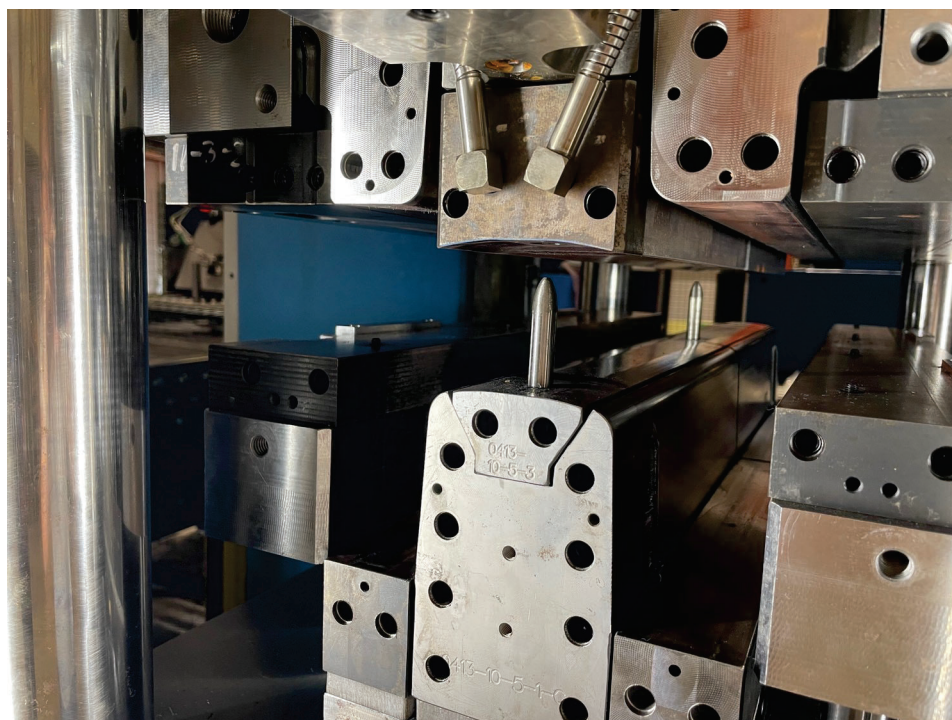


ExtremeSteels - Användarstyrd processdesign för stål med extrema egenskaper



Författare: Jonas Edberg, LTU
Datum: 2022-06-30
Projekt inom Hållbar Produktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning.....	3
2 Executive summary in English.....	3
2.1 Background.....	3
2.2 Aim, research questions and methodology.....	4
2.3 Objectives.....	5
2.4 Results and achievement.....	6
2.5 Conclusions and further research.....	7
3 Bakgrund.....	7
4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....	8
5 Mål.....	10
6 Resultat och måluppfyllelse.....	11
7 Spridning och publicering.....	14
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	14
7.2 Publikationer.....	14
8 Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	15
10 Referenser.....	15

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Detta projekt är ett samarbete mellan universitet, forskningsinstitut och industriföretag/slutanvändare som varit inriktat på att utveckla, eller möjliggöra användningen av 3G AHSS (Tredje generationens avancerade höghållfasta stål) inom fordonsindustrin. Dessa stål, med deras innehåll av restaustenit i mikrostrukturen är bland de hetaste områdena inom materialval och fordonsindustri för tillfället. Dessa stål kan användas för kallformning både vad gäller varmvalsat, kallvalsat och metallbelagt, men också för varmformning i kombination med en värmebehandling som benämns Q&P-stål (Quench and Partitioning). Så kallat Q&P-stål är ett intressant exempel inom 3G AHSS. Q&P-processen är en behandling i två steg. Steg ett innebär att stålet värms upp till en hög temperatur och sedan kyls ned till en kritisk temperatur (Quenching), vilket resulterar i en partiell omvandling av stålets struktur för att uppnå en optimal balans mellan stark och hård martensit och en mjukare men mer formbar austenit. I det andra steget (Partitionering) höjs stålets temperatur något igen för att tvinga kolatomer att diffundera från den nyligen bildade martensiten till den kvarvarande austeniten. Den då kolrika austeniten blir då stabil och omvandlas inte till martensit vid ytterligare kylning till rumstemperatur. För att på ett tillförlitligt sätt kunna producera denna blandade martensit-austenitstruktur på produktionsmässigt sätt krävs en noggrann utvärdering och testning av parametrarna för Q&P-processen, samt att man hittar den rätta balansen av legeringsämnen i stålet. Det optimala är att låta både formningsprocessen och Q&P-behandlingen ske i samma processsteg i en tillverkningskedja, och det har också varit det övergripande målet med projektet att studera just detta. Svetsning av dessa stål är naturligtvis viktigt eftersom det är en vanlig metod att sammanfoga olika fordonskomponenter inom industrin. Omfattande mekanisk provning har genomförts inom projektets ramar, både på provstavnivå (inklusive utmattningsprovning) och komponentnivå. Dessa visar att det är möjligt att använda Q&P-stål i presshärtningsprocessen och att den färdiga komponenten då verkligen får extrema egenskaper (som projektnamnet antyder), både vad gäller hållfasthet och duktilitet. Resultaten från projektet är mycket lovande, men det finns dock ett antal frågor, eller punkter som behöver undersökas ytterligare innan metoden kan sättas i produktion. Den viktigaste är kanske frågan om materialets utmattningsbeständighet, som inte uppvisar den förbättring som var förväntad vid projektets start. Vidare har svetsproblematiken adresserats med omfattande provning samt utveckling av både en ny process och nya tillsatsmaterial för att säkerställa att svetsbarheten av det Q&P-behandlade stålet. I tillägg till omfattande provning har hela tiden ett simuleringsperspektiv varit aktuellt. Resultat från den praktiska provningen har använts vid processimulering och har varit ett viktigt verktyg för att öka förståelsen för tillverkningsprocessen och hur den kan optimeras. Men, som nästan alltid vid forskning kring ett synnerligen utforskat område så som i detta projekt, så återstår behov av ytterligare forskning kring frågor som uppkommit under projektets gång. Det rör sig om bland annat vidare optimering av den kemiska sammansättningen hos stålet, robusthet i processen och kring stabiliteten hos restausteniten i färdig komponent.

