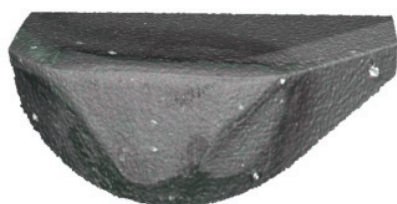
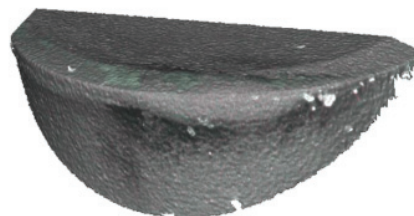


Hållbar produktrealisering av gjutjärnskomponenter i en längre värdekedja

– Publik rapportversion



a) Färskt gods: VB = 433 μm , 65 detaljer, 14 korrigeringar



b) Moget gods: VB = 97 μm , 100 detaljer, 4 korrigeringar

Författare:	Jan-Eric Ståhl, Rebecka Lindvall, Lena Magnusson Åberg och Christina Windmark
Med stöd och underlag från:	Ru Lin Peng, Oleksandr Gutnichenko, Sebastian Sirén, Samuel Awe, Rachid M'Saoubi och Daniel Johansson
Datum:	2023-02-03
Projekt inom:	Hållbar produktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation



1. Innehållsförteckning

1	Sammanfattning.....	3
2	Executive summary	4
3	Projektets bakgrund.....	5
4	Syfte, forskningsfrågor och metod.....	7
5	Projektets mål	10
6	Resultat och måluppfyllelse	12
6.1	Anpassning mellan arbetsmaterialet och verktygsmaterialet	12
6.2	Anpassning av skärprocessen till allmänt låg skärbarhet	13
6.3	Hypoteser om kallåldring och dess mekanismer	15
6.4	Karakterisering av gjutjärn med allmänt låg skärbarhet.....	16
6.5	Anpassning och användning av Coldings ekvation för fräsning	17
6.6	Tillverkningskostnader bl.a. baserade på Coldings ekvation	18
6.7	Pandemins effekter på erhållna resultat	19
7	Spridning och publicering.....	20
7.1	Kunskaps- och resultatspridning	20
7.2	Publikationer	21
7.3	Interna rapporter och arbetsmaterial.....	22
8	Slutsatser och fortsatt forskning	24
8.1	Projektets utmaning och svårighetsgrad	24
8.2	Samverkan med andra projekt.....	24
8.3	Fortsatt forskning och tillhörande rekommendationer	25
9	Deltagande parter och kontaktpersoner	26
10	Referenser och utvalda rapporter.....	27

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

Projektet har syftat till att minska effekterna och spridningen i gråjärns skärbarhetsuppträdande och har som mål att uppnå en förutsägbar och hållbar tillverkningsprocess. Projektet har resulterat i en rad dokument i form av interna rapporter, examensarbeten samt vetenskapliga artiklar. Provning både industriellt och i laboratoriemiljö visar att cBN-baserade verktyg påverkas mest jämfört med keramer och belagd hårdmetall vid bearbetning i nygjutet och färskt gråjärn. Är inte materialet åldrat i tillräcklig omfattning erhålls ofördelaktiga resultat som påverkar kostnadsbilden markant, som exempelvis ökat behov av korrigeringar av verktygets position p.g.a. okontrollerat verktygsslitage, ökade verktygskostnader p.g.a. många extra verktygsbyten och ökad cykeltid [1B1]. Ökade kostnader vid bristande åldring av gjutgodset har resulterat bl.a. i ett ekonomiskt välmotiverat nybyggt mellanlager hos ett av de medverkande referensföretagen. Denna byggnad uppfördes mellan gjuteri och bearbetningsverkstad.

Problematiken kring åldring har öppnat flera frågeställningar både industriellt och akademiskt, bl.a. har det konstaterats att gjutgodsets svalningstid påverkar den slutliga skärbarheten, troligen via åldringen men även p.g.a. spårämnen och föroreningar. Av denna anledning har begreppet initialåldring införts för att därigenom uppmärksamma berörda gjuterier på att den viktiga svalningstiden mellan cirka 620 °C ner till cirka 100 °C inte får gå för snabbt. Det är, och har visat sig vara, mycket svårt att särskilja bristande åldring av gjutgodset från allmänt låg skärbarhet orsakat av t.ex. oönskade inneslutningar. Detta förhållande är särskilt accentuerat vid användning av hårdmetallbaserade verktyg.

Ytterligare studier måste göras för att förstå sambanden mellan kallåldring och förekomsten av spårämnen och föroreningar, denna förståelse kan också utgöra en viktig grund för att förstå hela orsaken till mekanismen bakom kallåldring. Indikationer finns på att erforderlig kallåldringstid ökar med förekomsten av vissa spårämnen.

Flera försök har gjort med att återställa eller föryngra ett gjutgods genom värmebehandling exempelvis i 620 °C under 30 minuter och därefter långsam svalning till rumstemperatur. I dessa fall har arbetsmaterialet till del uppvisat återställda egenskaper men inte fullt ut de egenskaper som ett färskt gjutgods har. Resultaten indikerar att åldringsprocessen inte är fullt reversibel. Återlösningen av eventuell partikel- eller klusterbildning kan troligtvis inte helt jämföras med traditionell utskiljningshärdning (partikelhärdning).

Problematiken kring spårämnen och föroreningar kommer att accentueras framöver när en hållbar cirkulär ekonomi skall implementeras, detta då absoluta merparten av metalliska komponenter baseras på återvunnet material där primär metall måste minimeras. I dag åtgår allt för stora andelar primär metall för att korrigera och späda ut spårämnen och oönskade element i smältan. Här krävs ytterligare forskning för att kunna uppnå hållbar cirkularitet samtidigt som nya konstruktionsprinciper måste utvecklas som möjliggör återvinning utan att blanda och degradera material under hela materialets livscykel.

Resultaten visar också att stora konkurrensfördelar kan uppnås om aktuella arbetsmaterial optimeras mot användning av antingen hårdmetallverktyg eller användning av cBN-baserade verktyg. I båda dessa fall ges ett visst utrymme för att också använda keramiska verktyg som vid rätt användning kan medföra acceptabla tillverkningskostnader. Vid inköp av nya bearbetningsmaskiner är det viktigt att ta höjd för ökad användning av cBN-baserade skärverktyg som i vissa fall kan halvera cykeltiden genom högre skärdata, men också bidra till en mer långsiktig hållbarhet.

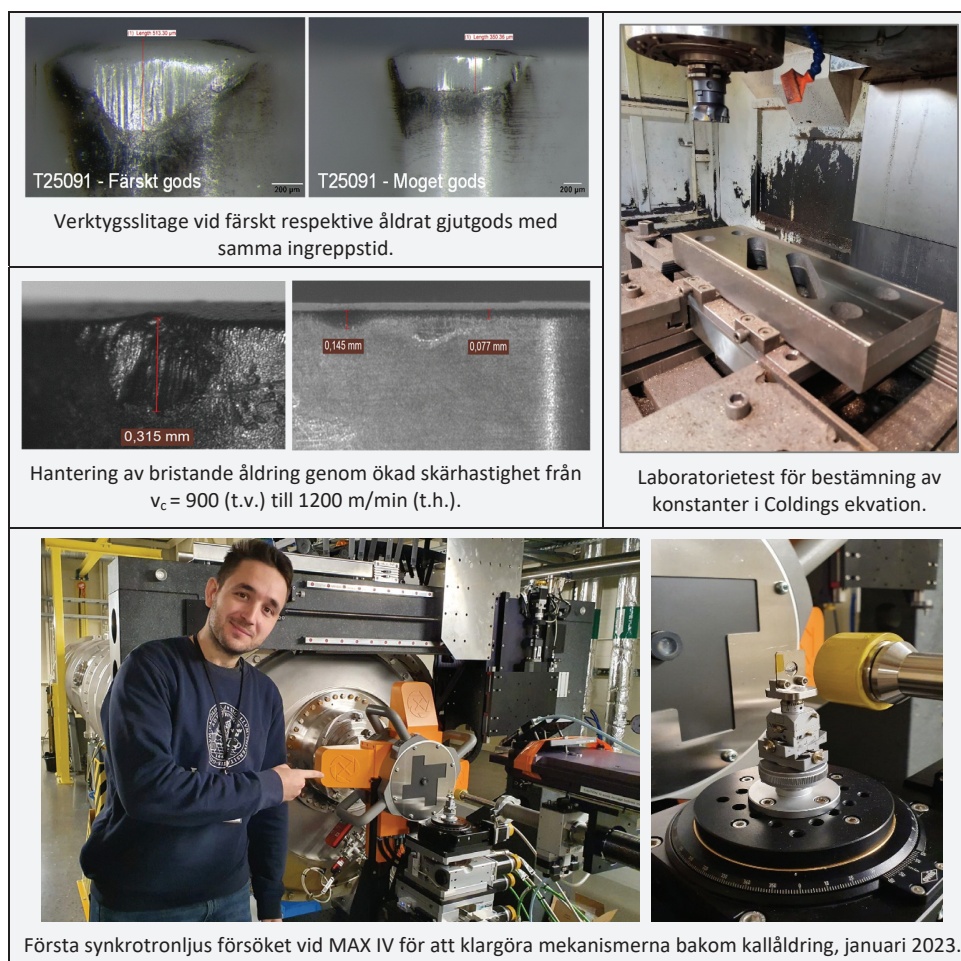
Slutligen bör nämnas att trots pandemiska utmaningar har värdefulla resultat uppnåtts, t.ex. införandet av nya skärdata som bidragit till miljonbesparingar och inrättandet av nya forskningsprojekt, dock utan att man lyckats klargöra mekanismerna för kallt åldrande.

