

# FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

## Förbättrad fjäderprestanda - Mekaniska fjädrar av amorft stål



Författare: Mattias Unosson

Datum: 2015-01-28

Delprogram: Fordonsutveckling

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>4</b>
2.1	Mekaniska fjädrar	4
2.2	Amorfa metaller	4
<b>3</b>	<b>Syfte</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Genomförande</b>	<b>7</b>
4.1	Tillverkningsprocesser	7
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>8</b>
5.1	EBM-baserad additiv tillverkning av amorfa järnlegeringar	8
5.2	DMLS-baserad additiv tillverkning av amorfa järnlegeringar	9
5.3	Resultatkommentar – amorf metall	10
5.4	Numeriska simuleringar - Optimering av fjädergeometri	10
5.5	Prototyper - Titan	11
5.6	Bidrag till FFI-mål	13
<b>6</b>	<b>Spridning och publicering</b>	<b>13</b>
6.1	Kunskaps- och resultatspridning	13
6.2	Publikationer	13
<b>7</b>	<b>Slutsatser och fortsatt forskning</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Deltagande parter och kontaktpersoner</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>Referenser</b>	<b>15</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

Syftet med projektet var att utveckla lättare fjädergeometrier med bibehållen eller förbättrad prestanda. Mekaniska fjädrar är en viktig del i många olika komponenter i moderna högpresterande fordon och de används bland annat i stötdämpare och i flera olika typer av ventilstyrningar. Fjädrarnas prestanda påverkar både komfort, driftsäkerhet, driftsekonomi och delar i fordonets säkerhetssystem. I många tillämpningar är det viktigt av minimera fjäderns massa inte bara för att fordonets totala vikt minskas utan också för att fjäderns responstid är beroende av dess vikt. En lätt fjäder reagerar snabbare än en tung fjäder och de dynamiska egenskaperna kan således förbättras genom att fjäderns massa minskas.

I detta projekt har viktoptimerade mekaniska fjädrar framställts med hjälp av additiv tillverkning (AM, Additive Manufacturing). Dessa nya geometrier är svåra att tillverka med konventionella metoder medan det däremot är relativt lätt att göra det med additiv tillverkning. Användandet av additiv tillverkning innebär också att det är möjligt att kontrollera strukturen och därmed materialegenskaperna i alla delar av komponenten på ett annat sätt än med konventionella metoder. Detta är möjligt eftersom komponenten byggs bit för bit i takt med att nytt pulver tillsätts och smälts samman med underliggande strukturer. Tillverkningsmetoden leder också till att kylhastigheten efter smältningen av pulvret blir så hög att det är möjligt att bygga amorfa strukturer. Metaller med amorf struktur har mycket goda mekaniska egenskaper, både hög hållfasthet och hög elasticitet vilket leder till en hög förmåga att lagra elastisk energi. I detta projekt var syftet att med hjälp av både en ny geometri och ett nytt material dramatiskt minska vikten och öka den dynamiska prestandan hos mekaniska fjädrar.

Projektet har visat att det går att framställa amorfa järnbaserade metaller i bulkstorlek med hjälp av additiv tillverkning och detta har uppmärksammats både i ett pressmeddelande från Exmet och Mittuniversitetet samt i en artikel i Ny teknik 2012. Vidare har både laserbaserade- och elektronstrålebaserade AM-metoder använts och genom att ändra processparametrarna kan förhållandet mellan amorf och kristallin struktur påverkas. De provbitar som framställts inom ramen för projektet har dock haft en relativt stor andel porer eller mikrosprickor och de tillgängliga resurserna i projektet har begränsat möjligheten att fortsätta med processoptimeringen för detta nya material. För att kunna nå delmålet att framställa mekaniska fjädrar med lägre vikt och bättre dynamisk prestanda användes istället en kristallin titanlegering. Med hjälp av olika beräkningsverktyg optimerades en fjädergeometri för tillämpning i tävlingscyklar och ihåliga titanfjädrar framställdes med AM-teknik. De nya fjädrarna har en vikt på ca 25% jämfört med motsvarande konventionella fjädrar. De nya fjädrarna undersöktes i olika kontrollerade utmattningsprov men de användes också i stötdämpare som monterades på en tävlingscykel och testades på provbanor. Resultatet var mycket positivt och det är troligt att dessa fjädrar kommer att vidareutvecklas och introduceras på marknaden för högpresterande tävlingscyklar.

## 2 Bakgrund

Syftet med detta projekt var att med hjälp av AM tillverka optimerade mekaniska fjädrar av amorft stål med målet att dramatiskt minska vikten. Additiv tillverkning möjliggör dels att nya, optimerade fjädergeometrier kan framställas som med bibehållen prestanda väsentligt minskar fjäderns vikt. De nya geometrierna är svåra att tillverka med konventionella metoder, men kan förhållandevis lätt realiserats med hjälp av AM. I ett nästa steg var syftet att ytterligare förbättra fjäderprestandan genom att tillverka fjädern av amorft stål istället för att använda kristallina material. Detta kommer att leda till en dramatisk reducering av fjäderns vikt och en väsentligt förbättrad dynamisk fjäderprestanda. I det följande ges en kort beskrivning av mekaniska fjädrar, amorfa metaller och deras egenskaper och tillämpningar.