2 Executive summary in English

2.1 Background

The European Commission's Climate Target Plan sets an EU-wide target for reducing net greenhouse gas (GHG) emissions by at least 55% by 2030, compared to 1990 levels. Such a target will require significant technological investments, including reducing CO₂ emissions in power generation, industry and transport. Reducing the weight of transport vehicles requires design changes that are not always practicable, either due to the lack of the required lightweight materials with the correct mechanical properties at a reasonable price, or lack of the correct

manufacturing method for the available materials, or both. Sheet metal forming is a strategic technology for the automotive and aerospace industries and their subcontractors. The importance of hot plate forming is also increasing in the heavy transport sector, with companies such as Scania and Volvo Trucks. Hot plate forming technology relies heavily on new knowledge from research, and is a technology that characterizes the industrial capacity of a modern industrial nation. Currently, the most important application for hot forming of sheet metal is the press hardening technique. The distinguishing feature of this technique is that hot steel sheets are formed and hardened in a one process step performed with cooled tools. The result is ultra-high strength steel components that can have complex shapes. The most common applications are in the automotive industry. The press hardening technology was invented in Sweden, and industrialized by SSAB's subsidiary Plannja Hardtech, later SSAB Hardtech and now Gestamp Hardtech. Press hardening technology has shown exponential industrial growth and has become a global technology. The main driver for the increased use of press-hardened components is concern for the environment through the use of ultra-high-strength press-hardened components. This allows lighter vehicle designs that aim for lower emissions and are also designed to maintain or increase passenger safety. Since the introduction of press-hardened structural components, the material used for ultra-high strength components is a boron alloy steel.

2.2 Aim, research questions and methodology

The aim of this project is to take press hardening technology to a new level, by introducing a new thermo-mechanical forming process based on Quenching and Partitioning (Q&P) and to explore a new steel composition suitable for this process. The improvements pursued in this project are expected to open the way to new technical solutions in the design of both cars and trucks and to contribute significantly to meeting future requirements for reduced emissions from the transport sector. Modern steels can be hot-formed and given extreme properties, such as ductility, tensile and fatigue strength, by optimizing the thermal and mechanical process steps along the entire process chain. For many products, designing properties according to end-user requirements, as well as tailoring properties in different parts of the product, is a major advantage. These desires could be achieved by optimizing the thermal and mechanical process steps along the whole process chain. With new steel compositions and development of a new Q&P processes for press hardening, a significant increase in the material properties of steel components was expected. The yield strength, fracture toughness and fatigue limit of the material could be increased by 30%, and the ductility of the material could be increased by 100% compared to the reference material (boron alloy steel) that is used today. All of these properties would be met by the same process.

The partners in this project represent all stages of the process chain for production of ultra-high strength steel components for automotive structures. The industrial partners have contributed to the project with industrial development and implementation of the research results. The approach was to first develop appropriate Q&P processes and associated simulation models. Then testing them at prototype level and on welding applications, followed by an industrial demonstrator tests at the end of the project. Parts of the project have been run as a PhD project while other parts have been run by senior researchers. This ensured that the long experience of research on simulation tools and Q&P processing of advanced high-strength steels that existed at the start of the project was utilized. The project has been divided into a number of work packages to which different parties have contributed, these are:

WP 1: Development of Q&P processes and simulation models (LTU, SSAB). In this work package, which consists of two parts, the material selection for further studies within the project has been made. Suitable thermal cycles for Q&P treatment of the selected steel grade have been studied for use in simulation and process validation. Existing simulation methods for the calculation of phase transformations in FEM calculations have been refined and calibrated. In the second part, relationships between the phase composition of the material and the mechanical properties such as strength, deformation, fracture and fatigue have been studied

including the influence of carbides and precipitates. Thus, the necessary data for prediction of deformation, strength and fracture properties have been evaluated.

WP 2: Application development and validation (Gestamp, SSAB, LTU, ESAB). Simulation-driven development of a manufacturing process based on Q&P has been carried out. The work has been validated using a test component and associated moulding tools. The influence of welding parameters on a Q&P treated steel has been studied. Spot welding and MAG welding have been performed with a filler material having the same chemical composition as the base material and simulations in order to optimize process parameters and an evaluation of weld mechanical properties and microstructure properties has been made.

WP 3: Industrial demonstrators (Gestamp, SSAB, LTU, ESAB, Scania). Two demonstrators have been built, one for press hardening of Q&P steel and one for MAG welding of a demonstration component. Product development and tool kit manufacturing have been carried out and a few components have been produced. Microstructure has been investigated and mechanical testing and FEM simulation of MAG welding have been carried out.

WP 4: Future Q&P steels (Swerim, LTU). Here the focus was on strategies for the development of a new high performance steel grade, which will be suitable for the new Q&P based press hardening process. Casting and rolling of a test alloy has been carried out and the material has then undergone a thermal Q&P cycle. Tests and evaluation of microstructure and mechanical properties were then carried out.

In addition to these work packages, there has also been an overall work package for project management and administration.

2.3 Objectives

The project is relevant to the objectives that the FFI Program focuses on in the call. The overall objective of the project is to strengthen the competitiveness of the Swedish automotive industry through the successful introduction of Q&P-treated advanced high strength steels in the production. This contributes to the preservation of jobs in the automotive industry in Sweden. The project promotes cross-industry cooperation as partners from the entire manufacturing chain are involved. Increasing the strength of steel in critical parts of a vehicle leads to higher toughness, which improves crash performance, or in other words, better crash safety. As the steel becomes stronger, it is also possible to give the structure a lower weight, which leads to reduced CO₂ emissions as it contributes to lower fuel consumption. This project addresses several objectives of the sub-program, the most relevant for this application being "competitiveness" and "lead time". As the introduction of Q&P technology in production can be done without additional costs, so the competitiveness of the Swedish automotive industry will be further increased. Since Q&P technology does not require any subsequent heat treatment steps, lead times in production will be shortened when the technology is introduced. This will reduce time to market (TTM) and time to volume (TTV). Flexibility in production will also increase and it will be possible to tailor the steel to specific desired properties from specific end-users. The technology is also energy efficient as only the amount of material needed for the component is heated. As a result, energy consumption during production can be reduced.

