



Öppen rapport för projektet

Ultrahöghållfast och ultrarent stål för lättare fästelement



Ny generation av fästelement i B14

Delprogram: Hållbar produktionsteknik

Författare: Kurt Andersson – Bulten Sweden AB
Rui Wu Swerea KIMAB

Datum: 2013-03-27



Innehåll

1. Sammanfattning	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte	5
4. Genomförande	5
4.1. Kallformning och dess sekvenser	5
4.2. Värmebehandling-härdning	6
4.3. Mekaniska egenskaper och känslighet för vätesprödhet	6
4.4. Utveckling av skruvmontering, sträckgränsdragning och guide-line för ny design	8
4.5. Genomförande av en pilotapplikation	8
5. Resultat och måluppfyllelse	9
5.1. Resultat	9
5.2. Leverans till FFI-mål	12
6. Spridning och publicering	12
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	12
6.2 Publikationer	13
7. Slutsatser och fortsatt forskning	13
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	14

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

Detta projekt fokuserar på utveckling av en ny generation av fästelement i material benämnt B14 med en betydligt högre hållfasthet än konventionella fästelement i hållfasthetsklass 10.9 och 12.9 vilka används idag, dvs. nya fästelement har som mål att ha en draghållfasthet högre än 1400 MPa kombinerat med tillfredsställande duktilitet.

Utveckling av nya ultrahöghållfasta fästelement är för att möta ökad efterfrågan på innovativa applikationer för transportindustrin, att maximera effektiviteten på kritiska komponenter såsom motor, att garantera en trygg och långsiktig verksamhet, att minska materialförbrukningen för fästelement och att minimera CO₂ utsläpp.

Inom projektet har parallellt arbetats med verktygskonstruktion, kallformningsprocess, värmebehandlingsprocess och simulering av skruvförbandsapplikationer. För den nya typen av fästelement i B14-material har dessutom de karakteristiska mekaniska egenskaperna tagits fram och monteringsparametrar samt riktlinjer för design utarbetats. Den nya skruvförbandstekniken och utförandet av fästelement kommer att användas och verifieras på Scania's tunga lastbilar.

Tre deltagare, två industriella företag, Bulten Sweden AB och Scania CV AB och ett forskningsinstitut, Swerea KIMAB AB, har gemensamt arbetat med och drivit projektet. Projektet varade i två år, från 2011-03-01 till 2013-02-28.

Mekaniska egenskaper vid både rumstemperatur och förhöjda temperaturer i form av hårdhet, hållfasthet, krypegenskaper, utmattnings- samt väteförsprödning är för nyutvecklade fästelement i B14 överlägsna de för närvarande använda traditionella fästelementen i hållfasthetsklass 10,9 och 12,9. De framtagna testdata över mekaniska egenskaper har också använts vid 2D Finit Elementsimulering (FE) och design för att optimera skruvförbanden.

Egenskaper och karakteristiska skillnader för skruvförband med nyutvecklade B14-materialet och nuvarande med skruvar i hållfasthetsklass 10.9 har undersökts med FE-metoden i tre olika bulkmaterial, nämligen aluminium, gråjärn och C70 stål. Fyra olika längder har modellerats för att kontrollera effekterna av inverkan av ingreppslängd. Resultat såsom klämkraft och sträckgräns hos skruven har bestämts genom att extrahera spänningsresultat från mittsektion hos skruven. 80 % av sträckkraften, dvs. dragkraften vid sträckgränsen vid rakt dragprov av en skruv, anges oftast som gränsen för hur mycket



klämkraft en skruv kan leverera i ett skruvförband. Resultaten visade att B14-applikationerna har högre klämkraft och kräver längre ingreppslängd jämfört med skruvförband med 10.9. FE-analys visar också att bulk-materialet når materialets sträckgräns innan den når sträckgränsen för skruven vid korta ingreppslängder. Högst belastade områden är den första gången, gäller för både skruv och bulkmaterial, i övergång mellan stam och skruvhuvud och inre hörnet av kontaktytan på underlaget.