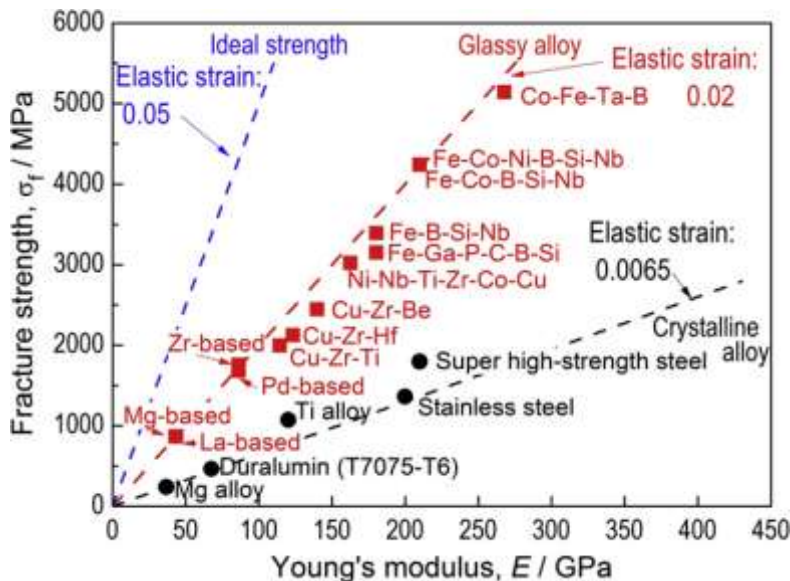
### 2.1 Mekaniska fjädrar

Mekaniska fjädrar är en viktig del i många olika komponenter i moderna högpresterande fordon och de används bland annat i stötdämpare och i flera olika typer av ventilstyrningar. Fjädrarnas prestanda påverkar både komfort, driftsäkerhet, driftsekonomi och delar i fordonets säkerhetssystem. I många tillämpningar är det viktigt att minimera fjäderns massa inte bara för att fordonets totala vikt minskas utan också för att fjäderns responstid är beroende av dess vikt. En lätt fjäder reagerar snabbare än en tung fjäder och de dynamiska egenskaperna kan således förbättras genom att fjäderns massa minskas. Mekaniska fjädrar har använts under lång tid och både geometri och material har genomgått gradvisa förbättringar som lett till långsamt förbättrade fjäderprestanda.

### 2.2 Amorfa metaller

När ett metalliskt material kyls från smälta till fast fas fås vanligen en polykristallin struktur. I en sådan består mikrostrukturen av en mängd olika korn där atomerna i varje korn är ordnade enligt ett regelbundet mönster. Antalet korn och storleken på kornen kan påverkas, till exempel genom att använda olika kylhastigheter från smälta eller genom olika typer av mekanisk bearbetning eller värmebehandling av det solida materialet. Om hela materialet består av en kristall fås ett enkristallint material där alla atomer är placerade på ett inbördes ordnat sätt. Om atomerna istället är helt oordnade och inga korn med regelbundet placerade atomer finns sägs materialet vara amorft. Detta kan till exempel uppnås genom att kyla en smälta mycket snabbt, så att inga korn hinner tillväxa, eller genom mycket omfattande mekanisk deformation där kornen bryts sönder. Amorfa metaller har varit kända sedan 60-talet, men krävde väldigt höga kylhastigheter för att bilda amorf struktur och endast mikrometertunna band kunde framställas. Först i början på 90-talet lyckades professor Inoue i Japan [1], utveckla flera olika multikomponentsystem bestående av vanliga metalliska element som gav upphov till en amorf bulkstruktur, dvs millimetertjocka strukturer, vid kylning från smälta. Under påföljande år har en mängd olika amorfa metallsystem hittats se till exempel Miller och Liaw [1, också 1] eller Greer [2] samt Burgess och Ferry [3]. Amorfa bulkmetaller har ett antal typiska egenskaper som gör dem unika och skiljer dem från konventionella kristallina metaller. Bland annat leder

amorfa metallers avsaknad av regelbunden struktur till att dessa material har mycket högre sträckgräns eller hållfasthet och samtidigt en väsentligt högre elastisk töjning. I figur 1 framgår en sammanställning över hållfasthet och E-modul för några amorfa (rödmarkerade) och kristallina (svartmarkerade) legeringar. Amorfa metaller har en elastisk töjning på ca 2% medan de kristallina metallerna i figuren har en elastisk töjning på ca 0,65%. Den ideala eller teoretiska hållfastheten motsvaras av den blå linjen och en elasticitet på ca 5%.



Figur 1. Hållfasthet som funktion av E-modul för några amorfa och kristallina legeringar. De räta linjerna i diagrammen motsvarar materialens elastiska töjning, från Inoue et. al [4].