The objectives of the project can be summarized in the following points:

- To evaluate and characterize an existing steel material that has the potential to show significantly improved properties when subjected to a Q&P treatment.
- Improved properties with 30% increase in yield strength, 30% increase in tensile strength, 100% increase in elongation at failure and 30% increase in fatigue limit compared to conventional press hardened steel.

- To develop methods for modelling and prediction of microstructure strength, ductility, fracture and fatigue properties of the selected material when subjected to Q&P treatment.
- Establish manufacturing strategies to obtain extreme properties in components manufactured in processes that include Q&P treatment.
- Develop and validate a demonstrator component and a demonstrator for the validation of welding of Q&P-treated materials.
- Establish strategies for the development of new Q&P material based on the results of this study.

So the aim of the ExtremeSteels project has been to develop a new ultra-high strength steel that, when applied to the transport industry, could make a reasonable contribution to weight reduction. To ensure the usefulness of such a high-strength product, the potential manufacturing steps including hot stamping and welding has been taken into account.

2.4 Results and achievement

The aim of this project was to take press hardening technology to a new level by introducing a new thermo-mechanical forming process based on Quenching and Partitioning (Q&P), and also to present a new method to avoid the brittleness after welding of Q&P steels. Results of characterization and mechanical tests show that this objective is achieved by producing a material structure consisting of retained austenite to improve ductility and hardened martensite to increase the strength of the material. The desired yield and fracture stress was not achieved for any Q&P condition other than for water-cooled Q&P steels. However, the total ultimate elongation is increased by at least 200%, and in some cases even up to 300%. Although the intended yield strength and tensile strength are not achieved, both were within an acceptable range. This resulted in a 50% to 100% improvement in PSE (Product of Strength and Elongation), which is simply a measure of the toughness of the material. However, the results of fatigue tests have not shown higher absolute values of the fatigue limit for Q&P steels compared to conventional press hardening steels. Fractography of the samples showed that carbides act as initiation points for crack growth.

The project also included the development of a demonstrator component and a demonstrator for the validation of welding of Q&P-based materials. A procedure that combines welding with an additional induction heat treatment similar to the Q&P procedure was used, leading to phase transformation in the welded microstructure and the heat-affected zone. A completely new filler metal formulation with a higher level of silicon was then designed to meet the requirements of the base metal composition as well as the weldability and mechanical properties needed. The results showed that the use of the newly developed filler metal and Q&P treatment in the project led to:

- Reasonable weldability was obtained.
- Improvements in both tensile strength and ductility.
- A reduction in the differences in hardness in FZ, HAZ and in the base material.
- The absence of fresh martensite in FZ and a reduction in the number of notches in the weld zone when produced with the newly designed filler metal.

A thermo-mechanical model for finite element simulations of press hardening and simultaneous Q&P treatment has also been developed. The focus of these simulations has been to minimize the temperature differences in the part in order to obtain homogeneous material properties after the Q&P process. In parallel with the forming calculations, crash calculations have been carried out. An important objective of the crash calculations has been to limit the forces in order to evaluate the press hardening demonstrator built in the project in existing test equipment. The plane hardening tests and simulation work showed that the tool needs a high level of adaptability with respect to temperature and pressure. This is needed to handle the varying cooling rates in different areas. To facilitate material testing and control of process parameters, an omega profile (hat profile) was chosen as the geometry for the demonstrator. The

tool was designed to investigate different scenarios in terms of contact on different surfaces. The temperatures of the different tool parts can be controlled individually on the top side, live side and flanges to achieve the same pick out temperature. The most promising Q&P process identified by the project was a two-stage process where the demonstrator would be cooled to 340 °C in the first stage and then heated to 450 °C and held there for 60 s. In the partitioning stage, the temperature would not go above 450 °C.

At the time of writing, the tool has been manufactured and recently assembled. This is followed by the manufacture of ten hat sections made from Q&P steel and ten made of conventional press hardened steel, for reference. The demonstrator is being evaluated in two ways. Firstly, the mechanical properties are evaluated by tensile testing. Tensile test bars are laser-cut from the top, the face and from the flanges. Hardness and final phase composition are measured and then the impact performance of the two materials is evaluated by axial compression in a C-press. A closed profile is produced by welding together two hat profiles.

The project has led to the graduation of a technical doctor [2], with a specialization relevant to both the steel and automotive industries. It has contributed to increasing competence and improving skills in Q&P processing among participating industrial partners and at universities and research institutes. The project has also increased understanding of how thermo-mechanical processes affect microstructure and mechanical properties. This knowledge and understanding will be useful in future projects and applications as the field is not yet fully explored. A simulation tool has also been developed, which can predict the mechanical properties of the steel depending on the thermal history during press hardening, or vice versa. The simulation tool can indicate which thermo-mechanical treatment is needed to optimize the properties of highest interest for a given application. The knowledge gained from this project will also be implemented in undergraduate and graduate courses at the University. The results of the project will thus contribute to Sweden's international positioning in the field of Q&P technology. The research is also of interest to other projects in the rest of Europe and will make participation and successful applications to other EU funded programs more likely.