Bristande åldrande kan delvis hanteras med miljövänlig vegetabilisk olja med nanopartiklar som tillförs genom MQL-smörjning. Ett annat viktigt resultat är att AI/ML-algoritmer kan användas för bedömning av en batch skärbarhet baserat på accelerometersignaler vid s.k. knacktest med exciteringshammare, dock krävs tidigare gjorda referensensprov. Colding's ekvation för verktygslivslängd kan anpassas till fräsning med 3-8 % avvikelse för fullt åldrande material, detta är att betrakta som ett fullkomligt unikt resultat även i ett internationellt perspektiv. Kostnadsberäkningar visar att MQL-smörjning kan minska tillverkningskostnaderna med 5-20.

2 Executive summary

Despite pandemic challenges, valuable results have been obtained such as the implementation of new cutting data that contributed to million savings and the establishment of new research projects, however without succeeding in solving the mechanisms of cold aging. Deficient aging can partly be managed with environmentally friendly vegetable oil with nanoparticles supplied through MQL lubrication. Colding's equation for tool life can be adapted to milling with 3 - 8 % deviation for fully aged material. Cost calculations show that MQL lubrication can reduce manufacturing costs by 5 - 20 %.

Vad har projektet handlat om?



Figur 1: Typiska bilder knutna till några av projektets arbetspaket.

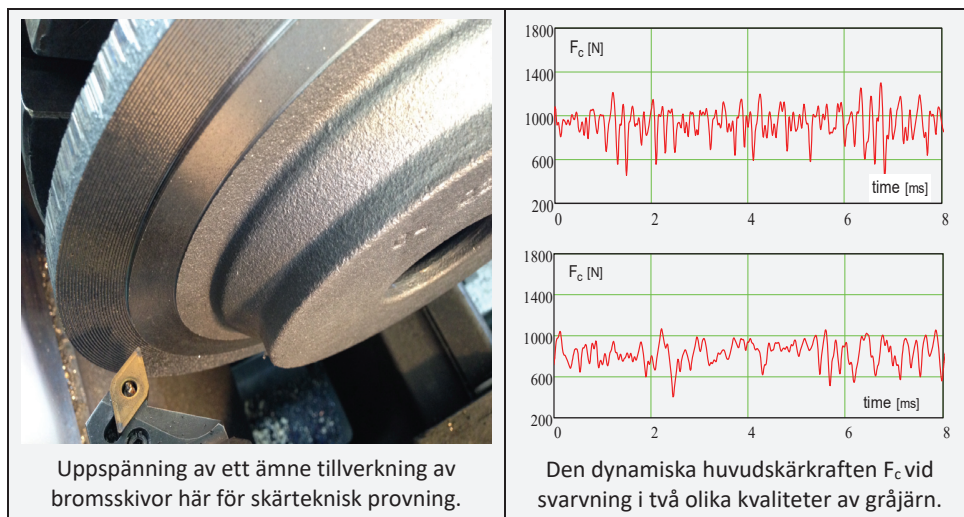
3 Projektets bakgrund

Nuläget då projektet söktes: Gråjärn är det dominerande materialet i gruppen gjutjärn och tillsammans med segjärn svarar för ca 75 % av allt gjutgodstonnaget inklusive gods av stål, aluminium etc. Av detta bearbetas ca 150 000 ton gråjärn i Sverige [1] genom skärande bearbetning, motsvarande mängd stål som bearbetas genom skärande bearbetning kan uppskattas till det dubbla. Den tunga fordonsindustrin är en dominerande användare av gråjärn. Det har länge varit känt att variationer i gråjärns skärbarhet ställer till stora produktionsproblem.

Dessa problem uppkommer ofta periodiskt, många gånger av okända anledningar, vilket verifierats genom studier vid de medverkande företagen [2, 3]. Försämrade skärbarhet leder till ökade verktygskostnader, längre bearbetningstider samt till ökad kassationsandel och ökade stillestånd.

Omfattande studier har gjorts inom området för att säkerställa kvalitén på aktuell typ av gjutgods med avseende på skärbarheten. Det har konstaterats, eller snarare antagits, att flera olika enskilda och samverkande faktorer ger upphov till variationer i skärbarhet. Komplexiteten i frågeställningen har bidragit till att orsakerna till reducerad skärbarhet har varit svåra att kvantifiera både kvalitativt och kvantitativt. Förhållandet har försvårat utvecklingen av robusta lösningar för att säkerställa en god skärbarhet. Ett genomgående tema i förklaringen av gråjärnets stora skärbarhetsvariationer har varit effekten av otillräcklig kallåldring och oönskade partiklar eller strukturbeståndsdelar främst i form av karbider och oxider i bulkmaterialiet eller i ämnets s.k. gjuthud.

Problemeffekter: Genomförda förstudier knutna till bearbetning av bromsskivor och svänghjul med cBN-verktyg visar att skärbarhetsvariationerna kan vara mycket omfattande. Exempel finns där mycket god skärbarhet kan medföra att 4000 komponenter kan bearbetas med en skäregg och där mycket låg skärbarhet medför att endast ett 10-tal komponenter kan bearbetas med en skäregg. Vid låg skärbarhet blir de ekonomiska konsekvenserna mycket kännbara då verktygskostnaden kan öka med mer än 10 gånger i förhållande till ett förväntat värde samtidigt som produktionstiden och belägningsbehovet ökar.



Figur 2: Svarvning i laborarieuppställning för att detektera effekter av allmänt låg skärbarhet genom mätning och karakterisering av dynamiska skärkrafter.

Etablerade hypoteser och frågeställningar: Erfarenhetsmässigt har det varit känt att ett gråjärn måste ”vila”, d.v.s. kallåldras i minst 8 upp till 14 dagar för att uppnå en rimligt god skärbarhet. I detta sammanhang bör det påpekas att även vissa materialexperter anför att det inte finns några bevis att åldring kan ske vid rumstemperatur.

Studier som är genomförda av forskargruppen vid Lunds universitet tillsammans med Volvo Cars samt erfarenheter från Volvo Lastvagnar har konstaterat att kallåldringseffekter finns, dock utan att kunna förklara de bakomliggande mekanismerna.

Det är också allmänt omvittnat inom den plåtformande industrin att det även förekommer motsvarande åldringseffekter i tunnplåt, både i austenitiskt och ferritiskt rostfritt stål samt i lågkolhaltigt stål t.ex. för formning kärl till skottkärror. I dessa fall är det den motsatta effekten som erhålls, en minskad formbarhet vid ökad åldringstid, d.v.s. en ”bäst före datum” gäller för användning av plåtämnet.

Internationell nulägesbeskrivning: De förklaringar som anförs internationellt till orsakerna bakom varierande skärbarhet knyts primärt till bristande grad av kallåldring. De mest omfattande och öppna studierna, redovisade i närtid, har publicerats av amerikanska och kanadensiska forskare [4–8]. I dessa publikationer anförs att partiklar utskiljs bestående av FeN_2 och Fe_2N_4 som bidrar till en ökad hållfasthet samtidigt som en ökning i hållfasthet och hårdhet erhålls. Det ges inte någon tydlig förklaring till den positiva korrelationen mellan ökad hållfasthet och ökad skärbarhet. Andra förklaringar till varierande skärbarhet baseras på att det genom diffusion avgår väte och/eller syre från godset. En ytterligare förklaring är att godset blir fritt från restspänning efter en viss tid och då även i kallt tillstånd. Knytningen till påverkan av skärbarhet är ofta svag i dessa redovisade förklaringar [2]. Under perioden 2012 – 2014 förklarade forskargruppen i Lund att utskilda partiklar (genom kallåldring) begränsade inlösningen av element från verktygsmaterialet och på så sätt minskade verktygsnedbrytningen och därmed förbättrade gråjärnets skärbarhetsuppträdande. Denna förklaring bedömer vi i nuläget inte fullt så trolig längre.

Andra utgångspunkter bl.a. från internationella publikationer har varit att det är abrasivt slitage, ofta relaterat till fri cementit (Fe_3C) s.k. kantvitt gods, som verkar på verktyget och är den dominerande faktorn som ger upphov till varierande skärbarhet i gråjärn. Detta är en förklaring som väsentligen kan gälla för verktyg av verktygsstål och snabbstål samt till viss del för hårdmetall. Det är väl omvittnat att större områden med fri cementit kan leda till skador på verktyget i form av haverier, urbrytningar och sprickbildning. Projektgruppens uppfattning är att för verktyg av cBN och keramik är kemisk nedbrytning (kemiska reaktioner och diffusion) den dominerande mekanismen som begränsar verktygslivslängden. Varierande och icke optimala process-förutsättningar ger upphov till en varierande verktygsförlitning. Denna slutsats dras från forskningsresultat från flera arbeten som utförts och publicerats av den sökande konstellationen. Ett intressant konstaterande är att samma variationer i skärbarhet kan uppträda för både verktyg av hårdmetall som verktyg av cBN.

Abrasivt slitage på cBN kan betraktas som osannolikt med hänsyn till dess hårdhet i förhållande till möjliga hårda partiklar i arbetsmaterialet. Mot denna bakgrund har projektgruppen valt att begränsa redovisningen av antalet referenser knutna till abrasivt slitage.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Många forskare vid institut och universitet samt ingenjörer inom industrin har dagligen arbetat med adresserad frågeställning om orsaker och kontroll av skärbarhetsvariationer i bl.a. gråjärn. Problemet är periodiskt med olika tidsintervall, ofta tror man att problemet är löst men det återkommer igen. Tidigare fungerande lösningar fungerar inte längre utan nya lösningar och analyser krävs. Mot denna bakgrund tar föreliggande projekt ett nytt grepp som bl.a. bygger på de erfarenheter som projektgruppen fått bl.a. från projektet "Konkurrenskraftigt gråjärn för hållbar utveckling".