Det förväntas att denna nya fästelementteknik, som utvecklats i projektet, kommer att genomföras inom svensk fordonsindustri och andra industrier som har ett krav eller en konkurrensfördel med nya produkter med kompakt design och sparad vikt.

2. Bakgrund

I en typisk mellanstor bil finns det ca 2-3000 fästelement med olika hållfasthetsspecifikationer. Så många fästelement har en total vikt på omkring 30 kg. Fästelement ingår i applikationer i kaross, dressing, chassi och drivlina. Fästelementen används i de flesta fall vid omgivningstemperatur men i en del motorapplikationer vid temperaturer på upp till 500°C eller mer. De flesta fästelement som tillverkas idag tillverkas av kallformningsstål (kolstål och låglegerade stål) med en hållfasthet på mellan 800- 1000 MPa. De monteras i de flesta fall genom momentkontroll vilket innebär att de är belastade under sträckgränsen för materialet.

Kontinuerlig utveckling av Ultra Högållfasta Stål (UHSS) gör det möjligt att producera ny generation av fästelement med en betydligt högre hållfasthet än de konventionella fästelementen som används idag. Dessa högållfasta fästelement har stor potential för att avsevärt minska vikt och storlek av fästelement. I de flesta fall kan storleken på fästelementet minskas en dimension som t.ex. från dimension M8 till M6 eller ännu mindre. Inte bara storleken på fästelement, utan även klämlängden kan minskas. Detta är fallet för applikationer i både rumstemperatur och vid förhöjd temperatur. Det uppskattas att totalvikten av fästelement för en medelstor personbil med ny fästelementteknik, kan minskas med cirka 28 kg, vilket motsvarar en minskning av CO₂-utsläpp av 3 g/km.

Den nya generationen fästelement kommer att bestå av finkornigt, ultrarent, härdat martensitiskt stål B14 med en brottgräns över 1400 MPa. På denna hållfasthetsnivå har tidigare duktiliteten normalt hos denna typ av material varit kritisk. Stål B14 är ett låglegerat ultrarent kolstål, som härdas och anlöps till martensit med en speciell utvald värmebehandling. För att nå hög duktilitet och motverka känslighet för väteförsprödning har ultraren stålmetallurgi använts med mycket lågt innehåll av inneslutningar vilket i sin tur har optimerat kemisk sammansättning, former, storlekar och 3D-fördelningar. Detta är därmed en unik typ av material som inte tidigare använts för fästelement.



Vad vi vet så finns inget annat material av denna typ på marknaden för fästelement. Det är känt att vissa europeiska konkurrenter har utvecklat 1400 MPa-stål för fästelement. Detta material har emellertid ett annat metallurgiskt koncept och med lägre duktilitet än B14.

Det är en utmaning att tillverka B14- fästelement för att möta ökade krav från transportsektorn. Många frågor och problem inom produktion såsom kallformnings- och värmebehandlingsprocess, fästelementens prestanda och monteringsparametrar måste vara besvarade och lösta innan B14-fästelementen kommer att användas i full skala inom fordonsindustrin.

3. Syfte

För att producera nya generationen fästelement av UHSS stål B14, är målen för projektet:

1. Utveckling av kallformningsprocessen och dess verktyg som anpassas till den nya typen av fästelement.
2. Optimering av värmebehandlingsprocessen så att den är lämpad för de nya fästelementen i olika dimensioner.
3. Framtagning av mekaniska egenskaper och utvärdera känslighet för vätesprödhet för den nya typen av fästelement i applikationer vid både rumstemperatur och förhöjd temperatur.
4. Utveckling av monteringsegenskaper för skruv, sträckgränsdragning och "guidelines" för nya konstruktioner.
5. Demonstration av en pilotapplikation.