2.5 Conclusions and further research

The project has succeeded in carrying out an initial study on the potential of introducing the Q&P process in press hardening. One of the strengths of the project has been the good collaboration between academia, steelmaking, component manufacturing and end-users. Testing has been carried out at test specimen level (including fatigue testing) and at component level. Furthermore, the welding problem has been addressed with extensive testing and the development of both a new process and new additive materials. In addition to extensive testing, a simulation perspective has always been kept in mind. The results of the practical testing are intended to be applied to process simulation. However, as is almost always the case with research in a particularly unexplored area, such as this project, there remains a need for further research after the project. Examples of areas are further optimization of the chemical composition of the steel, robustness of the process and the stability of the retaining austenite in the finished component. Another question that has arisen during the course of the project is where the carbides observed were formed, during casting or after press hardening and Q&P treatment. Further development is required to understand the relationship between microstructure and fatigue initiation and crack propagation, in order to tailor the chemical composition and heat treatment for optimized fatigue resistance. Based on the mechanical tests of the project, it can be concluded that the developed material has a higher potential for energy absorption compared to fatigue loading.

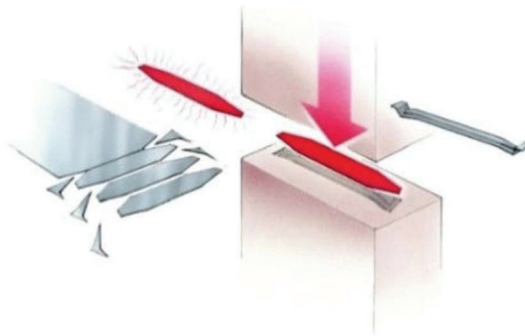
3 Bakgrund

Enligt Europeiska kommissionens Climate Target Plan har ett EU-omfattande mål för minskning av nettoutsläppen av växthusgaser (GHG) på minst 55 % till 2030, jämfört med 1990 års nivåer. Detta mål sätter EU på en balanserad väg mot klimatneutralitet till 2050. Ett sådant mål kommer att kräva betydande tekniska investeringar, för att bland annat minska koldioxidutsläppen i kraftproduktion, industri och transporter. Inom transportsektorn är viktminskning och därigenom

ökad lastkapacitet för den enhet som förbrukar bränsle, utbyggnad av elfordon och användning av bränslen med låga koldioxidutsläpp huvudelementen i en meningsfull minskning av växthusgaser.

Att minska vikten på transportfordon kräver designförändringar som inte alltid är praktiskt genomförbara, antingen på grund av avsaknaden av de erforderliga lättviktsmaterialen med korrekta fysiska och mekaniska egenskaper inom rimlig konsumentbudget eller brist på korrekt tillverkningsmetod för de tillgängliga materialen eller båda. Plåtformning är en strategisk teknologi för fordons- och flygindustrin samt deras underleverantörer i Sverige, representerade av stora företag som Volvo Cars, GKN, AP&T och Gestamp HardTech. Betydelsen av varmplåtformning ökar även inom den tunga transportsektorn, med företag som till exempel Scania och Volvo Lastvagnar. Tekniken för plåtformning i förhöjda temperaturer är starkt beroende av ny kunskap via forskning, och är en teknik som kännetecknar den industriella kapaciteten hos en modern industrination.

Den för närvarande viktigaste applikationen för varmförformning av plåt är presshårdningstekniken. Det som är kännetecknande för denna teknik är att varma stålplåtar formas och hårdas i ett processsteg som utförs med kylda verktyg, se fig. 1. Resultatet är ultrahöghållfasta stålkomponenter som kan ha komplexa former. De vanligaste applikationerna finns inom bilindustrin.



Figur 1. Schematisk presshårdningsteknik

Exempel på fordonskomponenter som tillverkas genom presshårdning bärande delar i karossen samt energiupptagande delar i fordonets krockskydd.

Presshårdningstekniken är uppfunnen i Sverige, i samarbete mellan Luleå tekniska högskola, numera Luleå tekniska universitet (LTU), och järnverket NJA, numera SSAB. Det industrialiserades av SSABs dotterbolag Plannja Hardtech, senare SSAB Hardtech och nu Gestamp Hardtech. Presshårdningstekniken har visat en exponentiell industriell tillväxt och har blivit en global teknologi. Den främsta drivkraften för den ökade användningen av presshårdade komponenter är omsorg om miljön genom användning av presshårdade komponenter med ultrahög hållfasthet. Detta ger lättare fordonskonstruktioner som syftar till mindre utsläpp och som dessutom är utformade för bibehållen eller ökad passagerarsäkerhet. Sedan introduktionen av presshårdade konstruktionskomponenter är materialet som används för ultrahöghållfasta komponenter ett borlegerat stål.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Detta projektets syfte är att ta presshårdningstekniken till en ny nivå, genom att introducera en ny termomekanisk formningsprocess som är baserad på Quenching and Partitioning (Q&P) och att utforska en ny stålkomposition som är lämplig för denna process. De förbättringar som eftersträfvats i detta projekt förväntas öppna upp vägen för nya tekniska lösningar i

konstruktionen av både personbilar och lastbilar samt avsevärt bidra till att möta framtida krav på minskade utsläpp från transportsektorn.

Moderna stål kan varmformas och ges extrema egenskaper, vad gäller t.ex. drag- och utmattningshållfasthet och duktilitet genom att optimera de termiska och mekaniska processtegen längs hela processkedjan. För många produkter är det en stor fördel att designa egenskaperna efter slutanvändarnas krav, samt skräddarsydda egenskaper i olika delar av produkten. Dessa önskemål skulle kunna uppnås genom att optimera de termiska och mekaniska processtegen längs hela processkedjan. Med den nya stålsammansättningen och utvecklingen av nya Q&P-processer för presshårdning, förväntades en betydande förbättring av stålkomponenternas materialegenskaper. Materialets flytspänning, brottspänning och utmattningsgräns skulle kunna öka med 30%, och materialets duktilitet (brottförlängning) skulle kunna öka med 100% jämfört med det idag använda referensmaterialet (borlegerat stål). Samtliga av dessa egenskaper skulle vara uppfyllda vid tillverkning i en och samma process.