Kunskaperna och insikten av ett TPL:s funktion är unik även i ett internationellt perspektiv. TPL är en stabil keram under vissa givna processförutsättningar och fungerar som en diffusionsbarriär med verktygsegenskaper. Det bör påtalas att s.k. tribo-skikt har studerats av många forskare under en lång tidsperiod. Ett tribo-skikt är ett förhållandevis mjukt skikt med begränsad hållfasthet som reducerar spånans adhesiva benägenhet mot verktyget. Tribo-skikt baseras ofta på oxider och/eller sulfider och utgör grunden för bl.a. kalciumbehandling av stål. Mangansulfid bildar ett tribo-skikt, vilket ofta har diskuterats i samband med bl.a. gråjärns skärbarhet [12, 13]. Tribo-skikt har en begränsad funktion som skärbarhetsförbättrare vid höga processtemperaturer, vilket erhålls med högpresterande verktygsmaterial baserade på cBN eller keramik. Arbetsmaterialet kan anpassas i sammansättning avseende spårämnen så att detta bidrar till etablering av ett TPL. Kunskaperna kan ligga till grund för en parallell utveckling av arbetsmaterial och skärverktyg för att optimera både bearbetning och produkttegenskaper.

Genomgående kan konstateras att förbättrade produkttegenskaper normalt medför lägre bearbetbarhet och ökade tillverkningskostnader. I de flesta fall medför skärbarhetsförbättrande tillsatser i ett material försämrade hållfasthet, vilket reducerar både tryck och temperatur i skärprocessen, vilket i sin tur leder till ökad skärbarhet. Med de kunskaper som finns inom projektgruppen finns det goda möjligheter att utveckla förutsättningarna att både förbättra produkttegenskaper och skärbarhetsuppträdande. I arbetsgruppen har den breda vetenskapliga kompetensen använts för att täcka in hela det aktuella problemområdet. Medverkande industri har länge varit världsledande inom sina respektive områden. Projektet FLINTSTONE är inom området verktygsmaterial har utgjort en viktig grund för detta projekt.

Intern utvärdering och uppföljning: Projektets styrgrupp har haft ansvar för att konstellationen genomför och följer upp att respektive delmål nås. Målen enligt ansökan har följts så långt som möjligt med hänsyn till projektets förutsättningar, särskilt då projektets huvuddel genomförts under pandemin. Under projektets gång har omprioriteringar gjorts, vilka förankrats och redovisats. Gångse rapportering har skett till Vinnova där genomförandet och delmålen successiva grad av uppfyllelse har redovisats.

Projektet har också haft en utsedd **industriell koordinator** som tillsammans med projektledaren synkroniserar arbetet. Vidare har projektets resultat stått till förfogande för olika former av redovisning.

Nya hypoteser och frågeställningar: Under 2014–2018 har det konstaterats i flera projekt att s.k. TPL, Tool Protection Layer, har ett avgörande inflytande på gråjärnets skärbarhet, särskilt med cBN-baserade skärmaterial. Detta är säkerställt vid bearbetning med cBN-verktyg men även senare verifierat med andra skärmaterial. Motsvarande studier har gjorts med bearbetning med hårdmetall i kisel-mässing. Dessa forskningsresultat kring TPL har möjliggjort implementering av konkurrenskraftig bearbetning av blyfri och lågblyad mässing [9]. Motsvarande resultat har erhållits vid bearbetning av härdat vitt gjutjärn där ett TPL reducerar förslitningshastigheten genom ett s.k. "in-situ skikt" skapat mellan verktyg och arbetsmaterial [10].

Skiktet byggs upp under vissa förutsättningar genom reaktionsprodukter mellan arbetsmaterialet och omgivningen. Vid bearbetning av vitt gjutjärn kan ett TPL bestå av nanokristallin Al_2O_3 och SiO_2 .

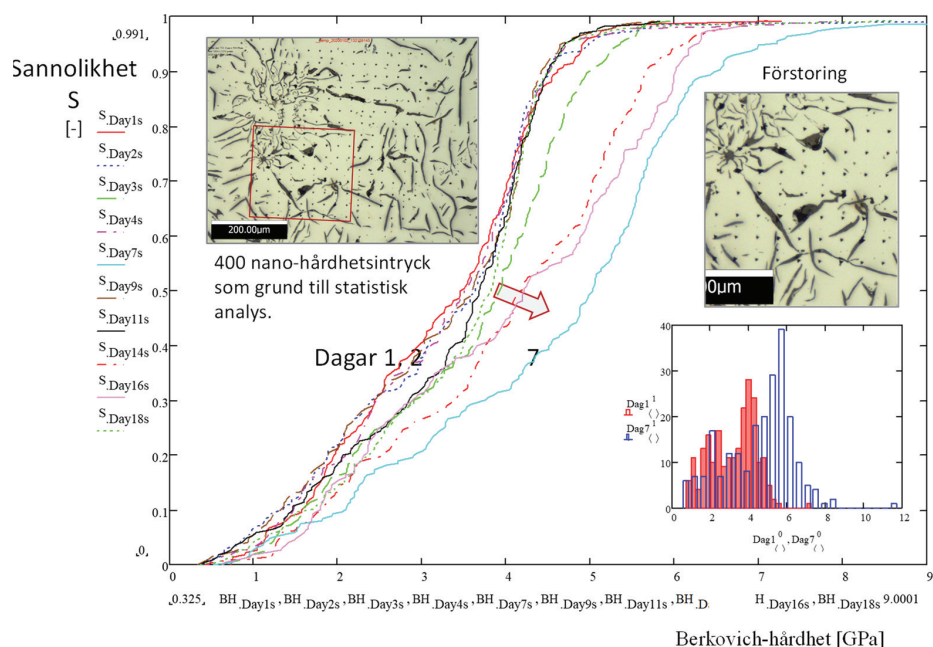
”Förstudier” gjorda av projektgruppen [11] har visat att om ett TPL kan skapas erhålls en god skärbarhet. En låg skärbarhet erhålls om TPL inte kan etableras. En koppling mellan 3 faktorer har identifierats som är grunden för att kunna uppnå god skärbarhet:

- Element (ämnena) som kan bilda ett stabilt TPL som begränsar diffusion av element från verktyget och begränsar omsättningen av reaktionsprodukter mellan verktyg och arbetsmaterial.
- Rätt temperatur och tryck i skärprocessen som skapar förutsättningen för kemiska reaktioner som kan etablera ett TPL.
- Tillgång på syre i de fall att TPL utgörs helt eller delvis av oxider (keramer).

En tidig utgångspunkt (2014) var att utskilda partiklar genom kallåldring av gråjärn bidrar till förutsättningar att bilda ett TPL. Forskargruppen i Linköping har försökt identifiera dessa utskilda partiklar samtidigt som gruppen i Lund analyserat sammansättningen och uppbyggnaden av TPL. Några utskilda partiklar har ännu inte konstaterats knutna till kallåldring, även efter detta projekt.

I sammanhanget bör tilläggas att formulerade hypoteser är numera mer välgrundade samtidigt som användningen av stora forskningsinfrastrukturer som exempelvis MAX IV inger ett klart hopp om att slutligen fullt ut förstå mekanismerna bakom kallåldringens gåtor. Givetvis krävs ytterligare forskning för att kunna nå dessa resultat.

Egna och internationella studier visar att processen som vi benämner kallåldring ger en nano-hårdhetsökning av ferritfasen samtidigt som dynamiken i skärprocessen förändras [2, 7]. Projektgruppen har visat att ett åldrat material är mer kortspånande än ett icke åldrat material och ger då betydligt kortare kontaktlängd mellan spåna och verktyg samtidigt som spånroten är öppen.



Figur 3: Exempel på resultatet efter nanohårdhetsmätningar och dess statistiska fördelning och bl.a. effekten av åldring.

En öppen spånrot (viss spalt mellan spånsegmenten som blottar verktygets spånyta) möjliggör att luftens syre når verktygsytan vilket möjliggör bildandet av ett oxidbaserat TPL. I flera olika applikationer har det konstaterats att även förekomsten av spårämnen i arbetsmaterial utgör en viktig del i att bilda och forma ett TPL. Dessa spårämnen kan förekomma i arbetsmaterial med en koncentration som mäts i ppm. Dessa har sedan dramatiskt ökat sin koncentration i ett TPL till att i kontaktytan med verktyget uppgå till flera 10-tals procent. Denna anrikningsmekanism är mycket intressant att studera ur ett mer vetenskapligt perspektiv.



Figur 4: Spåna och segment från bearbetning av gråjärn med delvis öppen (t.v.) och sluten spånrot (t.h.), vilket ger olika förutsättningar för tillgång till omgivande atmosfär.

En annan viktig iakttagelse är att gränsen för ett gråjärns kortspånande bestäms också av deformationshastigheten, vilken i sin tur kan styras av val av skärdata. En ökad skärhastighet medför ett mer kortspånande processuppträdande och medför till viss gräns också ökad verktygslivslängd. Mot bakgrund av redovisat diagram är det en hypotes att optimerade skärdata med hänsyn till arbetsmaterialets åldringsgrad. En hypotes är att till del kunna kompensera bristande åldring med ökad skärhastighet, vilket kommer att studeras i projektet. Riskerna finns dock att denna lösningsmetod är svår att tillämpa generellt då det finns både varvtalsbegränsningar och stabilitetsproblem bl.a. knutet till asymmetriska arbetsstycken. Ett optimum finns i skärhastighet med avseende på verktygslivslängd. Det kan förväntas att olika åldringsgrad har olika optimala processfönster med avseende på skärdata. Med hänsyn till att skärdata och dess knytning till förekomsten av TPL styr skärbarheten har projektgruppen valt att använda begreppet skärbarhetsuppträdande i stället för skärbarhet.