4. Genomförande

4.1. Kallformning och dess sekvenser

Vid kallformning av stål är det av stor betydelse hur materialet flyter vid formningen i verktygen i kallslagningsmaskinen. I projektet har verktygsdesign motsvarande de som används vid kallformning av fästelement i hållfasthetsklasserna 8.8, 10.9 och 12.9 varit utgångspunkt för att utreda om de även fungerar för B14.

Gängningsoperationer har utförts med gängbackar med utförande enligt normala ISO-toleranser för gängor såsom bottenradier och stympningar. I och med att resultat från



utmattningsprovning har kunnat utnyttjas parallellt har det inte uppkommit behov av justeringar för gängning. Vid gängning av skruvar efter härdning så har behov av högre kapacitet i form av kraftigare maskiner utnyttjats då hårdheten för B14-artiklar är cirka 20% högre.

Även livslängden på gängverktyg reduceras vid gängning efter härdning. Trots den högre hårdheten hos B14-materialet så är duktiliteten god och möjliggör gängning efter härdning. Detta gör också att efterföljande gängningsprocess kunnat utföras med standardgängbackar.

4.2. Värmebehandling-härdning

Härdprocessen för B14-material kräver avsevärt högre anlöpningstemperatur jämfört med övriga seghärdade skruvar i hållfasthetsklass 8.8, 10.9 och 12.9. Projektet har använt anlöpningstemperaturen både 550 °C till 600 °C för B14 mot normalt 450 °C för de övriga seghärdade produkterna. I och med detta blir tillgängligheten mindre för en ugn i en produktionslina där omställningstider krävs. Detta kommer att vara realitet för Bulten tills en separat härdlina för just B14 installerats eller annan lösning finns.

Projektet har producerat artiklar i dimensionsområdet M8 – M16. Målet har varit att nå hållfastheten för brottgränsen R_m på 1400 MPa. Detta har uppfyllts för alla dimensioner mellan M10 – M16 med god kapabilitet. För M8 ligger den något lägre i vissa fall varför det är av stort intresse att i ett eventuellt kommande projekt utreda vidare.

Materialet som använts för alla de olika B14-dimensionerna har samma analys då de kommer från samma tillverkningsbatch.

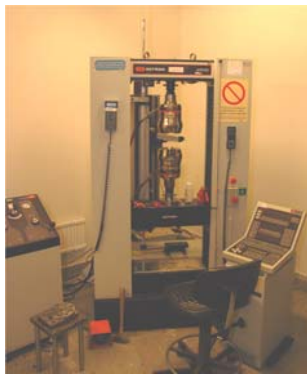
4.3. Mekaniska egenskaper och känslighet för vätesprödhet

Mikrostrukturen och hårdhetsmätningar på B14-skruvar visar på normal struktur. Hårdhetsprofilen på gänga är viktig att kontrollera ur avkolningssynpunkt. Dessa tester har utförts hos Bulten Sweden AB och Swerea KIMAB.

Dragprov har utförts på standardiserade provstavar vid rumstemperatur och förhöjda temperaturer. Hållfasthetsprovningen är väsentlig för att säkra prestanda för fästelement utsatta för höga spänningar utan att det ska leda till brott. Hållfasthetsegenskaperna vid förhöjda temperaturer har också kontrollerats vid kryptester mot verifierade varmhållfasthetsvärden. Hållfasthetsprovning har utförts hos Bulten Sweden AB och Swerea KIMAB.

Utmattningsegenskaper för M10-skruvar i B14-material har utvärderats vid tre olika mittspänningsnivåer $\sigma_m = 0,4 \times R_{m,nom}$, $0,7 \times R_{m,nom}$ och $0,9 \times R_{m,nom}$, där $R_{m,nom}$ är

brottgränsen. Jämförelse med M10-skravar i hållfasthetsklass 10.9 har gjorts med mittspänningen $\sigma_m = 0,7 \times R_m$. Utmattningssegenskaper är kritiska för skruvförband vid dynamiska påkänningar och över lång tid. Utmattningsprovningarna har utförts enligt gällande standard ISO 3800 hos Swerea KIMAB.