Partnerna i detta projekt representerar alla steg i processkedjan, avseende tillverkning av ultrahöghållfasta stålkomponenter för fordonskonstruktioner, med hjälp av termomekanisk formning och andra relaterade processer. Industripartnerna har bidragit till projektet med industriell utveckling och implementering av forskningsresultaten. Tillvägagångssättet, eller gången i projektet var att först utveckla lämpliga Q&P-processer och tillhörande simuleringsmodeller. Därefter testa dem på prototypnivå och på svetsapplikationer, följt av en industriell demonstratortestning i slutet av projektet. Delar av projektet har drivits som ett doktorandprojekt medan andra delar har drivits av seniora forskare. Därmed var det säkerställt att den långa erfarenheten av forskning kring simuleringsverktyg och Q&P-behandling av avancerade höghållfasta stål som fanns vid projektets start togs tillvara.

Projektet har varit indelat i ett antal arbetspaket där olika parter har bidragit, dessa är:

WP 1: Utveckling av Q&P-processer och simuleringsmodeller (LTU, SSAB). I detta arbetspaket, som består av två delar, har materialvalet för fortsatta studier inom projektet gjorts. Lämpliga termiska cykler för Q&P-behandling av vald stålsort har studerats för att kunna användas vid simulerings- och process-validering. Programmet ThermoCalc har använts för att förutsäga fasdiagram och kritiska temperaturer för vald stålsort och karaktärisering av karbider och andra utfskiljningar har utförts. Befintliga simuleringsmetoder för beräkning av fastransformationer i FEM-beräkningar har förfinats och kalibrerats i detta arbetspaket.

I den andra delen av detta arbetspaket har samband mellan materialets fassammansättning och de mekaniska egenskaper såsom hållfasthet, deformation, brott och utmattningsstudier studerats. Även inverkan av karbider och andra utfskiljningar på de mekaniska egenskaperna har studerats. Därigenom har nödvändig data för prediktering av deformation, hållfasthet och brottegenskaper kunnat utvärderas.

WP 2: Applikationsutveckling och validering (Gestamp, SSAB, LTU, ESAB). Här har man arbetat med simuleringsdriven utveckling av tillverkningsprocess som baseras på Q&P. Arbetet har validerats med hjälp av en testkomponent och tillhörande formverktyg. Komponenttester har utförts för att validera deformations-, hållfasthets- och brottsimuleringar. Det har också gjorts en utvärdering av mikrostruktur och utmattningsgenskaper. I en annan del av detta arbetspaket har inverkan av svetsparametrar på Q&P-behandlat stål studerats. Simuleringar har utförts för att optimera processparametrar och det har gjorts en utvärdering av svetsmekaniska- och mikrostrukturegenskaper. Det har utförts punktetsning samt MAG-svetsning med ett tillsatsmaterial som har samma kemiska sammansättning som basmaterialet.

WP 3: Industriella demonstratorer (Gestamp, SSAB, LTU, ESAB, Scania). Även detta arbetspaket bestod av två delar. Det har byggts två demonstratorer, en för presshårdning av Q&P-stål och en för MAG-svetsning av en demonstrationskomponent. Det har genomförts produktutveckling och tillverkning av verktygssats och ett fåtal komponenter har tillverkats. Även

här har mikrostrukturen undersökts och det har utförts mekanisk provning samt FEM-simulering av MAG-svetsning.

WP 4: Framtida Q&P-stål (Swerim, LTU). Här focus legat på strategier för utveckling av en ny högpresterande stålsort, som skall vara lämplig för den nya Q&P-baserade presshärdningsprocessen. Syftet med detta arbetspaket är att ta fram en prototyp för ett nytt stål, i laboratorieskala samt materialdata som kan användas i numeriska beräkningar. Resultaten från detta arbete planeras att användas som input för eventuella fortsättningsprojekt kring utveckling av ett nytt stål som är tänkt att komma till användning i industriell skala. Gjutning och valsning av en testlegering har genomförts och materialet har därefter genomgått en termisk Q&P cykel. Därefter har tester samt utvärdering av mikrostruktur och mekaniska egenskaper genomförts.

Utöver dessa arbetspaket har det också funnits ett övergripande arbetspaket för projektledning och administration.

5 Mål

Projektet är av betydelse för de mål som FFI-programmet fokuserar på i utlysningen. Det övergripande målet i projektet är att stärka den svenska fordonsindustrins konkurrenskraft genom en framgångsrik introduktion av de Q&P-behandlade avancerade höghållfasta stålen i sin produktion. Det bidrar till att arbetstillfällena inom fordonsindustrin kan finnas kvar i Sverige. I projektet främjas tvärandustriellt samarbete eftersom parter från hela tillverkningskedjan är involverade. Projektet har genomförts i nära samarbete mellan industri, forskningsinstitut och universitet. Att öka stålets hållfasthet i kritiska delar av ett fordon leder till högre seghet, vilket förbättrar krockprestandan, dvs det leder till högre krocksäkerhet. När stålet blir starkare är även möjligt att ge konstruktionen en lägre vikt, vilket leder till minskade CO₂-utsläpp eftersom det bidrar till lägre bränsleförbrukning.

Detta projekt tar upp flera av delprogrammets mål, de mest relevanta för denna ansökan är "konkurrenskraft" och "ledtid". Eftersom införandet av Q&P-tekniken i produktionen kan ske utan extra kostnad kommer den svenska fordonsindustrins konkurrenskraft att öka ytterligare. Eftersom Q&P-tekniken inte medför behov av några efterföljande värmebehandlingssteg som kommer ledtiderna i produktionen att förkortas när tekniken införs. Detta minskar tiden till marknaden (TTM) och tiden till volymen (TTV). Flexibiliteten i produktionen kommer också att öka och det blir möjligt att skraddarsy stålet mot specifikt önskade egenskaper från specifika slutanvändare, såsom optimering av produktionen mot hållfasthet, seghet, utmattningsegenskaper etc. Tekniken är också energieffektiv då endast den mängd material som behövs för komponenten värms upp. Detta leder till att energiåtgången under produktionen kan minskas.

