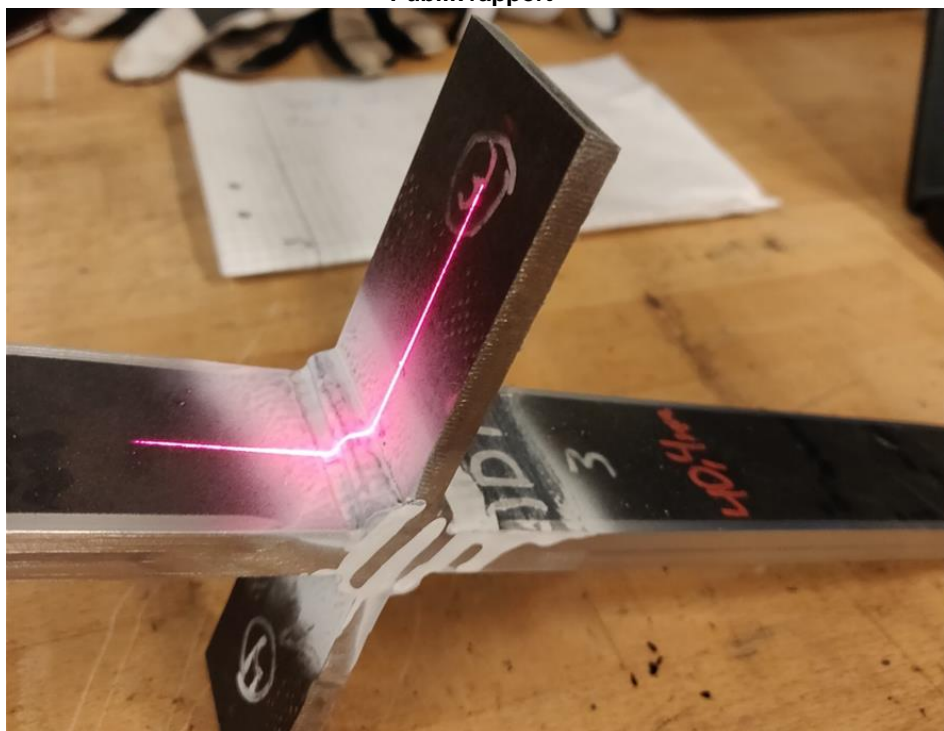


Robusthet för svetsefterbehandling med HFMI för ökad utmattningshållfasthet i svetsade strukturer (ROMI) - Förstudie

Publik rapport



Författare: Rickard Aldén, Taina Vuoristo
Datum: 2019-08-23
Projekt inom FFI Hållbar produktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	5
7 Spridning och publicering	6
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	6
7.2 Publikationer	6
8 Slutsatser och fortsatt forskning	6
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	8

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.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Efterbearbetning av svetsförband utförs för att förbättra utmattningsegenskaperna. Exempel på efterbehandlingsmetoder av svetsar är TIG-behandling, slipning och HFMI (High Frequency Mechanical Impact). Efterbehandling av svetsar utförs i övergången mellan svets och grundmaterial, i svetstån. HFMI har visat sig att vara en effektiv och användarvänlig metod för förbättring av utmattningshållfasthet av svetsade strukturer. Den gynnsamma effekten beror huvudsakligen på deformationsenergin per intryck. Det påverkade materialet deformeras plastiskt vilket orsakar förändringar i mikrostrukturen och den lokala geometrin såväl som restspänningstillståndet i det behandlade området (tryckspänningar introduceras).