Kopplingar till andra projekt: Flera projekt bedrivs och har bedrivits av projektgruppen som har relevans för detta projekt. Det viktigaste projektet är "Konkurrenskraftigt gråjärn för hållbar utveckling", vilket är finansierat av Vinnova inom programmet Materialbaserad konkurrenskraft våren 2017 med diarienummer 2017-03213. Detta projekt drivs av projektgruppen och kan ses som en "utökad förstudie". Projektet avslutas operativt under hösten 2019. Projektet FLINTSTONE finansierat av Horizon 2020 med kontrakt nummer No 689279 har bidragit till nya kunskaper kring uppkomsten av TPL och utvecklingen av nya verktygsmaterial som är direkt anpassade för olika arbetsmaterial. FLINTSTONE koordineras av Lunds universitet och avslutades operativt under 2019/20.

Inom detta område finns även projektet DEMO med inriktning mot verktyg och bearbetning av primärt stål och superlegeringar. Detta projekt löper inom ramen för VINNOVAs SIP Metalliska material och har nyligen avslutats [25].

Sammantaget är dessa satsningar tillsammans med SPI (SFO: Produktion) ett samarbete med Chalmers vilket innefattar "Skärteknisk utbildning" och andra industriseminarier under 2021/22 för svensk industri har gjort att projekt fått ett visst genomslag genom att olika exempel är hämtade från resultaten.

5 Projektets mål

Ett mycket effektivt sätt att minska miljöbelastningen från en tillverkningsindustri är att minska kassationer, stillestånd och taktförluster. Störningar i form av varierande skärbarhet och ett lågt skärbarhetsuppträdande medför en ökad användning av produktionsresurser. Ökad miljöbelastning, genom bl.a. ökad energiförbrukning, är ungefärligen proportionell mot den extra tillverkningstid som orsakas av variationer i skärbarhet. Förbättrat skärbarhetsuppträdande ligger väl i linje med den strategiska färdplanen för "Hållbar produktion" där både minskad miljöpåverkan erhålls samtidigt som ökad konkurrenskraft erhålls. Det är viktigt att konstatera att minskad miljöbelastning oftast går hand i hand med sänkta tillverkningskostnader och stärkt konkurrenskraft.

Säkra fordonsindustriell konkurrenskraft: Skärande bearbetning är en central tillverkningsmetod för tillverkning av fordonskomponenter oberoende grad av elektrifiering. Metodgruppen svarar för stora förädlingsvärden särskilt idag knutet till fordonens drivlina. Effektiv bearbetning av dessa komponenter är därför av stor betydelse för konkurrenskraften både på kort och lång sikt. En annan viktig faktor är att styra upp användningen av dagens material samt specificera kraven på morgondagens material med hänsyn till en cirkulär ekonomi (återvinning och kretsloppsegenskaper). En framtida effektiv tillverkning kommer att ställa ökade krav på:

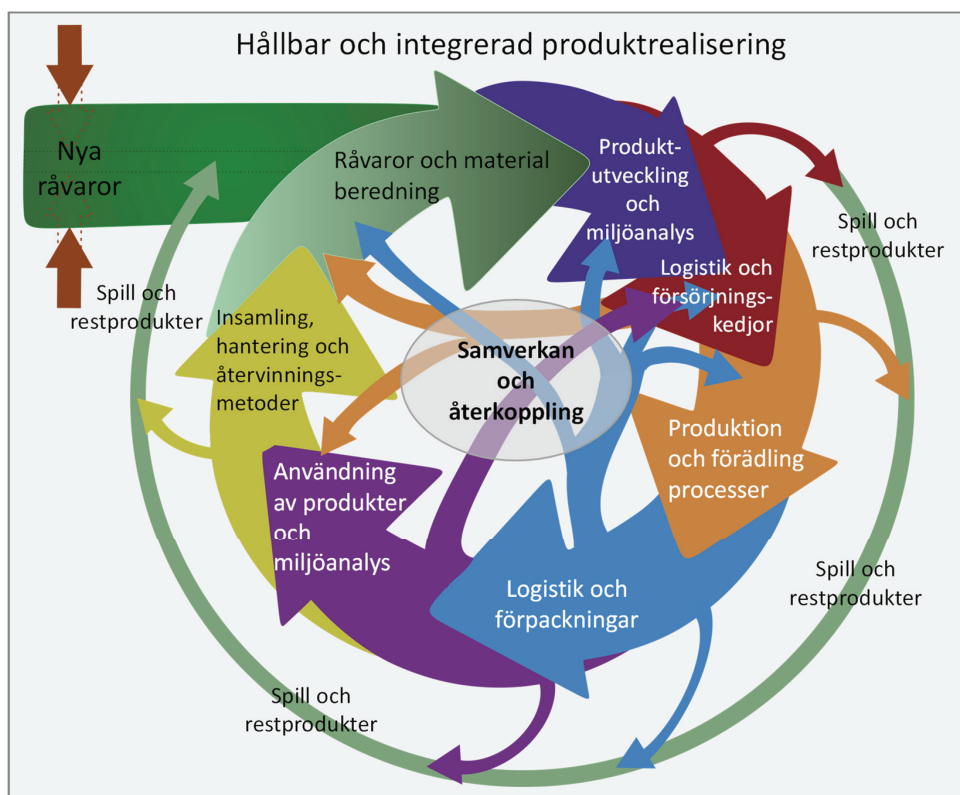
- Robustare processuppträdande vid tillverkning (ökad förutsägbarhet).
- Förbättrade produkttegenskaper i applikationen, vilket ofta kan bidra till lättare komponenter med högre prestanda.
- En återvinningsprocess av material som inte medför en degenerering av process- och materialegenskaper, där även kontroll och specifikation av spårämnen innefattas. För att lösa denna utmaning krävs förändrat konstruktionsmetodik som möjliggör ökad demonteringsbarhet och ställer krav på märkning och spårbarhet för att kunna möjliggöra en hållbar och fullt cirkulär återvinning.

Genom forskning och utveckling kan ny kunskap paketeras som måste och kan anpassa våra utbildningar till morgondagens förutsättningar. Projektgruppen har påbörjat arbetet anpassa forskningsresultaten till kurser och seminarier för både studenter och för svensk industri. Detta arbete har redan resulterat i ett avsnitt i en textbok och bidragit till intressanta exempel i en seminariereserie, där bl.a. konceptet inom Lean Produktions just in time helt står motsatsförhållande till de buffertlager som krävs för gjutgodsets åldrande. Denna fråga är särskilt viktig om berörd industri förfogar över både gjuteri och bearbetningsresurser. Importerat gjutgods har ofta hunnit åldras innan det kommit fram till bearbetningen, vilket i detta perspektiv är en fördel, dock inte med hänsyn till en rad andra faktorer.

Internationell konkurrenskraft och samverkan i övrigt: Projektgruppen har ett väl utvecklat internationellt samarbete bl.a. via projekt inom Horizon 2020 och samverkan om ansökningar till Eureka "Smart". En annan viktig kanal som forskargruppen i Lund använder för internationell samverkan är kontakter via SECO TOOLS dotterbolag samt dess försäljnings- och supportorganisation. Dessa kanaler är varit en viktig del för att smidigt skapa internationella studiebesök för doktorander och studenter samt finna partners i FoU-projekt. Här bör också nämnas att övriga industripartners inom projektgruppen också har en samverkan med underleverantörer för bl.a. verktyg, skärmedia samt material- och ämnesleverantörer.

Projektet har varit både direkt och indirekt branschöverskridande. De akademiska parterna inom projektgruppen driver ett flertal projekt i samverkan med SME. Genom att SECO TOOLS medverkar i projektet finns en stark och direkt branschöverskridande

verksamhet. SECO TOOLS utvecklar och levererar skärverktyg till de flesta branscher som på ett eller annat sätt är beroende av maskinteknisk utrustning.



Figur 5: Schematisk illustration av begreppet cirkulär ekonomi baserad på utspädning av ITE (Impurities and Trace Elements, föroreningar och spårämnen) med ny råvara som balanserar legeringens sammansättning för att uppnå given specifikation, hållbar cirkularitet uppnås när tillförseln av "Nya råvaror" saknar betydelse eller rent av är helt försumbar [21].

Forskningssamverkan mellan olika organisationer: Projektgruppen har sammantaget haft ett brett kontaktnät med samarbetspartners från högskolor och universitet samt både privata och statligt ägda forskningsinstitut. Föreliggande projekt baseras i hög grad på resultaten från projektet "Konkurrenskraftigt gråjärn för hållbar utveckling", vi valde därför också att gå vidare med samma konstellation av partners.

Projektgruppen har kompletterat projektet med ytterligare företag med motsvarande problematik. Dessa har benämnts som referensföretag.

Relevanta program mål: Föreliggande projekt kommer att bidra med följande:

- Genom minskade stillestånd och taktförluster erhålls en effektivare produktion som ger ökad konkurrenskraft.
- Genom minskade produktionstider kommer också miljöbelastningen att minska nästan proportionellt (minst 70 % enligt gjorda undersökningar) mot den tidsförbättring som erhålls.
- Genom stärkt och breddad kompetens kommer också arbetstillfällena att kunna säkras inom området.
- Genom robustare tillverkning ökas precisionen i produktionsplaneringen, vilket underlättar effektiva omställningar som ger större möjligheter att utveckla planering och styrning av tillverkningen.

De programområden som projektet bidragit till täcker primärt in i "Resurseffektiv produktion för minskad miljöpåverkan" (4.1) och "Robust och effektiv produktion" (4.2). Projektet har viss, koppling till SMART produktionsberedning (4.3). Efter detta projekt finns klart bättre förutsättningar för att införa digitala stöd vid teknologiberedning av gråjärnskomponenter, även om nya frågeställningar har tillkommit. Ett digitalt stöd kräver ett robust skärbarhetsuppträdande som entydigt kan beskrivas. Forskargruppen i Lund har tillsammans med SECO TOOLS samarbetat med kunskap och frågor kring utveckling av digitala stöd för optimalt valda processdata vid teknologiberedning. Man kan konstatera att kravet på dessa digitala stöd kräver en prediktering av verktygslivslängden med en precision på minst $\pm 10\%$ för att kunna bedömas vara meningsfulla.