Denna kombination leder till att töjningen vid sträckgränsen är mycket stor, mångdubbelt högre än för konventionella metaller. En konsekvens av detta är att den elastiska energin är mycket större än för kristallina metaller. De strukturella egenskaperna diskuteras också av Ashby och Greer [5].

Amorfa bulkmetaller har bland annat kommersialiserats i olika sporttillämpningar som golfklubbor och slagträn där den höga hållfastheten i kombination med deras goda elastiska egenskaper utnyttjas för ökad prestanda. Andra applikationer där den höga hållfastheten och hårda ytan kommer till nytta är i skal till elektronik som mobiltelefoner, datorer och USB-minnen. De nämnda tillämpningarna har kommersialiserats av företaget LiquidMetal ([www.liquidmetal.com](http://www.liquidmetal.com)) och är alla baserade på zirkonium vilket är en relativt dyr metall och hållfastheten jämförbara med kristallint stål. Intensiv forskning har gjorts för att framställa järnbaserade amorfa metaller. Bland annat därför att de har extremt höga hållfastheter, men också för deras höga motståndskraft mot korrosion och det låga priset jämfört med de zirkonimbaserade legeringarna [6, 7]. I ett stort amerikanskt forskningsprogram SAM (Structural Amorphous Metals), finansierat av DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) har nu över 40 amorfa stållegeringar framställts

[6,7]. Tillämpningar här är allt ifrån extremt korrosionsbeständiga och hållfasta behållare för bland annat radioaktivt avfall till ytbeläggningar av fartygsskrov. Andra applikationer där amorft stål föreslås användas är i skärande bearbetning i tunnelborrningsapplikationer [6,7]. Amorft stål har vidare kommersialiserats i ”Shot peening”-tillämpningar [1, 4, 8] där små kulor skjuts mot en metallisk yta i syfte att skapa tryckspänningar på ytan som avsevärt ökar kroppens utmattningshållfasthet. Exemplet ovan visar att amorft stål har mycket goda mekaniska egenskaper och deras uthållighet mot upprepade cykliska stötblastningar [1, 4, 7, 8] är en egenskap som tyder på att de kan tillämpas i många verkstadsapplikationer. Inoue och Takeuchi [4] redovisar att utmattningshållfastheten för en kommersiell amorft stållegering benämnd SENNTIX är 2,3 GPa vid  $10^7$  lastcykler, vilket är mycket högre än för kristallina stållegeringar. En intressant tillämpning är mekaniska fjädrar där ett examensarbete [9] utfört på Saab Bofors Dynamics visar på en potentiell viktminskning på 80-90% jämfört med en befintlig konstruktion. Att utnyttja amorfa metaller höga elasticitet och hållfasthet för att lagra mekanisk energi i fjädrar diskuteras också av Ashby och Greer [5], Qiu och Ren [10] samt Salimon et. al. [11]. De kommersiella tillämpningar av amorfa metaller har begränsats av de svårigheter som är förknippade med att uppnå tillräckligt höga kylningshastigheter hela komponenten. En ny metod, patentskyddad av Exmet AB, beskriver hur additiv tillverkning kan användas för att få en amorft struktur i hela komponenten. Vid additiv tillverkning byggs komponenten skikt efter skikt genom att smälta metallpulvret i varje skikt med en datorstyrd laser eller elektronstråle. Eftersom endast en liten mängd material smälts vid varje given tidpunkt, fås höga kylhastigheter.

### 3 Syfte

Syftet med projektet var att utveckla lättare fjädergeometrier med bibehållen eller förbättrad prestanda. Dessa nya geometrier är svåra att tillverka med konventionella metoder medan det däremot är relativt lätt att göra det med additiv tillverkning. Användandet av additiv tillverkning gör också att det är möjligt att kontrollera materialegenskaperna i alla delar av komponenten på ett annat sätt än vid konventionella metoder. Projektets förväntade resultat delades vid ansökningstillfället upp som följer.

Projekt mål:

- Framställning av prototypfjädrar
- Framställning av provkroppar i amorft stål
- Framställning av fjädrar i amorft stål

Effekt mål:

- Komponenter och fordon som är lättare vilket ger lägre bränsleförbrukning
- Fordon med reducerad ofjädrad vikt och också bättre dynamiska egenskaper
- Introduktion av friformningsteknik för produktutvecklingen inom fordonsområdet
- Introduktion av amorfa metaller inom fordonsindustrin
- Utökad samverkan mellan akademi och industri

## 4 Genomförande

Projektarbetet inleddes med att välja och införskaffa lämpligt pulvermaterial. Materialet måste inte bara kunna bilda en amorf struktur, det måste också ha lämpliga mekaniska egenskaper och i övrigt vara beskaffat så att det kan användas i AM-processen. Initialt tillverkades provbitar med enkel geometri för att utvärdera de olika legeringarnas processbarhet och de resulterade egenskaperna. Parallellt med detta inleddes numeriska simuleringar dels för att stödja processutvecklingen och identifiera kritiska parametrar relaterade till kylhastighet och restspänningar och dels för att optimera fjädergeometrin med avseende på vikt och prestanda. För detta ändamål har ett flertal numeriska verktyg använts, tex LS-DYNA, Impetus Afea Solver, Octave och egenutvecklad kod.