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Instron test frame for tensile testing. (b) Fatigue test frame.

Kryptester har utförts vid förhöjda temperaturer upp till 450°C på standardiserade provstavar enligt gällande standard. Krypegenskaper är kritiska för applikationer som utsätts för förhöjda temperaturer och långa drifttider. Kryptesterna har utförts hos Swerea KIMAB.

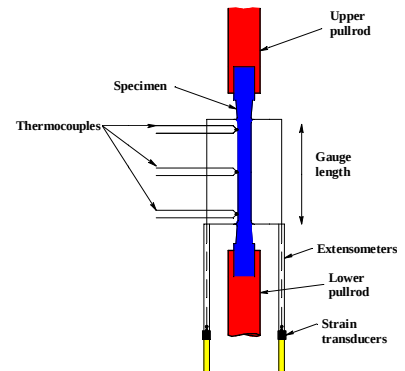
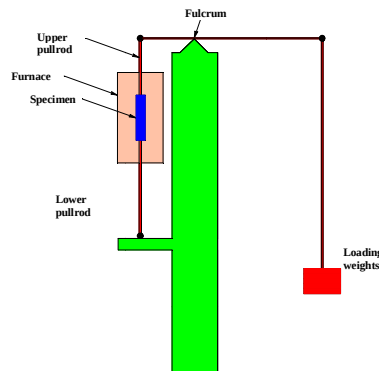


Fig. 2 Bofors creep test frame and assembly.

Tre olika typer av tester har utförts för att undersöka känslighet mot vätesprödhet hos M10-skravar i B14-material. Testerna inkluderar test baserad på japansk metod som bygger på sträckgränsdragen skruv som doppas i saltsyra cykliskt varje dygn under 2 veckor, en metod med konstant spänning och en modifierad metod med ökande spänning hos skruven. Dessa tester har utförts hos Bulten Sweden AB och Swerea KIMAB.



Fig. 3 Hydrogen embrittlement test by Japanese method. Assembly and failed screw.

4.4. Utveckling av skruvmontering, sträckgränsdragning och guide-line för ny design

Finit elementanalys utfördes med hjälp av programmet ABAQUS Implicit på skruvförband med 10.9-skruv och B14-skruv monterade i godsmaterial bestående av aluminium, gråjärn och stål C70. Jämförelse mellan klämkrafter vid respektive sträckgräns har genomförts. Lokal plastisk deformation har uppskattats i relation till olika ingreppslängder. Rekommendationer för åtdragning av skruvar har tagits fram. Detta arbete har genomförts hos Swerea KIMAB.

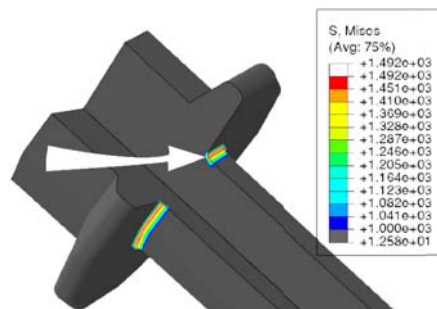


Fig. 4 Location of the initial plastic deformation in the screw head region.

4.5. Genomförande av en pilotapplikation

En pilotapplikation med B14-skruv i tunga fordon har studerats för att verifiera klämkraft under termiska cykler. Resultatet har jämförts med användning av traditionella fästelement.



Fig. 5 Pilot application of B14 screw.

5. Resultat och måluppfyllelse

5.1. Resultat

I och med att B14-materialet har visat goda kallformningsegenskaper och till och med bättre kallformningsegenskaper än övriga material så har inga ändringar behövts i nuläget. Materialet i B14 har inte deformationshårdnat vid respektive kallformningssekvens mer än normalt för övriga kallformningsstål.