Mål i en strategisk satsning: Med hänsyn till den svenska industristrukturen är kunskaper och förmåga inom området skärande bearbetning av största betydelse. Bearbetning och bearbetningsforskning knutet till gråjärn har länge bedömts som "enkel" och som kan göras "lite var stans" i världen. Detta förhållande syns bl.a. på åldern av de publikationer som återfinns inom ämnesområdet, se även utvalda referenser till detta projekt. Denna omvittnade schablonisering bygger i hög grad på bearbetning med verktyg av hårdmetall.

En ökad användning av mer högpresterande skärmaterial (cBN och keramik) som möjliggör kortare cykeltider har variationerna i skärbarhet fått ett allt större inflytande på bearbetningsekonomin. Synen på gråjärnsbearbetningen har successivt förändrats då dessa skärmaterial kräver en högre kompetens samt ett högre CPR (Cost Performance Ratio) för att vara lönsamma [14]. Skall cBN verktyg användas ekonomiskt måste dess fulla potential avseende avverkningshastighet (spånvolymflöde, MRR) utnyttjas. Användning av högeffektiva skärmaterial ger konkurrensfördelar under bl.a. följande förutsättningar:

- En robust och jämn skärbarhet som ger en förutsägbar verktygslivslängd och där entydiga samband finns mellan skärdata (teknologiberedning) och optimala verktygsbyttessekvenser.
- En dominerande ingreppstid i förhållande till den totala tiden för att tillverka en batch. Andelen nödvändig ingreppstid är dock beroende på kostnaden på ämnen, maskin- och mantimkostnaden och belägningsgraden. Ett uppskattat riktvärde är mer än 50 % utgörs av operativ ingreppstid och mer än 75 % utgörs av cykeltid av den totala batchtiden.
- Dyra och effektiva maskiner kräver mer högpresterande verktyg för att kunna hålla nere den totala kostnadsbilden.
- Erforderlig kompetens på alla nivåer, för att bl.a. följa upp och genomföra optimala verktygsbyttessekvenser vid en effektiv bearbetning med högeffektiva verktygskoncept.

Mot bakgrund av ovan är det en strategisk fråga att använda hög teknologi vid bearbetning av gråjärn. Detta möjliggör att arbetstillfällen kan stanna kvar i landet på sikt. Föreliggande projekt är därför strategiskt i flera olika avseenden.

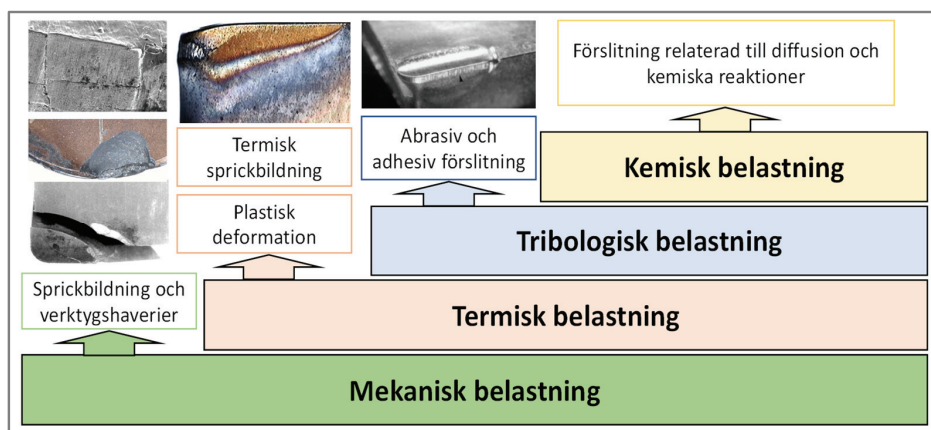
6 Resultat och måluppfyllelse

Resultaten från projektet har fått stort genomslag både inom industrin och akademien. Rekommendationer för **hantering av bristande åldring** och låg skärbarhet finns det ett bra underlag till.

6.1 Anpassning mellan arbetsmaterialet och verktygsmaterialet

Den viktigaste slutsatsen är att ett arbetsmaterial och en komponent bör helst optimeras mot användning av endast en typ av skärmaterial.

Arbetsmaterial som fungerar väl vid **användning av hårdmetall** ger ett begränsat abrasivt slitage genom ett gynnsamt och lättbearbetat material, där ferriten är mjuk samtidigt som det förekommer en mycket låg förekomst av karbider och en låg halt av karbidbildande element. Detta material med hög skärbarhet för hårdmetall ger förhållandevis lång geometrisk kontakt mellan spåna och verktyg där bl.a. sulfider kan bilda en fungerande tribofilm som bidrar till hastigheten på verktygsslitaget begränsas, detta både med avseende på abrasivt och adhesivt slitage. Bearbetningen sker i dessa fall med förhållandevis höga matningar men med låga skärhastigheter ($v_c < 350$ m/min).



Figur 6: Olika typer av belastning som mer eller mindre samverkar för att bryta ner verktyget och begränsa dess livslängd, där olika verktygsmaterial olika känsliga för olika belastningstyper [26].

Vid **användning av cBN**, som är ett mycket hårt verktygsmaterial, får hårda karbider ett klart mindre inflytande på verktygets nedbrytningshastighet och det abrasiva slitaget är näst intill helt försumbart.

Detta material med mjuka strukturbeståndsdelar är förhållandevis duktilt och utsätter cBN-baserade verktyg för **kemiska reaktioner och diffusion** som bryter ner verktyget hastigt. Ett adhesivt uppträdande mellan arbetsmaterial och verktyg kan i vissa fall accelerera de kemiska reaktioner och diffusion som ger slitage.

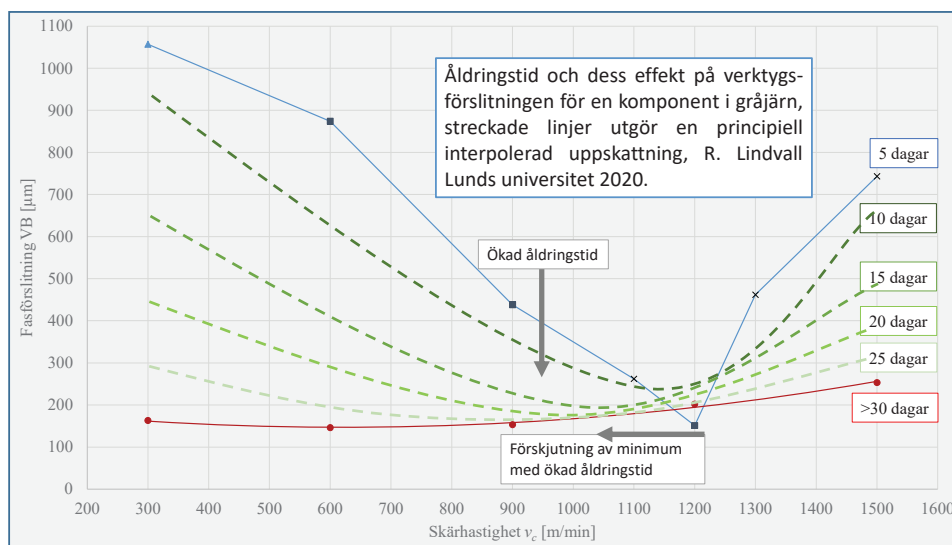
6.2 Anpassning av skärprocessen till allmänt låg skärbarhet

Vid användning av cBN-baserade verktyg får tribofilmen bestående av exempelvis sulfider ingen funktion p.g.a. den höga processtemperaturer som erhålls vid verktygets arbetsområde ($v_c > 600$ upp till över 1000 m/min). Studier inom projektet har visat att ett väl fungerande TPL kan utvecklas om processtemperaturen ökas ytterligare. Vid $v_c = 1200$ m/min erhålls ett minimum för förslitningshastigheten genom att ett väl fungerande TPL har utvecklats. Vid denna typ av bearbetning erhåller verktyget ett vidhäftat material på de aktiva ytorna, vilket kan ses eller kännas av tydligt. Ett **icke fungerande TPL** karakteriseras av att verktygets aktiva ytor är nära nog helt rena från avsättningar knutna till arbetsmaterialet.

Detta resultat enligt ovan som visar att ökad skärhastighet kan förbättra skärbarhetsuppträdandet vid användning av cBN-baserade verktyg. Resultaten är implementerade på ett framgångsrikt sätt vid ett av partnerföretagen. Förändringen minskade bearbetningens cykeltid och dess tillhörande kostnader. Vidare är dessa resultat anpassade för läromedel och ingår i en nyutgiven textbok [21] och en textbok under utgivning [22].

Sammantaget gäller att ett material som fungerar väl för cBN har hårdare strukturbeståndsdelar där det oftast finns fria karbider och hårda oxider närvarande i materialets grundmassa, vilket då blir helt förödande för hårdmetallverktygs livslängd.

Val av keramiska verktyg blir därför en kompromiss mellan hårdmetall och cBN-baserade verktyg beroende på möjligheterna till att använda höga skärhastigheter.