Projektets mål kan sammanfattas i följande punkter:

- Att utvärdera och karakterisera ett befintligt stålmateriale som har potential att visa väsentligt förbättrade egenskaper när de utsätts för en Q&P-behandling.
- Förbättrade egenskaper med 30 % ökad sträckgräns, 30 % ökad draghållfasthet, 100 % ökad brottförlängning och 30 % ökad utmattningsgräns jämfört med konventionellt stål för presshärkning.
- Att utveckla metoder för modellering och prediktering av mikrostruktur hållfasthet, duktilitet, brott- och utmattningsegenskaper för det valda materialet när det genomgått Q&P-behandling.
- Upprätta tillverkningsstrategier för att erhålla extrema egenskaper i komponenter som är tillverkade i processer som inkluderar Q&P-behandling.
- Utveckla och validera en demonstratorkomponent och en demonstrator för validering av svetsning i Q&P-behandlat material.

- Etablera strategier för utveckling av nytt Q&P-material baserat på resultaten i denna studie.

Så målet med projektet ExtremeSteels har varit att ta fram ett nytt ultrahöghållfast stål som vid tillämpning inom transportbranschen skulle kunna ge ett rimligt bidrag till viktminskning. För att säkerställa användbarheten av en sådan höghållfast produkt måste de potentiella tillverkningsstegen inklusive varmstansning och svetsning tas i beaktande.

6 Resultat och måluppfyllelse

Syftet med detta projekt var att ta presshårdningstekniken till en ny nivå genom att introducera en ny termomekanisk formningsprocess baserad på Quenching and Partitioning (Q&P), och även att presentera en ny metod för att undvika sprödheten efter svetsning av Q&P-stål. Resultat av karakterisering och mekaniska tester visar att detta mål uppnås genom framställning av en materialstruktur bestående av restaustenit som förbättrar duktiliteten samt martensit för att öka hållfastheten i materialet.

Den eftersträvade flyt- och brottspänningen uppnåddes inte för något Q&P-tillstånd annat än för vattenkyllt Q&P-stål. Dock ökas den totala brotttöjningen med minst 200 %, och i vissa fall ända upp till 300 %. Även om den avsedda sträckgränsen och draghållfastheten inte uppnås, låg båda inom ett acceptabelt intervall. Detta resulterade i en förbättring PSE (Product of Strength and Elongation) med 50 % till 100 %, som helt enkelt är ett mått på materialets seghet. Resultaten av utmattningstester har dock inte visat högre absoluta värden på utmattningsgränsen för Q&P-stål jämfört med konventionellt presshårdningsstål. Fraktografi av proverna visade att karbider fungerar som initiationspunkter för spricktillväxt. Men det behövs framtida studier för att förstå om karbiderna bildades under gjutning, eller efter presshårdning och Q&P-behandling. I jämförelse med ett tidigare arbete [1], är både styrkan och brottförlängningen som erhöles i projektets Q&P-prover något förbättrade.

I projektet ingick även framtagning av en demonstrator-komponent och en demonstrator för validering av svetsning av Q&P-baserat material. Projektgruppen beslutade att utföra provsvetsning i en procedur som kombinerar svetsningen med en extra induktionsvärmebehandling som liknar Q&P-proceduren, och som leder till fastransformation i den svetsade mikrostrukturen och den värmepåverkade zonen. En helt ny tillsatsmetallformulering med högre nivå av kisel designades sedan för att tillgodose kraven på basmetallens sammansättning samt svetsbarheten och de mekaniska egenskaperna som behövs. Resultaten visade att användningen av det i projektet nyutvecklade tillsatsmaterialet och Q&P-behandlingen resulterade i:

- Att en rimlig svetsbarhet erhöles.
- Förbättringar av både draghållfasthet och duktilitet.
- En sänkning av skillnaderna i hårdhet i FZ, HAZ och i basmaterialet.
- Man får inte färsk martensit i FZ och att antalet utskjningar i svetszonen sänks om den produceras med den nydesignade tillsatsmetallen..

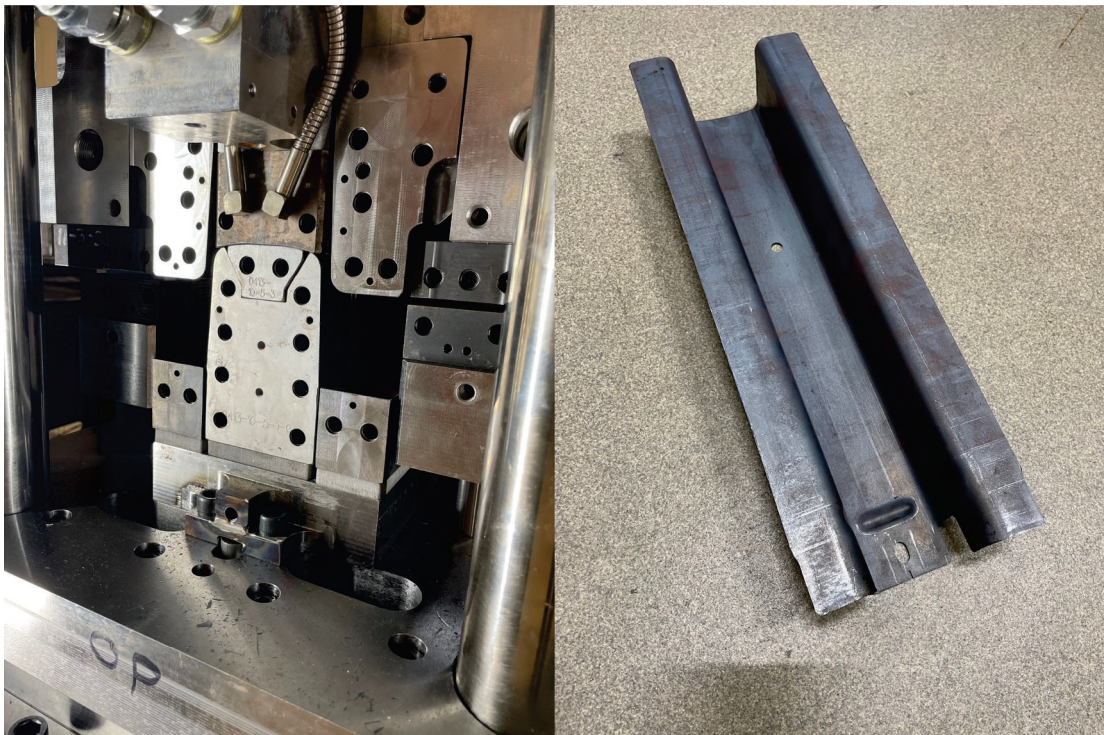
Det innebär att svetsmetoden i kombination med tillsatsmaterialet fungerar och uppfyller målet för detta projekt.