Grundmaterialet i B14 och materialbehandlingen vid dragning av tråden är grunden till att det har så goda kallformningsegenskaper. De goda flytegenskaperna vid kallformning är också positiva ur spricksynpunkt.

Kallslagningsoperationerna har genererat ett deformationshårdnande och därmed hårdhetsökning från trådmaterialets hårdhet på cirka 200 - 220 HV0,3 upp till 310 HV0,3 efter 4 kallformningssteg, mätt axiellt utefter skruvens längd, se Fig 6 och 7. Hårdhetsökningen är beroende på deformationsgraden i olika delar av skruven. Dessa värden är från en skruv med flänsskruv med sexkantsskalle och relativt stor deformationsgrad

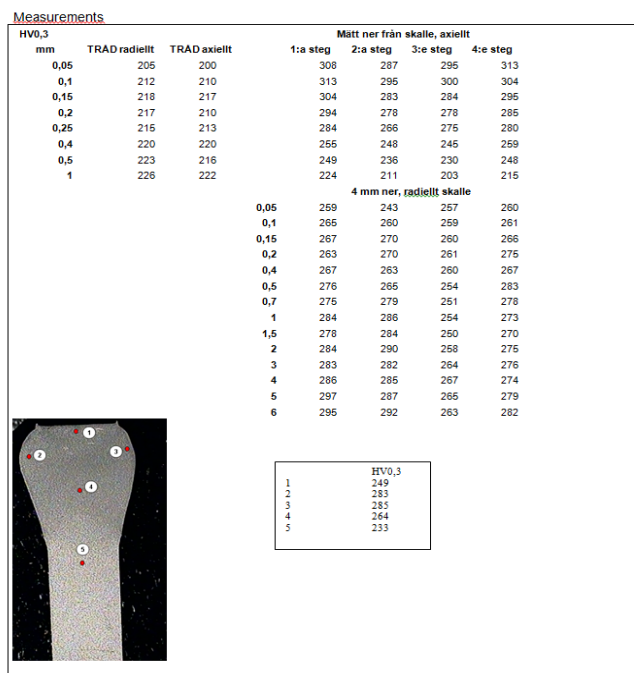


Fig. 6 Hårdhetsmätningar på tråd och efter 1:a kallformningssteg

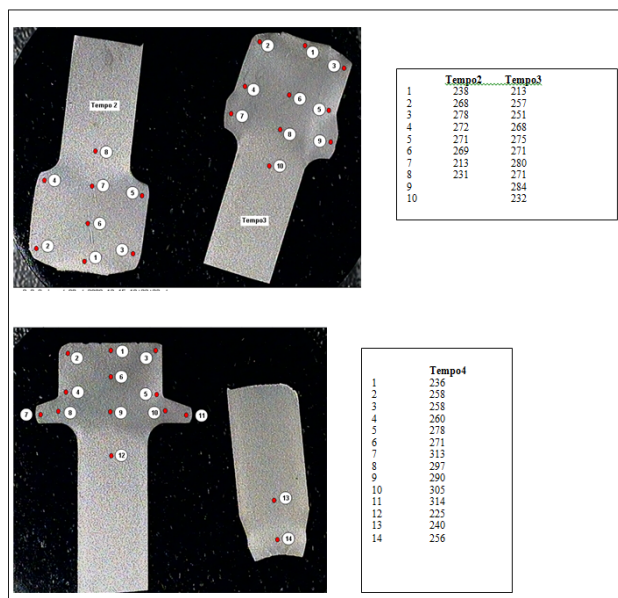


Fig. 7 Hårdhetsmätningar efter kallformningssteg 2-4

En kort summering av undersökning av mikrostruktur och provningsresultat av mekaniska egenskaper ges nedan. Mikrostrukturen bestående av finkornig anlöpt

martensit och hårdhetsprofilen över tvärsnitt visas i figur 8a resp. 8b. Mikrostrukturen och hårdhetsprofilen är normala. Fastän materialet består av anlöpt martensit med hög hårdhet så är B14-skruvarna mindre känsliga för väteupptagning än övriga traditionella. Detta har verifierats genom olika testmetoder.