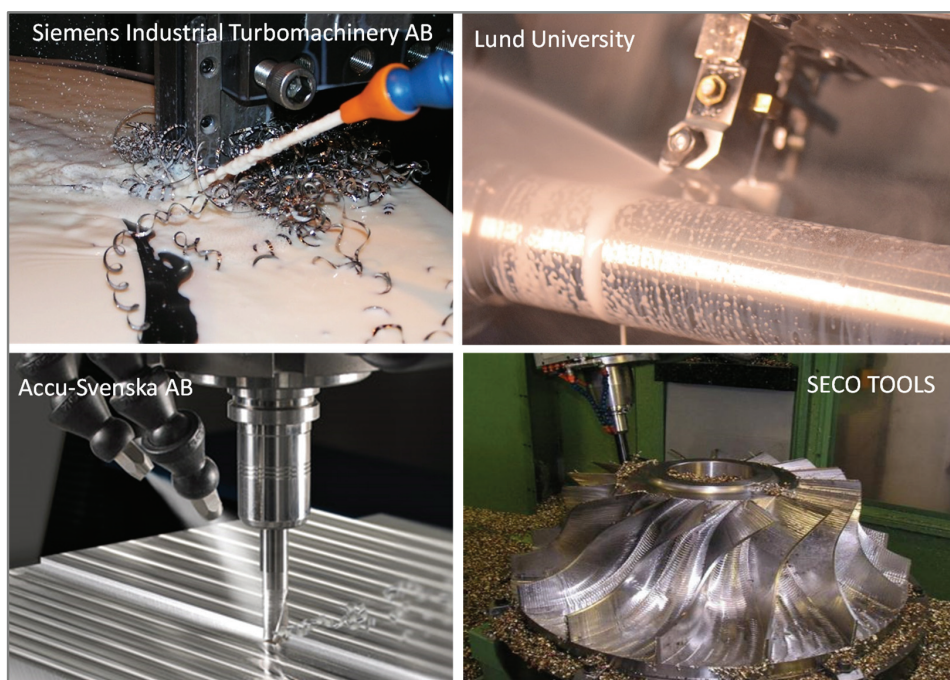


Figur 7: Skärhastigheten v_c och vald åldringstids inflytande på verktygsförlitningen vid skärande bearbetning efter 10 tillverkade komponenter, streckade linjer är ett uppskattat beteende baserat på enstaka mätpunkter.

Bristande åldring kan även till del kompenseras genom processtillsatser i form av MQL (Minimum Quantity Lubrication). Inom ramen för projektet har olika vegetabiliska smörj-system provats bl.a. med modifierad rapsolja som inkluderar nanopartiklar av karboniserade havreskal men även tillsatser av oxider/sulfider. En samverkan har bedrivits med två andra projekt finansierade av Vinnova och Mistra. Genom användning av MQL kan spridningen i verktygsslitage och dess spridning reduceras och kan därmed minska tillverkningskostnaderna vid bearbetning, dock krävs viss extra investering. Som ett resultat av genomfört arbete redovisad projektsamverkan kommer under våren 2023 en fullskalig industriell installation göras av MQL assisterad bearbetning.

Provet avses göras under ca 1 år i förhoppning att installationen permanentas. I denna studie skall olika driftsförutsättningar studeras, analyseras och tillverkningsekonomiskt utvärderas.

Resultaten visar att ökat fokus måste sättas på förbättrad hantering av materialkombinationer, materialflöden och separation för att kunna uppnå **hållbar cirkularitet**. Antalet olika legeringar som används måste begränsas och anvisningar måste utvecklas som beskriver vilka legeringar som kan användas i kombination med varandra för att inte degradera varandra vid efterföljande återvinning. Ett extra fokus måste sättas på legeringar som använder kritiska råvaror (CRM) som legeringselement. Dessa legeringselement måste nyttiggöras vid återvinning och därmed kunna återanvändas i en ny legering på ett effektivt sätt. En sönderdelning och sortering måste göras så att dessa legeringsämnen inte späds ut eller extraheras genom exempelvis oxidation och övergår till slagg som deponeras (exempelvis litium vid aluminiumåtervinning). Föreliggande projekt har tydliggjort problematiken kring flera återvinningscykler, vilket också redovisats [21] i form av ökad kopparhalt i järnbaserade legeringar.



Figur 8: Smörj- och kylprinciper som används vid skärande bearbetning, konventionell tillförsel (1, ö.t.v.), högtryckskylning med lokaliserad stråle (2, ö.t.h.), MQL (3, n.t.v.) och torrbearbetning, d.v.s. helt utan skärmedia (4, n.t.h.) [22].

6.3 Hypoteser om kallåldring och dess mekanismer

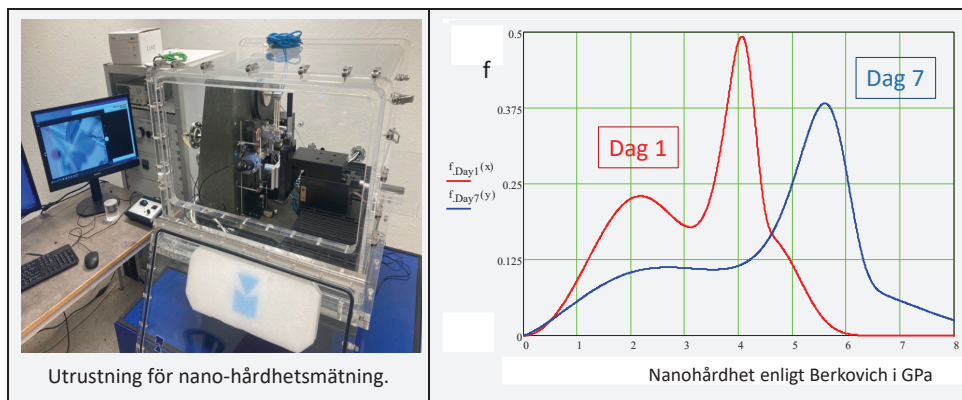
Mekanismerna bakom kallåldring är på väg att lösas genom användning av stora forskningsinfrastrukturer. Arbetet har bedrivits genom industriella fallstudier och genom experimentella försök primärt inom akademien. Ett fokus har varit att förstå orsaker och mekanismer bakom de industriella problem som erhålls i samband med bl.a. användning av återvunna material. Inom ramen för projektet har ett stort antal ansökningar gjorts avseende stråltid till olika nationella och internationella forskningsanläggningar. Ett syfte med dessa studier är att identifiera kluster av atomer/molekyler som bidrar till partikelhärdning eller snarare "molekyklusterhärdning" (nedan klusterhärdning) som begränsar eller t.o.m. förhindrar annan löslighet och diffusion samt minskar dislokationsrörligheten. Detta uppträdande skall i sin tur minska de kemiska reaktionerna knutet till verktyget och dess nedbrytning.

En indikation på existensen av **klusterhärdning** är att berörda materials mjuka strukturbeståndsdelar ökar något i nanohårdhet efter åldring (nano-indentering med lasten 1 gram). Den hårdhetshöjning som erhålls är inte möjlig att mäta med makrohärdhet och kan inte i ett mekaniskt perspektiv påverka materialets skärbarhet.

Den hypotes som utvecklats är att klusterhärdningen minskar reaktionsbenägenheten som i sin tur bidrar till minskad vidhäftning mellan spåna och verktyg. Samma effekter kan konstateras uppträda vid allmänt låg skärbarhet, vilket redovisats som ett delresultat inom projektet [23]. Material med låg skärbarhet med cBN-verktyg och samtidigt hög skärbarhet med hårdmetall ger en ökad kontakttid mellan spånsegment och verktyg samt minskad segmentbildningsfrekvens, högre dynamiska skärkrafter, högre deformationsgrad vid spånbildningen samt minskad förekomst av fria karbider i arbetsmaterialet.

Inledande försök vid MAX IV har genomförts i syfte att klargöra mekanismerna bakom kallåldring, ytterligare försök krävs för att förstå mekanismerna bakom kallåldring.

Ytterligare försök vid stor forskningsinfrastruktur är planerad att genomföras i Grenoble under våren 2023.



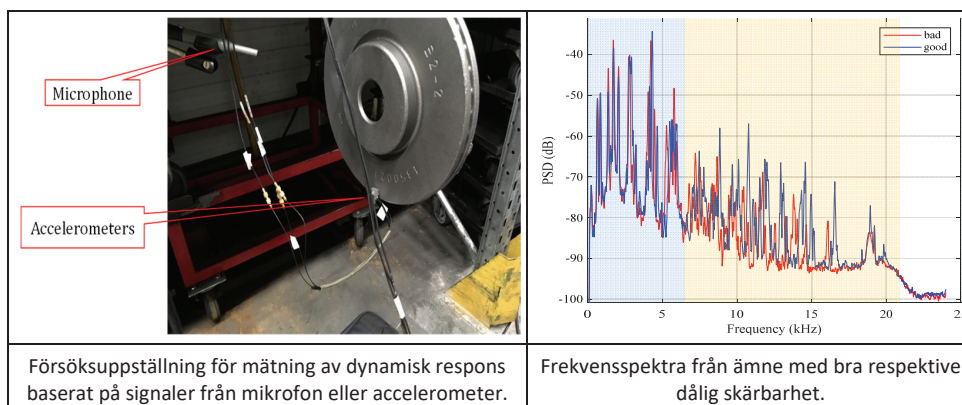
Figur 9: Utrustning för nanohårdhetsmätning och mätning på samma kuts dag 1 respektive dag 7 på ett gråjärnsämne beskrivet med en statistisk frekvensfunktion som representerar mätdata (400 mätningar per prov) med ca 0.5 % i fel, redovisad frekvenskurva kan ses som ett fingeravtryck på materialets struktur och dess strukturbeståndsdelar [22, 29].

6.4 Karakterisering av gjutjärn med allmänt låg skärbarhet

Ett flertal studier har gjorts för att korrelera allmänt låg skärbarhet till material- eller komponentuppträdande. Några av dessa studier som exempelvis nano-hårdhetsmätning, dynamisk skärkraftsmätning, spånstudier och mikroskopi i olika former har redan omnämnts.