Enligt rekommendationerna från International Institute of Welding (IIW) [1], bör svetsen före HFMI-behandlingen uppfylla acceptansgränserna för kvalitet B i ISO 5817 (högsta svetskvalitetsklass). I produktion når svetsen emellertid inte alltid den högsta svetskvalitetsnivån B på grund av en naturlig variation i svetsprocessen, positionen osv. Detta kommer att resultera i områden med lägre svetskvalitet såsom svetskvalitetsnivå C eller D. I fall dessa områden med lägre svetskvalitetsnivå är HFMI-behandlade (utan slipning), kommer efterbehandlingen att resultera i en variation av utmattningshållfasthet eller är HFMI-processen tillräckligt robust så att dessa svetskvalitetsvariationer kan tolereras? Skulle man kunna HFMI behandla även sämre svetsar och ändå få ökad utmattningshållfasthet? Målet med denna förstudie var att besvara dessa frågor för ett vanligt fall, icke-lastbärande kälsvetsförband (korsprovstav). Både experiment och finitelementanalys (FEA) har genomförts.

Huvudresultatet av denna förstudie är att även HFMI-behandlad svets med svetsklass D visar utmattningslivsförbättringar som faller inom rekommendationerna för utmattningslivslängd för HFMI-behandling av svets av svetsklass B. Således har HFMI-behandlingen i denna begränsade förstudie visat sig vara robust mot variationer i svetsklass.

Inget signifikant inflytande från HFMI-operatören eller HFMI-utrustningen på utmattningslivslängd kunde fastställas. HFMI-verktygsradie hade däremot en betydande effekt på utmattningslivslängden då en verktygsradie på 2 mm visade avsevärt högre utmattningslivslängd jämfört med 1,5 mm verktygsradie. Det bör noteras att i denna förstudie var omfattningen av utmattningsprovningsen begränsad till att endast omfatta en lastnivå med sex parallella prover.

I FE-analysen användes två programvaror för att skapa modeller från 3D-laserskanningsmätningar som skulle användas i spänningsanalysen. Av dessa två ansågs NX vara mer lämplig. Baserat på de laserskannade geometrierna kan positionerna för spänningskoncentrationer i HFMI-behandlade svetsar bestämmas med FEA. Analyserna visade att de gav en god indikation på initieringspunkt för utmattningsbrott.

Resultaten visar väldigt stor potential för att utvidga användningsområdet för HFMI genom att kunna inkludera lägre svetsklasser än vad som accepteras idag. När rekommendationer för användning av HFMI revideras så att de inkluderar även lägre svetsklasser, kan t ex antalet kassationer i svetsprocessen minska avsevärt vilket ger stora kostnadsbesparingar och effektivare användning av resurser. Dock krävs mer forskning för att kunna ta fram mer data och nya rekommendationer för HFMI-behandling av de lägre svetsklasserna. Exempelvis måste kompletta utmattningskurvor (SN) för HFMI-behandlade svetsar i svetsklass D tas fram för att säkerställa den i denna förstudie observerade gynnsamma effekten vid olika lastnivåer. För att komma närmare industriell tillämpning bör demonstratorer/pilottester samt livscykelkostnadsanalyser (LCC) inkluderas för att kvantifiera lönsamheten för HFMI-behandlade, utmattningsbelastade svetsar. Därmed skulle komponenter som är mycket kostsamma att producera idag på grund av höga krav i svetsklassen kunna produceras snabbare med lägre krav på svetsklass och en efterföljande lokal HFMI-behandling för att uppnå samma eller bättre utmattningslivslängd som svetsar med höga initiala krav.

2 Executive summary in English

HFMI (High Frequency Mechanical Impact) has emerged as an effective method for post-weld fatigue strength improvement of welded structures. The beneficial effect depends mainly on the impact energy per indentation. The impacted material is highly plastically deformed causing changes in the material microstructure and the local geometry as well as the residual stress state in the region of impact (compressive stresses are induced).