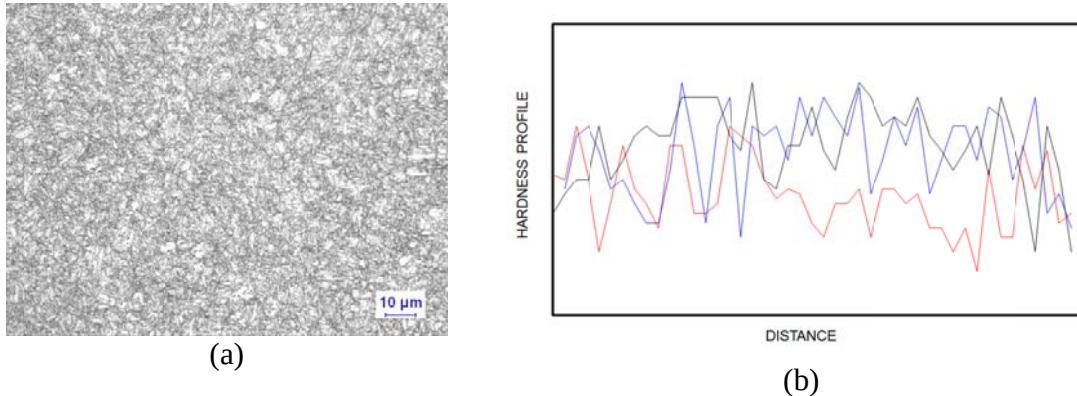


Fig. 8 (a) Fine grained and tempered martensite of B14 screw. (b) Hardness profile.

Hållfasthet, kryp- och utmattningsegenskaper visas i figur 9. Hållfastheten avtar med ökande temperatur emedan duktiliteten i stället ökar med stigande temperatur. Goda krypegenskaper har observerats även vid förhöjda temperaturer. Utmattningsegenskaper är bättre för B14-skruv vid jämförelse med vanliga standardskruvar i hållfasthetsklass 10.9.

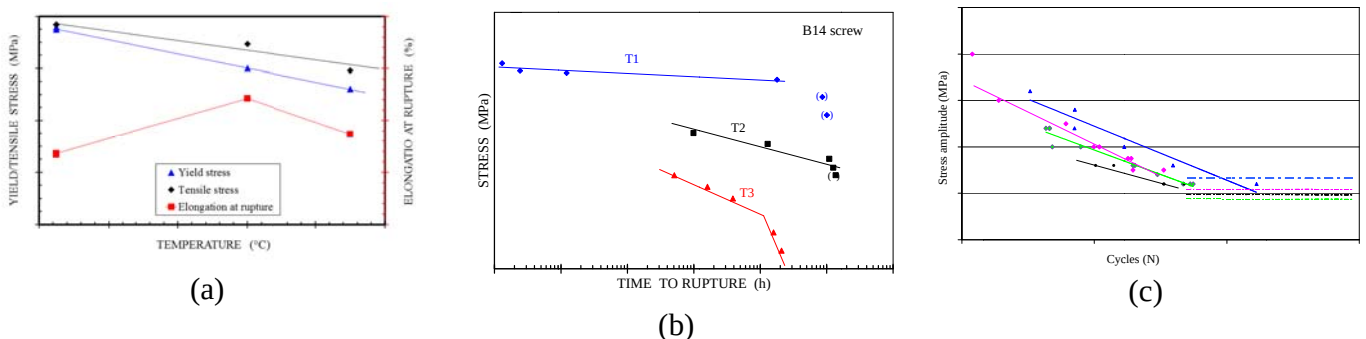


Fig. 9 Mechanical properties of B14 screw. (a) Tensile properties. (b) Creep properties. (c) Fatigue properties.