En nytt angreppssätt, redan utvecklat i det tidigare projektet, är att använda dynamiska egenskaper och korrelera dessa till bra respektive dålig skärbarhet. Försöken har byggt på att ta ut ett antal ämnen från en batch som uppvisat god skärbarhet och göra det samma för en batch som uppvisar lågskärbarhet. Hälften av ämnena i respektive grupp genomgick en test där mätningar gjordes av ljud och accelerationer i samband med ett s.k. knacktest (slag med exciteringshammare).

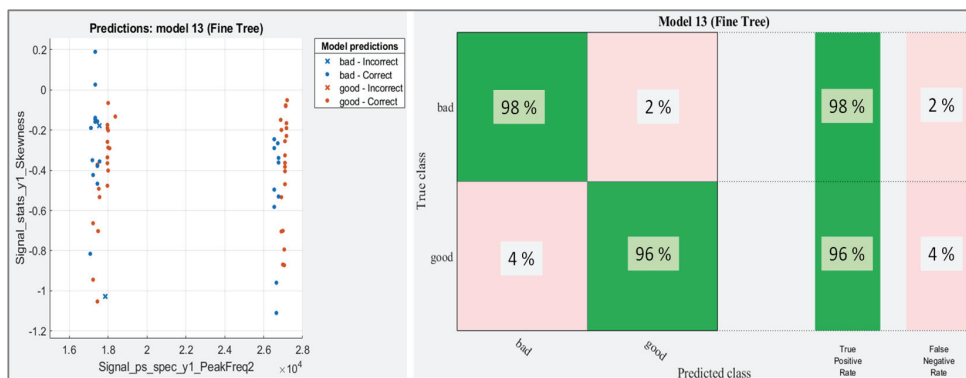
Erhållna mätsignaler genomgick signalbehandling (bl.a. filtrering, FFT och AI/ML-algoritmer) och frekvensuppträdandet knöts till bra respektive dåligt skärbarhetsuppträdande. Detta förfarande kan betraktas som en lär- eller identifieringsprocess som baseras på AI/ML-algoritmer.



Figur 10: Knacktest på ett ämne för att mäta registrera den dynamiska responsen (t.v.) och erhållna frekvensresponsen från mätningar på två olika ämnen, med bra respektive dålig skärbarhet, där

det gula fältet anger det frekvensintervall som korrelerar till skärbarhetsuppträdandet (t.h.), Gutnichenko, Lunds universitet 2020.

Den andra hälften av ämnena med både bra respektive dålig skärbarhet blandades varpå samma typ av mätningar utfördes. Ämnena med dålig skärbarhet kunde identifieras med en sannolikhet motsvarande 98 % medan ämnena med bra skärbarhet kunde identifieras med 96 % i säkerhet.



Figur 11: Användning av en mikrofon och en accelerometer för att med hjälp av AI/ML-algoritmer identifiera om ett givet arbetsstycke har bra eller dålig skärbarhet, Gutnichenko, Lunds universitet 2020.

Utvecklad metod är mycket intressant men ger den begränsningen att den inte har någon direkt identifierbar koppling till skärprocessen eller kunskapen om den samma. Det är dock uppenbart att metoden fungerar och att bra och dålig skärbarhet korrelerar till fysikaliska egenskaper som påverkar materialets och komponentens dynamiska respons. Den bedömning som gjorts är att skillnaden mellan de båda grupperna av ämnena troligtvis kan knytas till strukturoberoende egenskaper (dämpning, impedans) och direkt atomära egenskaper eller strukturoberoende egenskaper (elasticitetsmodul, ljudhastighet, densitetsvariation). Utvecklad metod kan ses som ett viktigt komplement till andra metoder där en kombination av kunskaper kan vara vägledande till åtgärder och beslut.

En annan faktor som ofta kommer upp till diskussion är buffertar och lager och tillhörande kostnader och kapitalbindning. I denna kontext kan en rad olika frågor ställas.

En Fråga är vad skall göras när ämnena har anlänt från underleverantören och det konstateras att dessa har låg skärbarhet samtidigt som antagandet görs att den låga skärbarheten emanerar från bristande åldring? Finns det en s.k. batch i reserv i ett lager som kan användas? Om ingen batch i reserv finns kan man senarelägga tillverkningen och vilka effekter får detta? Om denna situation kan hanteras, placeras den inkomna batchen i lager t.ex. 14 dagar varpå det konstateras att ämnena fortfarande har för låg skärbarhet, vad skall göras i detta läge?

Resonemanget ovan är inte ovanligt utan snarare tvärt om. En lösning är förbättrad kommunikation och ökad tydlighet med underleverantörerna eller t.o.m. stärkt kommunikation och förbättrad intern samsyn i frågan (med inköpsavdelningen?).

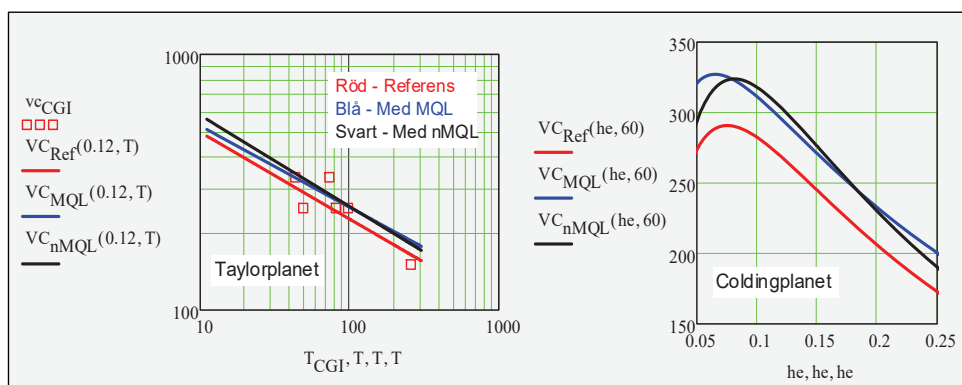
Ett vanligt talesätt är att besparingar i **ören** i material och ämnesinköp ger kostnader i **kronor** under bearbetningen och den fortsatta förädlingen.

6.5 Anpassning och användning av Coldings ekvation för fräsning

Projektet har till stora delar, på industrins önskemål, fokuserat på hur bristande åldring [2B2, 2B3] och allmänt låg skärbarhet kan hanteras [3B1, 7B2]. Ett viktigt resultat, vilket redan omnämnts, visar att bristande åldring också kan hanteras genom att använda

miljövänlig vegetabilisk olja modifierad med bl.a. kol-nanopartiklar. Det har visats inom projektet i specifikt fall att **Coldings ekvation för verktygslivslängd kan anpassas till fräsning** med ca 3 - 6 % i resultatavvikelse.

Motsvarande tester avseende Coldings ekvation applicerad på fräsning har parallellt gjort hos en av projektets industripartners. Dessa studier har visat att under mer varierande förhållanden kan modellfelet uppgå till knappt 8 %, vilket också anses vara fullt godkänt. Ett gemensamt resultat och ställningstagande är att Coldings ekvation kan användas även för att bestämma verktygslivslängden vid fräsning.



Figur 12: Exempel på modellerad verktygslivslängd för fräsning baserad på Coldings ekvation presenterad i Taylorplanet där sambanden mellan skärhastighet v_c och verktygslivslängd T för en ekvivalent spåntjocklek h_e konstant lika med 0.12 mm (t.v.) och Coldingplanet där sambanden mellan skärhastigheten v_c och ekvivalent spåntjocklek h_e med konstant verktygslivslängd $T = 60$ minuter.

Användningen av Coldings ekvation förutsätter att materialet är fullåldrat samt att nedbrytningen av verktyget är rent förslitningsrelaterad, d.v.s. helt fri från plastisk deformation, urbrytningar, sprickbildning och verktygshaveri. En konsekvens av denna begränsning är att verktygets ingrepp och utgång ur arbetsmaterialet har en underordnad betydelse för verktygets nedbrytning, inklusive effekten av vidhäftat material (påkletningar på spånytan) som leder till mikro-urbrytningar från verktygets aktiva ytor vid efterföljande ingrepp.

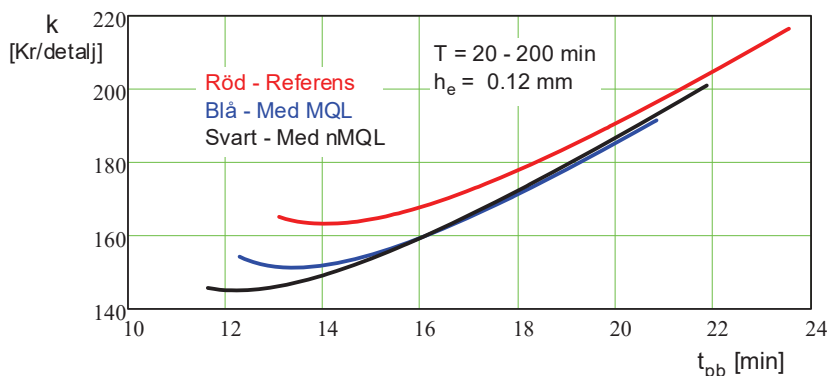
6.6 Tillverkningskostnader bl.a. baserade på Coldings ekvation

Genom modellering av verktygslivslängden med Coldings ekvation [21, 22, 27, 28] kan även kostnadseffekter bedömas knutet till olika tekniska lösningar eller åtgärder, där även olika utvecklingsscenarier kan tillverkningsekonomiskt analyseras. Anpassningen till pandemin har tyvärr reducerat omfattningen av produktionsuppföljningar, vilket försvårat den planerade ekonomiska analysen av åldringens effekter då den direkta tillgängligheten av färskt material har försvårats. Även om tillgången på färskt material är god är det svårt att ta fram entydiga modeller för verktygets livslängd p.g.a. att dessa studier är tidskrävande, vilket gör att materialet successivt förändras under försökstiden. Under dessa förutsättningar erfarenheten att hela produktionsbatcher med erforderligt antal detaljer måste studeras för att få statistiskt säkerställda resultat. Denna typ av studier har genomförts i sin helhet och finns väl dokumenterade.