En annan viktig del i projektet är de aktiviteter som bedrivits i arbetspaket 4, nämligen att designa och testa ett koncept för ett nytt Q&P presshårdande stål. Ett ny stållegering för ändamålet har tagits fram och det har utförts experimentell verifiering av detta koncept, som skall ge ökad duktilitet med bibehållen hög hållfasthet. En provgjutning har genomförts och framgångsrikt varm- och kallvalsats till 2,2 mm tjocka plåtar, som sedan används för att tillverka dragprovstavar av. Dessa provstavar har därefter testats i en Gleeble-maskin för att studera de mekaniska egenskaperna hos materialet. Gleeble-försöken resulterade i ett kylt och partitionerat manganstål med en utmärkt kombination av styrka och duktilitet. Kombinerade

röntgendiffraktions- och dragprov visade att austeniten i mikrostrukturen omvandlas till martensit på under deformationen, vilket förbättrar deformationshårdnandet och därför också förbättrar materialets energiupptagningsförmåga och formbarhet. Drag-XRD-provning utfördes på Q&P-provstavarna för att relatera transformationen av restaustenit till sann töjning i ett enaxligt dragprov. Den då erhållna relationen mellan töjning och transformation gjorde det möjligt att anpassa den erhållna spännings-töjningskurvan till en konstitutiv modell baserad på iso-work som simulerar ett enaxligt test för ett Q&P-material med töjningsaktiverad fastransformation. Slutligen visades det att samma iso-work baserade konstitutiva modell kunde modellera spännings-töjningskurvan i ett unikt enaxligt dragprov, som relaterar den töjningsaktiverade omvandlingen av austenit till det observerade hårdnandet hos materialet. Data från dragprovning, resultat från XRD-test tillsammans med en konstitutiva modelleringen och EBSD-karakteriseringen av materialen, stödjer följande slutsatser:

- Den experimentella legeringen kunde Q&P-behandlas för att framgångsrikt producera en mikrostruktur innehållande martensit och filmliknande restaustenit.
- Materialet uppvisade en utmärkt kombination av formbarhet och styrka.
- Kombinationen av egenskaper, särskilt det utmärkta deformationshårdnandet, vilken är direkt relaterad till restaustenitens transformationen till martensit under dragprovet.
- Effekten av Q&P-processen demonstrerades.

En termomekanisk modell för finita elementsimuleringar av presshårdning och simultan Q&P-behandling har också tagits fram. Fokus vid formningssimuleringarna har varit att minimera temperaturskillnaderna i detaljen för att erhålla homogena materialegenskaper efter Q&P-processen. Parallellt med formningsberäkningarna har det genomförts krockberäkningar. Ett viktigt mål med krockberäkningarna har varit att begränsa krafterna för att kunna utvärdera den i projektet byggda presshårdningdemonstratorn i befintlig testutrustning. Denna demonstrator, samt en presshårdad komponent syns i bilderna nedan, och även på omslagsbilden.



Planhårdningsförsöken och simuleringsarbetet visade att verktyget behöver en hög nivå av anpassningsbarhet med avseende på temperatur och tryck. Detta för att kunna variera kylhastigheten i olika områden.

För att underlätta materialprovning och styrning av processparametrar valdes en omega-profil (hattprofil) som geometri för demonstratorn, se bilden till höger ovan. Verktøget designades för att undersöka olika scenarion vad gäller kontakt på olika ytor. Det är relativt höga livsidor och låg släppvinkel. De olika verktygsdelarnas temperaturer kan sedan styras individuellt på toppsida, livsida och flänsar för att nå samma utplockningstemperatur. Det går att justera verktøget för att kunna producera detaljer från 1 mm tjocklek till 2.5 mm tjocklek. Temperaturen kan justeras från 20 grader till 600 grader på de olika delarna och det finns 58 värmare som styrs via ett styr- och reglersystem.

Den mest lovande Q&P-process som projektet kommit fram till var en tvåstegsprocess där demonstratorn i första steget skulle kylas till 340 °C och sedan värmas upp till 450 °C och hållas där i 60 s. I partitioneringssteget skulle temperaturen inte överstiga 450 °C. Eftersom partitioneringssteget sker i en andra ugn beslutades det att ha en ugnstemperatur på 450 °C. När detta skrivs har verktøget tillverkats och nyligen monterats ihop. Därefter följer tillverkning av tio stycken hattprofiler av Q&P-stålet samt tio stycken av konventionellt presshärdat stål som referens. Demonstratorn utvärderas på två sätt. Dels genom att de mekaniska egenskaperna utvärderas genom dragprovning. Dragprovstavar laserskärs från toppsida, livsida och från flänsar. Hårdhet och slutlig fassammansättning kommer att bestämmas och därefter utvärderas krockprestandan för de två materialen genom axiell tryckning i en C-press. En sluten profil tillverkas genom att svetsa samman två hattprofiler.