FEM-analys visar att nivåerna hos klämkraften vid sträckgränsen är avgörande. Därför är dessa nivåer avgörande som "guidelines" vid åtdragning av skruvar. Analyserna visar också att 30 % högre klämkrafter erhålls vid sträckgränsen när skruvar i B14-material används jämfört med traditionella i 10.9.

En industriell applikation har genomförts genom att mäta klämkraftens variation med hänsyn till tid och vid förhöjd temperatur. Kvarvarande klämkraft för B14 har jämförts



med 10.9 under samma förhållanden. Kvarvarande klämkraft är högre för B14 jämfört med 10.9.

5.2. Leverans till FFI-mål

Många aktiviteter och uppgifter har genomförts och kompletterats för att uppfylla målen för projektet. Resultatet från projektet har medverkat till att:

- Utveckla och producera en ny generation av fästelement med ultrahög hållfasthet och med hög duktilitet.
- Minska materialåtgång för fästelement och göra transportfordon lättare.
- Reducera emissioner och skadliga utsläpp av växthusgaser.
- Förbättra effektiviteten hos kritiska komponenter för att möjliggöra säker drift.
- Utveckla verktyg och testmetoder för sofistikerade experiment och simuleringar.
- Optimera skruvförband för allmänna och avancerade applikationer.
- Skapa användbara och applicerbara resultat och metoder.
- Öka internationell konkurrenskraft och marknadsandelar för svensk fordonsindustri.
- Stärka nyckelkompetens, kunskaper och erfarenheter för vidare utveckling av nästa generation av fästelement.
- Öka kontakter mellan forskningsinstitut, komponenttillverkare och slutanvändare.
- Utbyta och förmedla kunskaper, information och teknologier.

Resultaten, FEM-analyserna och test-metodikerna i projektet är också relevanta för andra industrier som infrastruktur, tillverkning och energisektor där skruvförband används frekvent.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Den nya generationen med fästelement i B14-material har visat sig uppfylla alla förväntade egenskaper. Därför kan användning av fästelement i B14-material publiceras och marknadsföras genom publicering på Vinnovas hemsida. I själva verket har utbyte av teknisk information och metoder skett kontinuerligt inom projektet mellan deltagande parter och även delgivits externa forskare, tillverkare och slutanvändare på ett seminarium inom FFI-programmet. Tilläggas kan att detta projekt är relevant för ett tidigare FFI-projekt ”OptiFastening”. Projektdeltagarna i detta projekt Bulten Sweden AB, Swerea KIMAB AB och Scania CV är även grundare av Swedish Fasteners Network (SFN) där implementering av modern skruvförbandsteknik för den svenska fordonsindustrin sker.

6.2 Publikationer

1. B14 - Ultra high strength and ultra clean steel for light weight fastener, Bulten Sweden AB, mötesplats för framgångsrika verkstäder!, Katrineholm, (2012)
2. Modelling 10.9 and B14 fasteners, report Swerea KIMAB, KIMAB-2012-116, (2012)
3. Creep properties of B14 fasteners at elevated temperatures, report Swerea KIMAB, (2013)
4. Hydrogen embrittlement test 10.9, 12.9 and B 14, Bulten Sweden AB, Engineering report, 2012-08-R1, (2012)
5. Examination of hydrogen sensitivity of UHSS fasteners, report Swerea KIMAB, (2013)
6. Fatigue properties of UHSS B14 screw, report Swerea KIMAB, KIMAB-2012-112, (2013)

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Den nuvarande typen av fästelement i B14-material är unik internationellt, inte bara som ultra höghållfast stål, utan också för dess höga duktilitet, vilket gör att det skiljer sig från konkurrenter.