### 4.1 Tillverkningsprocesser

Det finns AM-tekniker som är baserad på att antingen en laser eller en elektronstråle används för att smälta materialet. I detta projekt har elektronstrålemetoden (EBM, Electron Beam Melting) använts tillsammans med en lasermetod benämnd direkt metall lasersintring (DMLS). De två metoderna skiljer sig i processvillkor och krav på det använda pulvret och det är ännu inte känt om någon av metoderna lämpar sig bättre än den andra för att framställa amorfa metallkomponenter. I EBM processen förvärms pulverbädden innan smältningen för att öka bäddens ledningsförmåga och förhindra laddade partiklar från att ”virvla upp” när de bombarderas med elektroner. En annan väsentlig skillnad mellan processbetingelserna är atmosfären. EBM-metoden kräver vakuum, medan smältningen i DMLS fallet istället sker i en atmosfär av kväve eller argon. Vidare är pulverpartikelstorleken större i EBM än i DMLS, vilket resulterar i högre produktivitet i EBM-fallet, men också en lägre ytfinhet. Vidare kan EBM-systemet ge en effekt på upp till 4,5 kW medan DMLS-systemet som använts inom ramen för projektet är begränsat till 200 W. Dessa processkillnader leder till olika termiska gradienter och kylningshastigheter och därmed kommer den resulterande mikrostrukturen också att bli olika. För EBM-försöken användes en maskin placerad vid Mittuniversitetet i Östersund. DMLS-försöken utfördes av Exmet i nära samarbete med EOS som är en ledande leverantör av AM-maskiner och dels en samarbetspartner i USA. I projektet undersöktes 3 olika järnbaserade amorfa legeringar. Dessutom användes ett titanbaserat standardpulver (pulver nr 4) för EBM-system från Arcam. Metallpulvren och EBM-processen beskrivs mera detaljerat av Koptyug m. fl. [14].

Tabell 1. Metallpulver

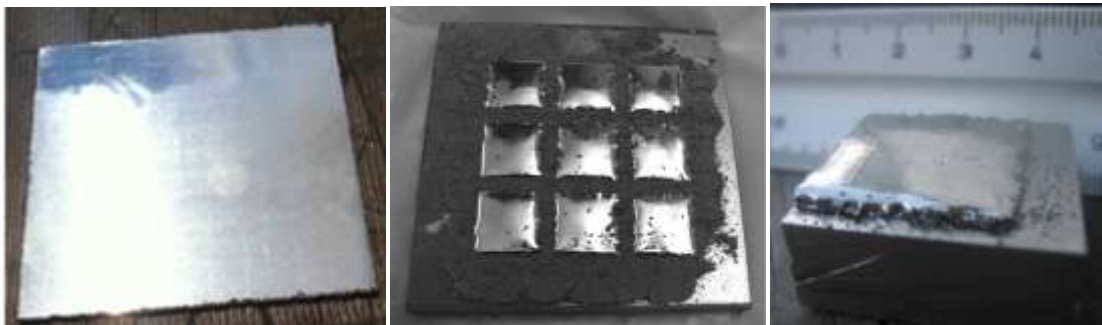
Pulver 1	Pulver 2	Pulver 3	Pulver 4
$\text{Fe}_{51}\text{C}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Mn}_{10}\text{B}_6\text{BCr}_4$	$\text{Fe}_{74}\text{P}_{10}\text{C}_{7.5}\text{Mo}_4\text{B}_{2.5}\text{Si}_2$	Fe-baserad (konfidentiell)	$\text{Ti}_{89.707}\text{Al}_6\text{V}_4\text{O}_{0.15}\text{Fe}_{0.1}\text{C}_{0.03}\text{N}_{0.01}\text{H}_{0.003}$

## 5 Resultat

Nedan summeras översiktligt resultaten från dels processutveckling vad beträffar användandet av additiv tillverkning för att framställa amorf metall och dels arbetet med att designa en ny viktoptimerad fjäder.

### 5.1 EBM-baserad additiv tillverkning av amorfa järnlegeringar

Ett flertal experiment genomfördes med pulver 1 och 2 angivna ovan. I den vänstra delen av figur 2 visas ett exempel på en provbit tillverkad från pulver 1 med måtten  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  och originalhöjden 5 mm, men i figuren nedslipad till 4 mm. Studier med hjälp av optisk mikroskopering och svepelektronmikroskop tillsammans med röntgendiffraktometerresultat visar att den är amorf men med inslag av nanokristallina områden. Hårdheten uppgår till 63 HRC. I de två bilderna till höger ses ett antal provbitar med måtten  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  och en tjocklek på 3 mm. Dessa prov är tillverkade från pulver 2 och är omgivna av delvis sintrat pulver. Analysen visar att provstrukturen är blandad och består av både amorfa och kristallina delar



Figur 2. Till höger en provbit framställd från pulver 1 med måtten  $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ . Den mellersta och högra bilden visar prov framställda av pulver 2 med måtten  $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ .

Mikroskopstudier av material framställda från pulver 2 visar att det finns ”öar” av kristallina områden i matrisen I figur 3 visas ett tvärsnitt (till höger) taget från en av provbitarna (till vänster), det framgår att det finns områden med en distinkt annorlunda struktur.



Figur 3. Mikrostruktur hos tvärsnitt (höger) av material från pulver 2. Den övre och undre delen är amorf medan den mellersta delen delvis kristalliserad med hjälp av ändrade processparametrar



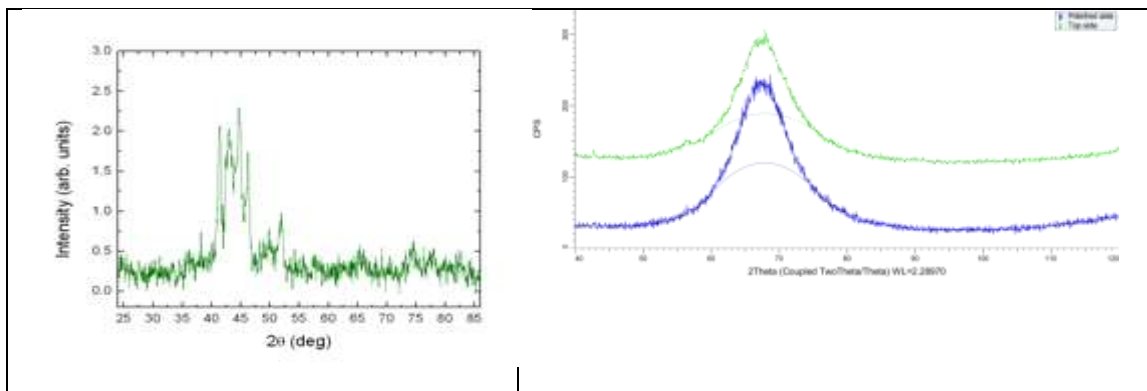
## 5.2 DMLS-baserad additiv tillverkning av amorfa järnlegeringar

Även med DMLS-maskinen från EOS framställdes ett stort antal provbitar med olika processparametrar, och i figur 4 ses ett typiskt urval av dessa.



Figur 4. Provbitar tillverkade med DMLS (pulver nr 3).

Från figuren framgår att dessa provbitar är både cylindriska och kubiska med en diameter/sidlängd av storleksordningen 5-15 mm och en höjd på mellan 7 och 10 mm. Flera av dessa provbitar har en hög andel amorf struktur, se figur 5.



Figur 5. Röntgendiffraktionsmätningar från material framställda från pulver 3 (till vänster) och pulver 2 (till höger). Till vänster finns det spetsiga toppar vilket indikerar att materialet är delvis kristallint. Frånvaron av "spetsar" i högra figuren visar att provmaterialet är amorph.

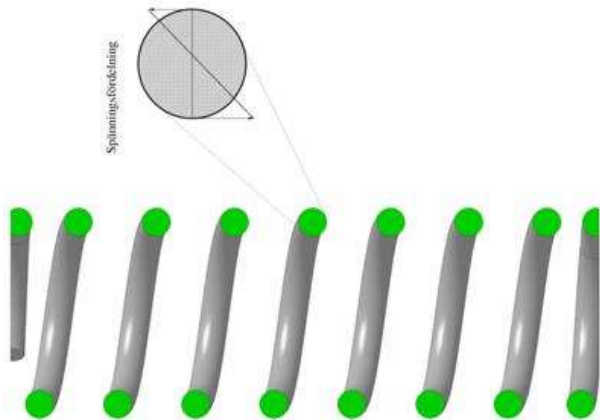
Mikrostrukturundersökningar visar också att det finns porer och mikrosprickor i materialet. Detta kan förväntas i ett tidigt skede av processutvecklingen och porositet kan vanligen åtgärdas med finjustering av laserparametrarna. Resultaten tyder vidare på att de amorfa legeringar som används är känsliga för mikrosprickbildning under AM-processen. Amorfa metallers egenskaper är i mycket hög grad beroende på temperaturen. Försöken har visat att bestämningen av optimala processförhållanden som temperatur, atmosfär och styrparametrarna för framställning av amorfa järnbaserade komponenter är ett omfattande arbete.

### 5.3 Resultatkommentar – amorf metall

Projektet har visat att det går att framställa amorfa järnbaserade metaller i bulkstorlek med hjälp av additiv tillverkning och detta har uppmärksammats både i ett pressmeddelande [15] och i en artikel i Ny teknik [16]. Vidare har både laserbaserade- och elektronstrålebaserade metoder använts och genom att ändra processparametrarna kan förhållandet mellan amorf och kristallin struktur påverkas. De provbitar som framställts inom ramen för projektet har dock haft en för stor andel porer eller mikrosprickor och det har därför inte varit möjligt att framställa prototypfjädrar i amorf metall inom ramen för projektet. Projekttiden och de tillgängliga resurserna begränsade möjligheten att fortsätta med processoptimeringen. För att kunna nå delmålet att framställa mekaniska fjädrar med lägre vikt och bättre dynamisk prestanda bestämdes att ett konventionellt kristallint titanmaterial skulle användas för att bygga prototyper av fjädrar med optimerad geometri och vikt framställda med additiv tillverkning.