According to recommendations from the International Institute of Welding (IIW) [1], the weld prior to HFMI treatment should meet the acceptance limits of quality B in ISO 5817 (highest weld quality class). In production, the weld does not always reach the highest weld quality level B due to a natural variation in the welding process, position etc. This will result in areas with lower weld quality such as weld quality level C or D. Assuming that this area with lower weld quality level is HFMI treated (without grinding), will this result in a variation of fatigue strength or is the HFMI process robust enough so that those weld quality variations can be tolerated? Could also welds with lower weld classes be treated and result in high fatigue strength improvement? The goal of this pre-study was to answer these questions for cases of non-load carrying fillet welds using both experiments and finite element analysis (FEA).

The main result of this pre-study is that HFMI treated weld with weld class D shows fatigue life improvements that fall within the recommendations for fatigue life of HFMI treatment of weld of weld class B. Thus, the HFMI treatment in this pre-study has shown to be robust to deviations in the weld class.

No significant influence from the HFMI operator or HFMI equipment on the fatigue life was found in this pre-study. However, the scatter in fatigue testing results varied with HFMI operator and indicates that different HFMI operators could produce more or less consistent treatments. A considerable effect on fatigue life from HFMI tool radius was found, where the 2 mm tool radius showed considerably greater fatigue life compared to the 1.5 mm tool radius. It should be noted that in this pre-study the scope was limited to include only one load level.

In the FE-analysis, two softwares were used to create models from the 3D laser scan measurements to be used in stress analysis. Of these two, NX was considered more suitable. Based on the scanned geometries, the positions of stress concentrations in HFMI-treated welds could be determined using FEA. The analyses showed to give a good indication of where the failure would happen.

The results of this pre-study show a great potential for widening the area of use for the HFMI treatment. However, in order to fully utilize the benefits of HFMI on lower weld classes than what is recommended today, further studies are necessary. For example, the beneficial effect of HFMI on the fatigue life of weld class D should be verified by performing fatigue testing at several load levels for complete S/N curves. Effect of process parameters should also be studied further in order to update the guidelines on HFMI.

Demonstrators/trials in industry, and Life cycle cost analysis (LCA), should also be carried out. For example, could a component that is very costly to produce today because of high demands in weld class be produced more rapidly with lower weld class demands and subsequently HFMI treated to equal or better fatigue life? Can we reduce scrapping of components by reducing demand on weld class and instead HFMI treat the weld locally to reach equal or better fatigue life?

Further evaluation of FEA with scanned weld surface, and incorporation of the beneficial compressive residual stresses in the analysis would enable development of more accurate fatigue life predictive models, that are based on both deterministic and probabilistic methods.

3 Bakgrund

Efterbearbetning av svetsförband utförs för att förbättra utmattningsegenskaperna. Exempel på efterbearbetningsmetoder av svetsar är TIG-behandling, slipning eller HFMI (High Frequency Mechanical Impact). Detta utförs övergången mellan svets och grundmaterial, i svetstån. Fördelar

med att använda HFMI är att metallen plasticeras lokalt vilket ändrar geometri, mikrostruktur och inducerar gynnsamma trycksrestspänningar. Men IIW har publicerat rekommendationer att HFMI bara bör utföras på förband av högsta svetsklass, B enligt ISO 5817, för lyckat resultat. I svetsproduktion uppstår dock variationer som gör att högsta svetsklass inte alltid uppnås, vilket gör att även slipning kan behövas före HFMI. I denna förstudie har skillnaderna i utmattningsegenskaper hos HFMI behandlade förband som har olika svetsklass, B och D undersökts.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

I svetsproduktion uppstår variationer som gör att högsta svetsklass inte alltid uppnås, vilket gör att slipning kan behövas före HFMI-behandling. Syftet med denna förstudie var att undersöka hur robust HFMI-processen är mot variationer i svetskvalitet.

I projektet tillverkades utmattningsprovstavar (icke-lastbärande korsfogar) med svetskvalitet B och D. Provstavar med svetskvalitet D HFMI-behandlades med totalt fyra olika metoder för att studera effekten av variationer i HFMI-maskin, operatör och verktygsradie. Provstavar utan efterbehandling (As-Welded) valdes för referens. Den experimentella matrisen bestod därmed av totalt sex olika testserier. Utmattningsprovning utfördes vid en lastnivå med sex parallella prov per serie.

