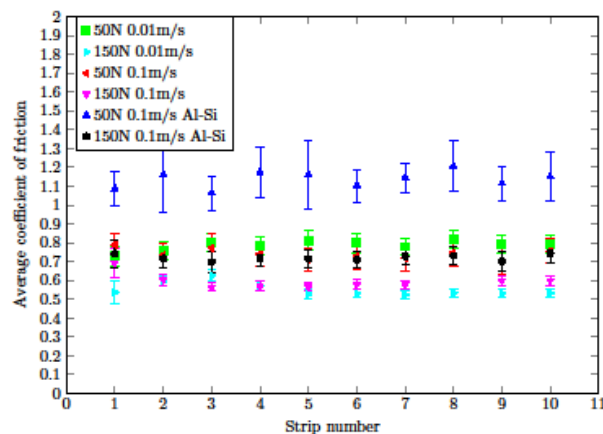
Figure 6: SEM bild av verktygsstålskiva efter experiment vid 40 °C; dubbelpilen markerar glidriktningarna.

De simulerande testerna utfördes på Ducom TR-20M-47 högtemperaturtribometern. Testparametrarna inklusive verktygets och arbetsstyckets temperaturer var baserade på FE simuleringar. Figur 7 visar friktionskoefficienten som funktion av glidavståndet som erhöles för obelagda verktygspinnar som gled mot obelagda och Al-Si belagda borstålsremсор. Det kan ses att en högre belastning ledde till en lägre och mer stabil friktionskoefficient oberoende av tillämpade glidhastigheter eller material. I figur 8 visas den genomsnittliga friktionskoefficienten av obelagda verktygsprov som gled mot

obelagda och Al-Si-belagda borstårsremor under olika belastningar och glidhastigheter en utmärkt reproducerbarhet av resultaten.



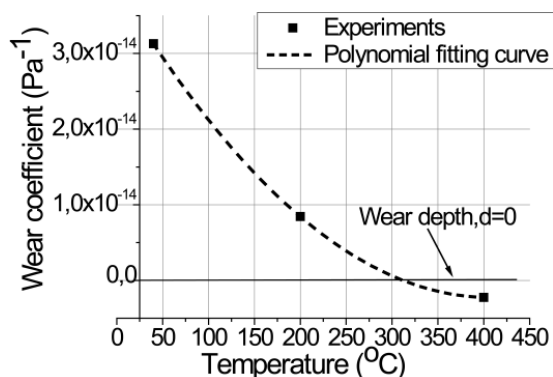
Figur 7: Friktionskoefficient som funktion av glidsträcka för obelagda verktyg.



Figur 8: Genomsnittlig friktionskoefficient för obelagda verktygsprov som nöts mot obelagt respektive Al-Si belagt borstål vid olika laster och glidhastigheter.

Tribologiska studier har också utförts på ytbehandlade/belagda verktygsprov som gled mot obelagt och Al-Si-belagt 22MnB5 stål i syfte att utforska potentialen för ytbeläggningsteknik att kontrollera friktionen och minimera slitage vid förhöjda temperaturer.

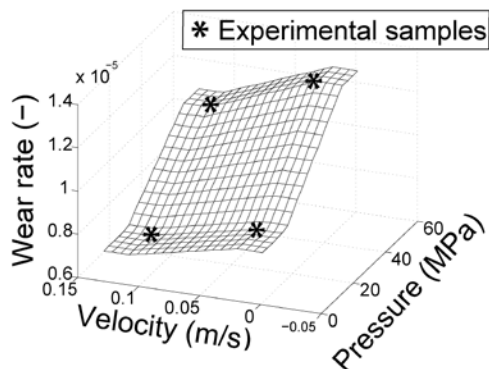
Som tidigare nämnts erhöles de specifika slitage takterna i de oscillerande tester som normaliserades till den skenbara kontaktytan i denna specifika provuppställning (se figur 2) och den resulterande nötningskoefficienten representerade förslitningsbeteendet i detta slitagemodell vid temperaturer på 40 °C, 200 °C och 400 °C. Figur 9 visar nötningskoefficienten som en funktion av temperaturen och den uppvisade ett proportionellt förhållande mellan slitagedjupet och de kontakttillstånden gällande tryck och glidhastighet.



Figur 9: Slitagekoefficient kalibrerad från oscillerande tester.

Som nämnts i föregående kapitel utfördes de simulerande tribologiska tester på Ducom TR-20-47 högttemperaturtribometern. Obelagda verktyg kördes mot tio sekventiellt testade, obelagda och Al-Si-belagda 22MnB5-remsor.