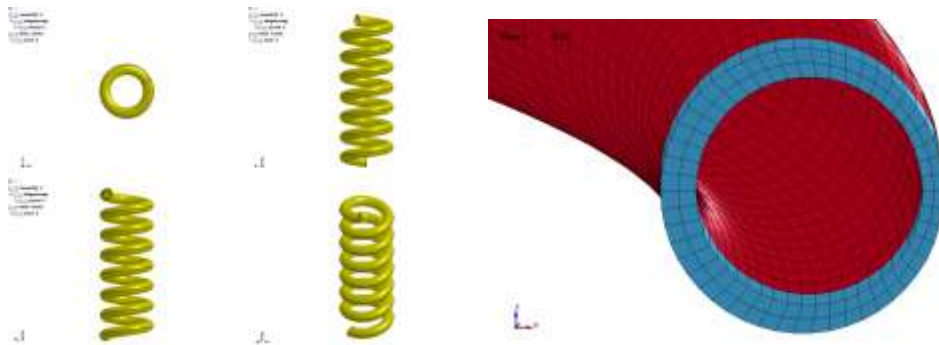
### 5.4 Numeriska simuleringar - Optimering av fjädergeometri

Den vanligaste typen av fjäder är den cylindriska skruvfjäders. Den består av en homogen tråd som lindas till formen av en helix. Denna typ av fjäder är även den vanligaste förekommande typen i hjulupphängningssystem för fordon, och den typ av fjäder som valdes ut som den mest intressanta i projektet. I figur 6 visas ett snitt genom en sådan fjäder tillsammans med spänningsfördelningen över trådens tvärsnitt.



Figur 6. Tvärsnitt genom en cylindrisk skruvfjäders och tillhörande skjuvspänningsfördelning.

Som kan utläsas ur figuren så är spänningen noll i trådens centrum, och spänningen vid innerspåret högre än vid ytterspåret. Effekten av detta blir ett lågt materialutnyttjande, och olika sätt provades för att öka graden av materialutnyttjande. Utan att frångå skruvfjäders och befintlig fjäders yttre mått. Valet för optimeringen i detta projekt blev idén att använda ett rörformat tvärsnitt, där kanalen/hålet placerats excentriskt jämfört trådens centrumlinje. Denna geometri är svår att tillverka på traditionellt vis, men inte med AM. Med dessa geometriförändringar fås en jämnare spänningsfördelning över tvärsnittet, dvs en högre grad av materialutnyttjande, se figur 7.

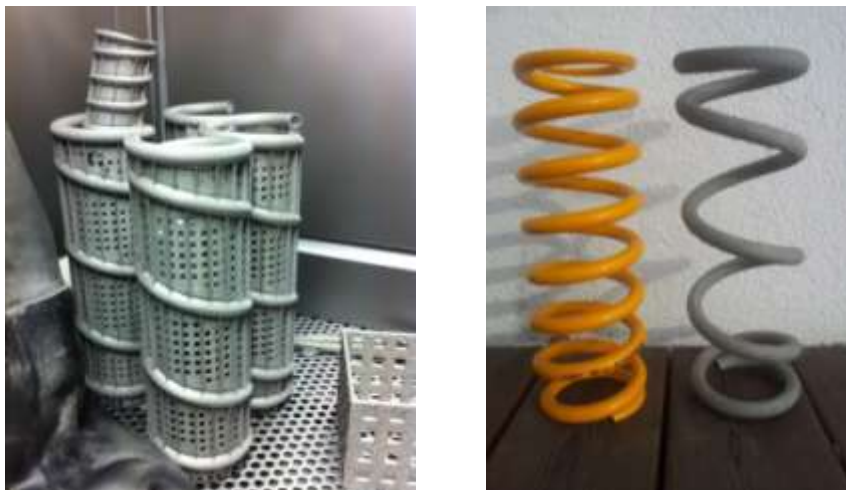


Figur 7. Exempel på fjädergeometri och detalj över ett automatiskt skapat elementnät för optimeringen. Notera det excentriska hålet i fjädern.

Ett flertal olika standardfjädrar utvärderades genom optimering, på Öhlins Racings begäran. För de optimerade fjädrarna fås en dramatisk viktminskning. Vikten på den optimerade fjädern varierar med olika radie på tråden för titan respektive den amorfa metallen. I ett typiskt fall kan den reduceras från ca 600 g till 160 g för titan och till 50 g för amorf metall. Den minskade massan på fjädern ger förutom en lägre fordonsvikt också ett förbättrat dynamiskt beteende, vilket animationen via länken nedan visar. I [animationen](#) visas det dynamiska beteendet för en standardfjäder (till vänster) och en optimerad amorf fjäder (till höger) då dessa trycks ihop och sedan avlastas momentant. Notera den snabbare responsen hos den optimerade fjädern vid avlastningen.