1. De viktigaste resultaten i projektet är kapaciteten att producera ultra höghållfasta fästelement med tillfredsställande egenskaper i industriell skala och att testa dessa fästelement i befintliga fordon. Detta gör det möjligt att kommersiellt introducera B14-skrivar på marknaden i en nära framtid.
2. Nya och värdefulla data om mekaniska egenskaper som hållfasthet, kryp, utmattning och känslighet mot väteupptagning har tagits fram. Dessa data kan utnyttjas för att simulera användning av skruvförband med B14, för att designa utförande och dimensioner för fästelement och för att skapa driftsäkerhet på lång sikt.
3. Genom att använda testdata så har 2D-simulering utförts för att bedöma spänningars och töjningars fördelningar i ett skruvförband. Bedömningarna ger oss guidelines för konstruktion av fästelement och skruvförband.
4. God korrelation för amplituden hos klämkraft vid teoretiska och praktiska försök har uppnåtts för olika hållfasthetsklasser.
5. Olika testmetoder har utvecklats för att möta speciella krav.



Skruvförband spelar och kommer fortsättningsvis att spela en viktig roll vid konstruktion av fordon. Men prestanda hos skruvförband är i många fall inte maximalt utnyttjade till sträckgränsen. För att tillämpa detta krävs bättre monteringsmetoder, omfattande materialdata för avancerad simulering och optimal design samt kontinuerlig övervakning vid åtdragning. Dessutom pågår ständigt utveckling av nya material och skruvförbandstekniker. Till exempel så är ett konkurrerande europeiskt material, icke-martensitiskt, med hållfasthet upp till 1600 MPa under utveckling.

För att möta ökad konkurrens och krav så föreslås framtida arbete enligt följande:

1. Utveckla nya och starkare material för skruvförband.
2. Utveckla/förbättra nya verktygssystem och värmebehandling för produktion av nya och starkare fästelement.
3. Utveckla/använda 3D-simuleringsverktyg för avancerad och sofistikerad analys av fördelning av spänningar och töjningar.
4. Utveckla/använda/standardisera test metoder för att uppnå bättre och djupare förståelse av materials beteende såsom kopplingen mellan kryp och utmattning, notch/gångors påverkan med avseende på spänningskoncentrationer, brottmekanismer och mekaniska egenskaper i kombination med miljö.
5. Studera inverkan av värmebehandling, kylhastighet, restspänningar och ytbehandling på mekaniska egenskaper för fästelement med olika dimensioner.
6. Implementera ny fästelementteknologi inom svensk fordonsindustri och andra industrier som har krav eller konkurrensfördelar med hjälp av lätta och kompakta produkter.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner



Kurt Andersson, Specialist Fasteners Engineering, Bulten Sweden AB
kurt.andersson@bulten.com, cell phone: +46705691356

Ellinor Ohlsson, Project leader, Bulten Sweden AB
ellinor.ohlsson@bulten.com, cell phone: +46768291675

Ulf Sigvardsson, Manager Technical Centre, Bulten Sweden AB
ulf.sigvardsson@bulten.com, cell phone: +46702421902

Sinikka Keskitalo, Application engineer, Bulten Sweden AB
sinikkakeskitalo@bulten.com,



Lars Gunnarsson, Head of UTMN - Materials Technology for Axle and Transmission,
Scania CV AB
lars.gunnarsson@scania.com,

Anders Johansson, Senior Fastening Engineer, Scania CV AB
anders.z.johansson@scania.com,

Arne Melander, Vice president,
arne.melnder@swerea.se, cell phone: +46705929087

Rui Wu, Research area leader, Swerea KIMAB AB
rui.wu@swerea.se, cell phone: +46734231174

Niclas Stenberg, Research area leader, Swerea KIMAB AB,
niclas.stenberg@swerea.se , tel: +46734169838

Aldin Delic, Researcher, Swerea KIMAB AB
aldin.delc@swerea.se, cell phone: +46722062809

Gunnar Leijon, Researcher, Swerea KIMAB AB
gunnar.leijon@swerea.se, cell phone: +46735370453