Svetsgeometrin uppmättes mha laserscanning före utmattningsprovning. Dessa resultat användes för att skapa 3D-modeller för vidare FE-analyser. Två olika mjukvaror utvärderades för att skapa 3D-modellerna som sedan användes för att beräkna de maximala spänningskoncentrationerna på både referens- och HFMI-behandlade provstavar.

5 Mål

Målet med förstudien var att klargöra hur robusta HFMI (High Frequency Mechanical Impact) processerna är idag avseende möjligheten att livslängdsförbättra svetsförband av olika svetskvalitet, samt hur utmattningslivet påverkas.

6 Resultat och måluppfyllelse

Utmattningsresultaten i denna studie visar att de HFMI-behandlade svetsarna som ursprungligen var svetsklass D uppnår en utmattningshållfasthet som är i samma nivå som med dagens rekommendationer kan uppnås för svetsklass B genom HFMI-behandling. Utmattninglivslängden vid den studerade lastnivån var i medel ca 50 000 lastväxlingar för de icke-behandlade svetsar i svetsklass D medan medellivslängden för HFMI-behandlade var över 550 000 lastcykler. Baserat på resultaten finns det stor potential i HFMI-behandlingen för de lägre svetsklasserna C och D.

Robustheten i HFMI-behandlingen studerades vidare med avseende på HFMI-operatör, HFMI-utrustning, HFMI-verktyg och svetsklass. De viktigaste resultaten från förstudien listas nedan:

- Ett betydande inflytande på HFMI-verktygsradien på utmattninglivslängden observerades.
- HFMI-processtid och antal operationer påverkade utmattninglivet beroende på verktygets diameter
- Inget signifikant inflytande från HFMI-operatören på utmattninglivslängd observerades
- Ingen signifikant påverkan från HFMI-utrustningen observerades.

I FE-analysen utvärderades två olika mjukvaror för att skapa modeller från 3D-laserskanningsmätningar. Modellerna användes vidare i FE-analyser av de olika svets- och efterbehandlingsvarianterna. Baserat på de laserskannade geometrierna kunde positionerna för spänningskoncentrationer i HFMI-behandlade svetsar bestämmas med FEA. Analyserna gav en god indikation på var utmattningsbrott skulle initieras i experimenten.

Resultaten visar väldigt stor potential för att utvidga användningsområdet för HFMI för att inkludera svetsklasser under vad som accepteras idag. Om rekommendationer för användning av HFMI revideras så att de inkluderar även lägre svetsklasser, skulle t ex antalet kassationer kunna minskas avsevärt vilket ger stora kostnadsbesparingar och effektivare användning av resurser. Fördelarna med HFMI kan då utnyttjas inom ytterligare användningsområden, vilket leder till ökad utmattningstidslängd i flera olika tillämpningar.

Eftersom detta var en förstudie var omfattningen av den experimentella studien relativt begränsad, dvs. lastnivån begränsades till en nivå och antalet prover per serie var begränsat till sex.

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	Kunskap inom området har ökats genom rapportering inom projektgruppen och publiceringar (se nedan)
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Fortsättningsprojekt för att bli vidare verifiera robustheten av HFMI-processen kommer att sökas under 2019
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	I ett efterföljande fullprojekt/fortsättningsprojekt
Introduceras på marknaden	X	I ett efterföljande fullprojekt/fortsättningsprojekt
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut	X	I ett efterföljande fullprojekt/fortsättningsprojekt

7.2 Publikationer

R. Aldén: "HFMI: Krångel eller möjlighet?", Svetsen, Sid 35, Nr. 2-2019.

Z. Barsoum, R. Aldén, T. Vuoristo, C. Rosberg and M. Al-Emrani, "Effect of weld quality on the fatigue life improvement of welded joints using HFMI techniques" (under preparation, to be submitted to Welding in the World - The International Journal of Materials Joining