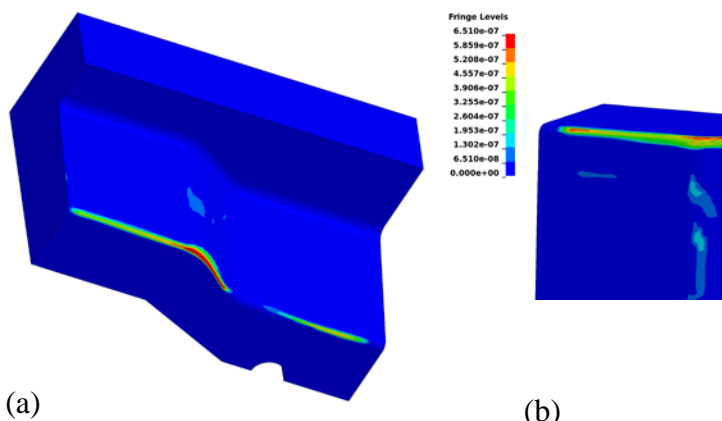
Den andra slitagemodellen erhöles från dessa simulerande tester, se figur 10. Emellertid skilde sig dessa resultat markant från friktionskoefficienter som observerades i de oscillerande testerna på grund av skillnaden i den experimentella uppställningen eftersom de simulerande testerna är utformade för att efterlikna förhållandena i den verkliga applikationen. Nötningen skulle vanligtvis vara högre i de oscillerande glidtesterna på grund av mycket strängare kontaktförhållanden som förekommer i dessa typer av experiment.



Figur 10: Nötningshastighet kalibrerad från simulerande tribologiska försök.

### 5.3 Numeriska simuleringar

Figur 11 visar fördelningen av förslitningsdjupet, där modellen kalibrerades med hjälp av de simulerande, tribologiska testerna. Det noterades att slitage huvudsakligen koncentrerades på radien hos formningsverktygen och den laterala ytan på övergångsdelen upplevde även nötning under dragningsprocessen.



(a) (b)  
 Figur 11: Fördelning av slitagedjup i meter på verktyg med hållargap på 4.6mm efter ett slag: (a) övre verktyg; (b) nedre verktyg

Tabell 2 visar resultaten från slitageanalyserna med olika plåthållaravstånd. TW betyder förslitningsdjupet i m kalibrerad med tribologiska tester och RW indikerar det kalibrerad med de oscillerande testerna. Uppenbarligen, max, mean och SD är substitutioner för maximal, medelvärde och standardavvikelse, respektive.

Tabell 2: Slitagedjup på formningsverktyg med olika plåthållaravstånd.

	TW, max	TW, mean	TW, SD	RW, max	RW, mean	RW, SD
G inf, U	6.5e-7	1.1e-7	1.5e-7	5.7e-8	6.3e-9	1.0e-8
G4.6, U	6.5e-7	1.3e-7	1.5e-7	6.0e-8	6.7e-9	9.2e-9
G3, U	6.5e-7	1.4e-7	1.5e-7	4.8e-8	7.2e-9	9.0e-9
G2, U	6.7e-7	1.5e-7	1.6e-7	5.4e-8	6.7e-9	8.9e-9
G inf, L	3.2e-8	4.7e-9	5.0e-9	2.2e-9	1.9e-10	2.7e-10
G4.6, L	2.8e-8	6.1e-9	4.9e-9	5.7e-9	2.3e-10	2.5e-10
G3, L	3.8e-8	9.0e-9	7.4e-9	4.8e-9	3.5e-10	3.6e-10
G2, L	2.6e-8	4.5e-9	3.7e-9	1.9e-9	1.7e-10	1.9e-10

Tabell 2 visar att slitagedjupet som beräknades med hjälp av RW slitagemodellen var en storleksordning mindre än de värden från TW slitagemodellen eftersom disken gjord av verktygsmaterial i de oscillerande testerna värmdes upp från basen och dess glidyta var förmodligen hårdare än de uppvärmda remsor som användes i de simulerande tribologiska testerna. Dessutom var slitagedjupet i det övre verktyget, baserat på både slitagemodellerna, högre än värdena i det lägre verktyget, vilket observerades att motsvara gliddistansen. Generellt ledde modellen med mindre gap till mer slitagedjup men det nedre verktyget med ett gap på 2 mm var ett undantag.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Resultaten av detta forskningsprojekt har spridits genom presentation vid flera internationella konferenser och har publicerats eller kommer att publiceras som tidskriftsartiklar och licentiatavhandlingar. Avdelningen för material- och solidmekanik vid Luleå tekniska universitet haft ett långt och framgångsrikt samarbete med Gestamp Hardtech AB inom modellering och simulering av presshärdning. Denna forskning har lett till möjligheten att ytterligare utveckla, förbättra och utvärdera materialmodeller och analysmetoder för numeriska simuleringar av presshärdningsprocessen och att inkludera prediktering av verktygsslitage i process- och produktutvecklingen.

En komplett termomekanisk materialmodell för simulering av presshärdning och liknande processer har implementerats i den kommersiella FE-koden LS-DYNA och används bland andra av Gestamp Hardtech AB i dess produktutvecklingsprocess för design av komponenter och formningsverktyg. Även slitagemodellerna har implementerats i LS-DYNA, än så länge genom "user defined" kod.

### 6.2 Publikationer

L. Deng, S. Mozgovoy, J. Hardell, B. Prakash and M. Oldenburg, Implementation of wear models for stamping tools under press hardening conditions based on laboratory tests, 1st International Conference on Hot Stamping of UHSS: August 21 – 24, 2014, Chongqing, China.