## 5.5 Prototyper - Titan

Inom ramen för projektet tillverkades tre varianter av fjäderprototyper. I figur 8 visas två av dem tillverkade med EBM.



Figur 8. I vänstra delen prototypfjädrar (längd 15/26 cm, ytterdiameter 5/9 cm) med stödstrukturer i blästerboxen. I högra delen jämförelse mellan standardfjädrar och prototypfjädrar (längd 26 cm, ytterdiameter 9 cm) med borttagen stödstruktur.

Några exemplar av dessa två prototypvarianter HIP:ades (Hot isostatic pressing) för att reducera porer och provades sedan i testrigg för jämförelse med de obehandlade fjädrarna. Ett antal problem identifierades som beaktades i utvecklingen av den tredje varianten av prototypfjäder. För den i projektet tredje och sista prototypgenerationen valdes en mindre fjäder för mountainbikes. I figur 9 visas den gula standardfjädern monterad på stötdämpare för mountainbike samt den optimerade fjädern.



Figur 9. Prototypgeneration tre tillsammans med standardfjäder monterad på stötdämpare för mountainbike.

Den optimerade prototypfjädern utmattningsprovades enligt ett standardprogram för mountainbike-fjädrar och resultaten stämde av mot gällande tekniska specifikationer. Överlag var resultaten goda, och ett antal innan kommersialisering nödvändiga designförändringar identifierades. Arbetet med detta har påbörjats utanför ramen för projektet. Som avslutande aktivitet genomfördes ett banprov med prototypen monterad på en mountainbike. Förare var en professionell mountainbike-förare och provet genomfördes i Kalifornien i december 2014.



Figur 10. Banprov av prototypfjäder med professionell mountainbike-förare.

Prototypen väckte stor uppmärksamhet bland deltagarna och åskådarna på testbanan. Öhlins Racing har beslutat att ta det sista utvecklingssteget och kommersialisera fjäderkonstruktionen, utanför ramen för projektet.

## 5.6 Bidrag till FFI-mål

Projektet har på flera sätt bidragit till de mål som är relevanta för FFI-programmet. Arbetet med att utveckla den patenterade metoden att framställa amorfa metaller med hjälp av additiv tillverkning har lett till industrirelevant teknikutveckling och kommer att fortsätta utanför detta projekt tillsammans med ledande materialteknikbolag och tillverkare av AM-utrustning. Inom ramen för projektarbetet har nya metoder för att optimera komponenters geometri tillämpats och dessa nya geometrier har därefter framställts med hjälp av additiv tillverkning. En tillverkningsmetod som ger konstruktörer stora frihetsgrader tillsammans med korta ledtider, låg energiåtgång och nästan inget materialspill. Projektet har på så sätt förbättrat industrins konkurrenskraft och lett till industrirelevant teknik- och kompetensutveckling. De optimerade fjädrarna kommer att introduceras på marknaden av Öhlins och projektet ger på så sätt ett mycket konkret bidrag till svensk industri. I ett vidare perspektiv har projektet lett till utökad samverkan mellan nya företagskonstellationer och universitet, vilka kommer att fortleva i olika konstellationer även efter avslutat projekt.

## 6 Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Den framtagna kunskapen sprids inte bara bland projektdeltagarna utan har även presenteras på internationella konferenser och genom andra öppna publikationer. Vidare är stora delar av den kunskap som genererats generell och kan tillämpas inom produktutveckling inom branscher även utanför fordonsindustrin. Exempelvis är de metoder för geometrioptimering av belastade komponenter användbara även i andra tillämpningar. Kunskapsökningen och kännedomen om AM-tekniken som sådan har också ökat som en del av projektet och den mekaniska fjäder som designats blir sannolikt en av de första AM-komponenter som kommersialiseras inom fordonsindustrin. Detta kommer att öka kännedomen om de i projektet använda metoderna.

### 6.2 Publikationer

- Koptuyug, A.; Rännar, L.-E.; Bäckström, M. & Langlet, A. Bulk metallic glass manufacturing using electron beam melting. International Conference on Additive Manufacturing & 3D Printing, 2013.
- Mittuniversitetet och Exmet AB. Unikt genombrott för tillverkning av amorf metall [pressmeddelande]. 2012.
- 3d-skrivare bygger glasartat superstål. Artikel i Ny Teknik. 2012.

## 7 Slutsatser och fortsatt forskning

Försöken har visat att det är möjligt att framställa amorfa metaller i bulkstorlek med hjälp av additiv tillverkning. Dock återstår ett omfattande utvecklingsarbete för att optimera processen så att andelen porer och mikrosprickor begränsas till en teknologiskt acceptabel nivå. Detta arbete fortsätter tillsammans med ett antal olika partners. Projektet har också visat att det är möjligt att med hjälp av additiv tillverkning framställa komponenter med optimerad geometri på ett sätt som inte är möjligt med konventionella metoder. Den AM-tillverkade titanfjädrar som designats och vars prestanda verifierats genom fullskaleprov kommer att förfinas och kommersialiseras av Öhlins Racing.