Carl Rosberg, Finite element analysis and laser scanned welded and HFMI treated joints, MSc Thesis in Solid Mechanics, KTH, 2019.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Följande slutsatser kunde dras baserat på förstudien:

- De experimentella resultaten visar att de HFMI-behandlade svetsarna som ursprungligen var svetsklass D, uppnår en utmattningshållfasthet som är i samma nivå som med dagens rekommendationer kan uppnås för svetsklass B genom HFMI-behandling: vid den studerade lastnivån är livslängden ca 12 gånger längre för de HFMI-behandlade svetsarna i klass D jämfört med obehandlade svetsar.
- Resultaten visar väldigt stor potential för att utvidga användningsområdet för HFMI för att inkludera svetsklasser under den nivån som accepteras idag.

- FE-analyser som baseras på laserskannade svetsgeometrier kan användas för att prediktera positioner av maximala spänningskoncentrationer i HFMI-behandlade komponenter.

Fortsatt forskning inom applicering av HFMI-behandling krävs för att kunna ta fram nya rekommendationer för behandling av de lägre svetsklasserna. För att säkerställa den i denna studie observerade gynnsamma effekten vid olika lastnivåer måste kompletta utmattningskurvor (S/N) för HFMI-behandlade svetsar i svetsklass D tas fram. Flera verktygsgeometrier och olika långa processtider behöver inkluderas i den experimentella studien för att undersöka deras påverkan på utmattningstidslängden. Det kan vara nödvändigt att införa HFMI-rekommendationer (t ex processtid) baserade på olika svets- och verktygsgeometrier, t ex. att en stor HFMI-verktygsradie och liten svetståradie behöver en längre HFMI-processtid jämfört med mindre HFMI-verktygsradie och / eller större svetståradie.

Restspänningsmätningar för att studera sambandet mellan restspänningar, deformationer pga HFMI-behandlingen och utmattningstidslängd bör också inkluderas. Restspänningsresultaten skulle vidare behöva inkluderas i FEA med skannad svetsyta för att utveckla mer exakta predikteringsmodeller för utmattningstidslängden, både deterministiska och sannolikhetsbaserade metoder.

För att komma närmare industriell tillämpning bör demonstratorer/pilottester med livscykelkostnadsanalyser (LCC) inkluderas för att kvantifiera lönsamheten för HFMI-behandlade, utmattningsbelastade svetsar. Kan till exempel en komponent som är mycket kostsam att producera idag på grund av höga krav i svetsklassen produceras snabbare med lägre krav på svetsklass och därefter HFMI behandlas för att nå samma eller bättre utmattningstidslängd? Kan vi minska skrotning av komponenter genom att minska kravet på svetsklass och istället HFMI behandla svetsen lokalt till samma eller längre utmattningstidslängd?

Att mekanisera HFMI skulle möjliggöra kostnadsbesparingar och förbättrad arbetsmiljö. Det skulle därför vara intressant att undersöka om HFMI är robust i en mekaniserad miljö, dvs. då HFMI är monterad på en robot. Detta skulle syfta till att hitta om det finns en skillnad i utmattningstidslängd mellan manuell och mekaniserad HFMI.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

SSAB

TOYOTA
MATERIAL HANDLING



**Ecovative Solutions
Scandinavia AB**

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Mikael Reinberth	SSAB
Torbjörn Narström	SSAB
Leif Bäckman	SSAB
Christian Thune	Toyota
Angelica Djurberg	Toyota
Rolf Andersson	Toyota
Hasse Olsson	VCE
Erik Åstrand	WeldHIT
Anders Olson	Ecovative Solutions
Zuheir Barsoum	KTH
Carl Rosberg	KTH
Mohammad Al-Emrani	Chalmers
Rickard Aldén	Swerim
Taina Vuoristo	Swerim