Projektet har lett till examination av en teknisk doktor [2], med en specialisering som är relevant för både stål- och fordonsindustrin. Det har bidragit till att öka kompetens och förbättra färdigheterna kring Q&P-behandling hos deltagande industripartners och vid universitet och forskningsinstitut. Projektet har även ökat förståelsen för hur termomekaniska processer påverkar mikrostruktur och mekaniska egenskaper. Denna kunskap och förståelse kommer väl till pass i kommande projekt och ansökningar eftersom området ännu ej är färdigutforskat. Ett simuleringsverktyg har också utvecklats, som kan förutsäga stålets mekaniska egenskaper beroende på den termiska historien under presshärdat, eller vice versa. Simuleringsverktyget kan indikera vilken termomekanisk behandling som behövs för att optimera de egenskaper som är av högst intresse för en viss applikation. Kunskapen från detta projekt kommer också att implementeras i kurser på grundnivå och på avancerad nivå vid universitetet. Det kommer främst att gälla ingenjörstudenter inom materialvetenskap och maskinteknik. När dessa ingenjörer är redo med sin utbildning kommer de att sprida kunskapen till sina framtida industriella positioner. Kursmaterial kommer att utvecklas som även skulle kunna spridas till industrin genom industrikurser. Kunskapen om Q&P-behandling kommer även att ingå i en doktorandkurs om stål som ges för doktorander vid LTU, där det även kan finnas plats för doktorander vid andra universitet. Resultaten från projektet bidrar därmed till att Sverige kan positionera sig internationellt inom området Q&P-teknik. Forskningen är också av intresse för projektet i övriga Europa och kommer att göra deltagande i, och ansökningar till andra EU-finansierade program mer sannolika.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	1) Spridning har skett genom publika artiklar och presentationer. 2) Samtliga av projektets deltagare har fått en god kunskap om det framtagna stålets egenskaper, om lämpliga tillverknings- och sammanfogningsprocesser samt om lämpliga sätt att värmebehandla stålet. 3) Lämpligt tillsatsmaterial vid svetsning av det nya materialet har tagits fram, och kunskapen därom är tillgänglig för alla som vill använda det nya materialet i egna tillämpningar.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Informationsspridning har skett till andra projekt vid LTU och Swerim.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Resultatet av projektet har delgivits produktutvecklingsprojekt inom Scania och Gestamp HardTech
Introduceras på marknaden		Ingen marknadsintroduktion är planerad när detta skrivs
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		Inte aktuellt

7.2 Publikationer

Forouzan, Farnoosh. *Increasing phase transformation rate in advanced high strength steel applications. Doktorsavhandling, sammanläggning, 2019, ISBN: 978-91-7790-324-6*

F. Forouzan, A. Guitar, E. Vuorinen, F. Mücklich, "Effect of carbon partitioning, carbide precipitation and grain size on brittle fracture of Ti-alloyed steel during welding and Q&P process", *Metals* 8 (10), 747, 2018.

F. Forouzan, L. Borasi, E. Vuorinen, F. Mücklich, "Optimization of quenching temperature to minimize the micro segregation induced banding phenomena in quenching and partitioning (Q&P) steels", *Steel Research International*, 90 (1), Article ID 1800281, 2019.

F. Forouzan, L. Borasi, E. Vuorinen, F. Mücklich, "Process Control Maps to Design an Ultra-High Strength-Ductile Steel", under review in *Materials Science and Technology*, submitted Jan 2019.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har lyckats med att genomföra en initial studie kring potentialen med att introducera Q&P-processen inom presshårdning. En av styrkorna i projektet har varit det goda samarbetet mellan akademien, ståltillverkning, komponenttillverkning och slutanvändare. Provning har genomförts på provstavnivå (inklusive utmattningsprovning) och på komponentnivå. Vidare har

svetsproblematiken adresserats med omfattande provning samt utveckling av både en ny process och nya tillsatsmaterial. I tillägg till omfattande provning har hela tiden ett simuleringsperspektiv varit aktuellt. Resultaten från den praktiska provningen är tänkt att tillämpas vid processimulering. Men som nästan alltid vid forskning kring synnerligen outforskat område, så som det här projektet, så återstår efter projektet behov av ytterligare forskning. Exempel på områden är vidare optimering av den kemiska sammansättningen hos stålet, robusthet i processen och kring stabiliteten hos restausteniten i färdig komponent. En annan fråga som uppkommit under projektets gång är var de karbiderna som observerats bildats, under gjutning eller efter presshårdning och Q&P-behandling. Ytterligare utveckling krävs för att förstå sambandet mellan mikrostrukturen och utmattningsinitieringen samt fortplantningen av sprickor, för att skraddarsy den kemiska sammansättningen och värmebehandlingen för en optimerad utmattningsbeständighet. Baserat på de mekaniska testerna inom projektet kan man dra slutsatsen att det utvecklade materialet har en större potential för energiupptagning jämfört med utmattningsbelastning.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Partner	Org. nummer	Kontaktperson	e-mail
Luleå tekniska universitet	202100-2841	Jonas Edberg	jonas.edberg@ltu.se
Swerim	556585-4725	Tuomo Nyysönen	tuomo.nyysonen@swerim.se
ESAB	556005-7738	Kamelia Dalaei	kamellia.dalaei@esab.se
Scania	556084-0976	Henrik Sieurin	henrik.sieurin@scania.com
SSAB	556016-3429	Joachim Larsson	joachim.larsson@ssab.com
Gestamp HardTech	556387-7330	Greger Bergman	gbn@se.gestamp.com

10 Referenser

[1] EP Vuorinen, AG Özügürler, JC Ion, K Eriksson, "Hot forming of ultra-fine-grained multiphase steel products using press hardening combined with quenching and partitioning process", MC Somani, Metals 9 (3), 357.

[2] Forouzan, Farnoosh, "Increasing phase transformation rate in advanced high strength steel applications", Doctoral thesis, Luleå University of Technology, ISBN: 978-91-7790-324-6