L. Deng, S. Mozgovoy, J. Hardell, B. Prakash and M. Oldenburg, Simulation of tool wear in press hardening, 11th World Congress on Computational Mechanics: July 20 – 25, 2014, Barcelona, Spain.

S. Mozgovoy, J. Hardell, L. Deng, M. Oldenburg and B. Prakash, Effect of temperature on friction and wear of prehardened tool steel during sliding against 22MnB5 steel, Tribology, 2014, 8, 65 – 73.

L. Deng, S. Mozgovoy, J. Hardell, B. Prakash and M. Oldenburg, Press-hardening thermo-mechanical conditions in the contact between blank and tool, 4th International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel CHS2: June 9 – 12, 2013, Luleå, Sweden.

S. Mozgovoy, J. Hardell, L. Deng, M. Oldenburg and B. Prakash, Effect of temperature on friction and wear of prehardened tool steel during sliding against 22MnB5 steel, 3rd International Tribology Symposium of IFToMM (ITS): March 19 – 21, 2013, Luleå, Sweden.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

Tribologiska studier genomfördes på obelagda och ytbehandlade/belagda verktygspinnar glidande mot obelagt och Al- Si-belagt 22MnB5-stål i syfte att utforska potentialen i ytförbättringar för att kontrollera friktionen och minimera slitage vid förhöjda temperaturer. Fördelen med verktygsbeläggningar verkar vara en betydande minskning av slitage, men det krävs ytterligare analys av proverna för att bekräfta detta för varje specifik beläggning. Resultaten för obelagda verktyg skilde sig markant med avseende på friktionsvärden som observerats i de oscillerande testerna på grund av skillnaden i experimentuppställning respektive de simulerande testerna där man efterliknar förhållandena i den verkliga processen. De simulerande testerna uppvisade en lägre friktionskoefficient på grund av mindre aggressiva förhållanden i kontakten och en reducerad förekomst av vidhäftning på grund av ett oxidskikt på plåtämnet. Nötningen var lägre i de oscillerande testerna på grund av lägre verktygstemperaturer som förekommer i dessa typer av experiment.

Kombinationen av FE-simulering och simulerande tribologiska tester har skapat en unik plattform som snabbt och kostnadseffektivt kan användas vid optimering av kombinationer av verktygsstål/plåtämne samt utformningen av ytbeläggningar för höga temperaturer.

När det gäller beläggningar för varmformningsverktyg är det allmänt känt att effekten av verktygsbeläggningar inte är tillfredsställande utredd i vid presshårdning. Leverantörer av ytbeläggningar som Oerlikon Balzers Sandvik AB eller Ionbond Sweden AB behöver utvärdera nyutvecklade eller modifierade och förbättrade beläggningar för presshårdning. Leverantörer av verktygsstål som SSAB behöver också ytterligare utvärdera existerande eller nyutvecklade verktygsmaterial. Resultat bör genereras i syfte att öka kunskapen om det tribologiska beteende som gäller i varmformningsprocesser.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner



Gestamp HardTech  
Box 828  
Ektjärnsvägen 5  
SE-971 25 Luleå  
Sweden  
Greger Bergman, Ph.D.  
gbergman@se.gestamp.com



Ionbond Sweden AB  
Peter Hydén  
Svedengatan2F  
SE – 58273 Linköping  
Tel: +46 13 25 33 07  
Fax: +46 13 25 33 23  
Cellular: +46 70 626 68 69  
peter.hyden@ionbond.com

# FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION



Luleå University of Technology  
Department of Engineering Sciences and  
Mathematics

Division of Mechanics of Solid Materials  
Professor Mats Oldenburg, Ph.D.  
Tel: +46 920 49 17 52  
mats.oldenburg@ltu.se

Division of Machine Elements  
Professor Braham Prakash, Ph.D.  
Tel: + 46 920 49 30 55  
braham.prakash@ltu.se

**oerlikon**  
balzers

Oerlikon Balzers Sandvik Coating AB  
Bertil Angebrand  
Kamomillvägen 28  
S – 725 91 Västerås

Tel: +46 21 33 04 45  
Fax: +46 21 33 08 89  
Cellular: +46 70 580 75 50  
bertil.angebrand@oerlikon.com

# SSAB

SSAB  
Product Manager, Tooling & Protection

Per Hansson, Ph.D.  
SE-613 80 Oxelösund

Tel: +46 155 254 632  
Fax: +46 155 255 534  
Cellular: +46 70 208 63 81  
phansson@ssab.com

**swerea** | **MEFOS**

Swerea MEFOS AB  
Box 812  
SE-971 25 Luleå, Sweden  
Head of research, Heating and Metalworking  
Department  
Göran Berglund

Phone +46 (0)920 20 19 00  
Fax +46 (0)920 25 50 59  
goran.berglund@mefos.se

# FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Adress: FFI/VINNOVA, 101 58 STOCKHOLM  
Besöksadress: VINNOVA, Mäster Samuelsgatan 56, 101 58 STOCKHOLM  
Telefon: 08 - 473 30 00  
ivss@vv.se  
[www.ivss.se](http://www.ivss.se)