Sammanfattningsvis gäller att:

- Projektet har visat att det är möjligt att framställa amorfa metaller med AM-teknik.
- Ett omfattande arbete återstår med att optimera processen så att porer och mikrosprickor begränsas till en teknologiskt acceptabel nivå.
- AM-teknik möjliggör tillverkning av komponenter med optimerade egenskaper.
- En ny typ av mekaniska fjädrar med väsentligt lägre vikt har designats och kommer att kommersialiseras med hjälp av additiv tillverkning.

## 8 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har genomförts av de organisationer som anges nedan tillsammans med kontaktperson för respektive part.

Öhlins Racing AB Lars Macklin (Projektledare) <a href="mailto:Lars.Maclin@ohlinsracing.com">Lars.Maclin@ohlinsracing.com</a>	Exmet AB Mattias Unosson (Bitr. proj.ledare) <a href="mailto:Mattias.Unosson@exmet.se">Mattias.Unosson@exmet.se</a>	Mittuniversitetet Lars-Erik Rännar <a href="mailto:Lars-erik.rannar@miun.se">Lars-erik.rannar@miun.se</a>
Lesjöfors industrifjädrar AB Stefan Musslinder <a href="mailto:Stefan.musslinder@lesjoforsab.com">Stefan.musslinder@lesjoforsab.com</a>	Truress Engineering Sweden AB Mattias Unosson <a href="mailto:Mattias.Unosson@truress.se">Mattias.Unosson@truress.se</a>	Arcam AB Anders Snis <a href="mailto:Anders.snis@arcam.com">Anders.snis@arcam.com</a>

## 9 Referenser

1. M. Miller and P. Law (editors), "Bulk Metallic Glasses – An Overview", ISBN: 978-0-387-48920-9. Springer, 2008.
2. L. Greer, "Metallic glasses... on the threshold", *Materials today jan-feb 2009*, vol. 12, no 1-2.
3. T. Burgess and M. Ferry, "Nanoindentation of metallic glasses", *Materials today jan-feb 2009*, vol. 12, no 1-2.
4. A. Inoue and A. Takeuchi, "Recent development and application products of bulk glassy alloys", *Acta Mater* (2011), doi:10.1016/j.actamat.2010.11.027.
5. M. F. Ashby and A. L. Greer, "Metallic glasses as structural materials", *Scripta Materialia*, 54, 321-326, 2006.
6. J. Blink, J. Farmer, J. Choi and C. Saw, "Applications in the Nuclear Industry for Thermal Spray Amorphous Metal and Ceramic Coatings", *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 1344, Vol. 40A, June 2009.
7. J. Farmer, J.-S. Choi, C. Saw, J. Haslam, D. Day, P. Hailey, T. Lian, R. Rebak, J. Perepezko, J. Payer, D. Branagan, B. Beardsley, A. D'amato and L. Aprigliano, "Iron-Based Amorphous Metals: High-Performance Corrosion-Resistant Material Development", *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 1289, Vol. 40A, June 2009.
8. A. Inoue, I. Yoshii, H. Kimura, K. Okumura and J. Kurosaki "Enhanced Shot Peening Effect for Steels by Using Fe-based Glassy Alloy Shots", *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 11 (2003) pp.2391 to 2395.
9. M. Kahlin, "Amorfa metaller – applikationer och materialverifiering", Examensarbete, Linköpings tekniska högskola, LIU-IEI-TEK-A--07/00235--SE, 2007.
10. K. Q. Qui and Y. L. Ren, "Fabrication and mechanical properties of glassy coil spring", *Materials Letters* 60, pp. 1851-1853, 2006.
11. A. I. Salimon, M. F. Ashby, Y. Bréchet and A. L. Greer, "Bulk metallic glasses: what are they good for?", *Materials Science and Engineering A* 375-377, (2004), 385-388.
12. B. Zheng, Y. Zhou, J. E. Smugeresky and E. J. Lavernia, "Processing and behaviour of Fe-based metallic glass components via laser-engineered net shaping, *Metallurgical and Materials Transactions A* 1236-Vol 40A, (2009).
13. V. K. Balla, S. Bose and A. Bandyopadhyay, "Laser processed bulk amorphous alloy (BAA) coatings and net shape components" (2009).
14. Koptuyug, A.; Rännar, L.-E.; Bäckström, M. & Langlet, A. Bulk metallic glass manufacturing using electron beam melting. *International Conference on Additive Manufacturing & 3D Printing*, 2013.
15. Mittuniversitetet och Exmet AB. Unikt genombrott för tillverkning av amorf metall [pressmeddelande]. 2012.
16. 3d-skrivare bygger glasartat superstål. Artikel i *Ny Teknik*. 2012.