En ytterligare försvårande omständighet är att flera materialrelaterade orsaker leder till ett försämrat skärbarhetsuppträdande. Möjligheterna till att särskilja bristande åldring från allmänt låg skärbarhet är svårt att göra särskilt vid bearbetning med hårdmetall. Under de senast studierna har fler indikationer visat att det finns ett samband mellan andelen spårämnen, initialåldringens inflytande, åldringstiden och åldringens grad av inflytande på skärbarhetsuppträdandet.

Genom studier i laboratoriemiljö har nödvändiga tillverkningsekonomiska analyser gjorts vid bearbetning av material med **normal skärbarhet** respektive material med **allmänt låg skärbarhet**. Vidare har de direkta tillverkningseffekterna analyserats av användning av olika verktygsfabrikat samt användning av standard MQL baserad på rapsolja samt modifierad MQL baserad på rapsolja med nanoadditiv.

Genomförda studier, vilka redan har omnämnts, visar att användning av MQL-assisterad bearbetning kan reducera tillverkningskostnaderna med 5 - 20 % beroende på applikation. Vid denna analys har Coldings ekvation utgör basen för indata till kostnadsmodellen.



Figur 13: Exempel på en Hägglundgraf där beräknad bearbetningskostnad k beskrivs som funktion av vald produktionstid per detalj t_{pb} och med alla valbara verktygslivslängder T som parameter i en given applikation, där torrbearbetning utgör referens (röd kurva), med MQL (blå kurva) och med nMQL som är modifierad med nanoadditiv (svart kurva).

Ett annat viktigt resultat är hur ett begränsat antal försök (2-3 försök) kan användas för att göra en fullständig bestämning av alla 5 konstanterna i Coldings ekvation. Denna metodik möjliggör ett nytt och effektivt sätt för att göra analyser som kan utgöra viktiga beslutsunderlag vid kostnadsbaserade produktionsförbättringar. Utvecklad metodik ger stora besparingar i försöksdata samt underlättar kalibrering av rekommenderade skärdata till verklig produktion som till del avviker från försöksförutsättningarna.

6.7 Pandemins effekter på erhållna resultat

Trots betydande störningar p.g.a. pandemin har arbetet funnit nya utvecklingsvägar. Den initiala måluppsättningen har inte fullt ut genomförts med anledning av de omprioriteringar som gjorts i projektet på grund av pandemin. Industriella prov har flyttats till akademien och en speciell provdetalj användes i stället för företagets ordinarie komponentflora. Denna förändring gjorde att en investering i en ny fräsmaskin vid LU tidigare lades ca 2 år, vilket bl.a. bidragit till ökade kostnader i projektet. Vissa aktiviteter som systematiska produktionsanalyser samt översyn av industriella utslitningskriterier har inte kunnat genomföras p.g.a. företagets försiktighetsåtgärder. Trots utmaningarna med att hantera pandemin har projektet resulterat i många värdefulla resultat som exempelvis implementering av nya skärdata som bidragit till miljonbesparingar samtidigt som underlag till fortsatt forskning och nya intressanta utvecklingsscenarier. Projektet har inte lyckats lösa gåtan bakom kallåldringens mekanismer. En förklarande orsak till detta är att vi inte kunde beviljas stråltid vid stora forskningsanläggningar under pandemin. Vi har dock kunnat göra de första testerna vid MAX IV nu under januari (2023) och andra tester väntar. Hittills erhållna resultat behandlar färskt material medan vi väntar på att detta åldras så att jämförelser i atomär skala kan göras.

7 Spridning och publicering

Arbetsgruppen inom projektet ser nyttiggörande av forskningsresultat som mycket viktigt. En annan viktig del är att involvera studenter i denna typ av projekt, inte bara för att öka deras kunskaper utan också kunna förbereda dem för ett en industriell verksamhet och karriär. Hittills är den viktigaste spridningen av resultaten hittills gjorts genom två vetenskapliga publikationer, en **textbok** som behandlat del av resultaten och 5 examensarbeten på mastersnivå samt ett förhållandevis stort antal arbetsrapporter av olika slag som utgjort leveranser och delrapporter i projektet. Utöver detta är ytterligare några **vetenskapliga publikationer** på väg samt en del i en doktorsavhandling. En textbok i skärande bearbetning är i sitt slutskede och väntas publiceras i s.k. draft-version under 2023.

Resultaten knutet till användning av AI/ML-algoritmer för bedömning av låg och hög skärbarhet har redan implementerats i kurser inom det nya området "Smart produktion" men också i kursmoduler knutet till **Civilingenjör 4.0**. Praktiska exempel på direkt användning av dessa teknologier som beslutstöd har visat sig vara mycket värdefulla ur ett rent pedagogiskt hänseende.

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Nedan ges svar på ställda frågeställningar enligt standardmallen. En fråga som är viktig som saknas är hur resultaten används i utbildningssammanhang på olika nivåer.

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Trots utmaningar har viktiga resultat erhållits och implementerats på olika sätt och omfattning.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Flera nya forskningsprojekt har initierats med bakgrund till resultat i denna studie, bl.a. delvis grund för ett Vinnova KC planeringsanslag och en ansökan om KC tillsammans med Chalmers (2023).
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	Vunna kunskaper knutet till TPL har påverkat utvecklingen av skärverktyg.
Introduceras på marknaden	(x)	Genom att resultaten används och har implementerats enligt ovan har effekterna nått marknaden.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut	(x)	Påverkan sker dagligen för att få tillstånd förståelsen för en hållbar återvinningsprocess som inte degraderar eller rent av förstör befintliga material eller materialråvaror.

Flera kopplingar finns till andra projekt som kommer att påskynda introduktion eller ge större genomslag av erhållna projektresultat men också hantera eller adressera de frågeställningar och identifierade utmaningar som vi ställs inför.

7.2 Publikationer

Artiklar:

- R. Lindvall, J. M. Bello Bermejo, B. Cámara Herrero, S. Sirén, L. Magnusson Åberg, S. Norgren, R. M'Saoubi, V. Bushlya, J-E. Ståhl, Degradation of multi-layer CVD-coated cemented carbide in finish milling compacted graphite iron, *Wear* (in publishing progress), 2023.
- R. Lindvall, K. Monroe Diaz, R. Lin Peng, O. Gutnichenko, S. Sirén, L. Magnusson Åberg, S. Norgren, R. M'Saoubi, V. Bushlya, J-E. Ståhl, Wear mechanisms and performance of Ti(C,N)-Al₂O₃ CVD-coated cemented carbide during finish milling CGI with minimum quantity lubrication, manuscript.

Examensarbeten:

- A. Söderholm, Variations in Material Properties of Grey Cast Iron and its Impact on Tool Wear, CODEN:LUTMDN/(TMMV-5309)1-102/2021, LTH, 2021.
- C. K. Ravindra Reddy, S. Jayashankar, Tribological and corrosion performance of ferritic nitrocarburizing (FNC) treated automotive brake discs, CODEN: LUTMDN/(TMMV-5315)/1-76/2021, LTH, 2021.
- P. Kumar Shivarudrappa, Changes in Gray cast iron over the last century - An initial study, CODEN: LUTMDN/(TMMV-5313)/1-37/2021, LTH, 2021.
- K. Monroe Diaz, A Study of tool wear behaviour during milling of Compacted Graphite Iron under dry and minimum quantity lubrication conditions, CODEN: LUTMDN/(TMMW-5335)/1-107/2022, LTH, 2022.
- C. Jaunviksna, Machinability study on GCI brake discs – Effects of material variations and process behavior on tool life, LTH, 2023.

Textböcker som använt aktuella forskningsresultat:

- Ståhl J-E, Windmark C, HÅLLBARA PRODUKTIONSSYSTEM – Länken mellan teknik och ekonomi med ett globalt perspektiv, ISBN 978-91-44-12642-5, Studentlitteratur AB 2022.
- Ståhl J-E, m.fl. Skärande bearbetning i teori och praktik, Studentlitteratur AB i samarbete med SECO Tools AB Fagersta, draftversion och planerad officiell utgivning våren 2024.

Kursmaterial för akademien och industrin:

- Avsnitt i kursen ”**Smart produktion**”, del av ett mastersprogram i Hållbar produktion (Material- och produktionsteknik).
- Exempel i kursmoduler inom ramen för **Civilingenjör 4.0**.
- Exempel på moment i seminarieriet ”**Säkra en hållbar produktion – Ta del av 12 seminarier**”
- Uppdatering av kursen i **Skärande bearbetning** som ges på nationell nivå, där även kursmaterialet används världen över.

7.3 Interna rapporter och arbetsmaterial

Nedan ges en förteckning över leveranser och interna rapporter knutna till projektet. Detta underlag skall betraktas som ett arbetsmaterial och kan till största delen tillhandahållas av rapportens första författare.

MS och Leveranser	Beskrivning	Datum Vecka	Redovisade arbeten, dokument
MS 1	Litteraturstudier av materialrelaterade effekter knutna till kallåldring.	9, 27	1B4, 2B2, 6B6, 7B1
MS 2	Kartläggning av uppbyggnaden och förekomsten av TPL.	15	1B1, 6B1
MS 3, TR 1	Slutsatser om sammansättning på arbetsmaterialet och TPL. Uppdatering av MS 1	18 30	1B1, 1B2, 1B4, 2B2, 6B1, 6B6, 7B1
TR 2a	Skärbarhetsuppträdande knutet till struktur och spårämnen i GCI.	24	3B1, 7B2, 7B6
MS 4	Redovisning av fullständiga sammansättningsvariationer i GCI.	21	3B1
MS 5	Rekommendation på ny och fullständig materialspecifikation för GCI.	27	7B3
TR 3	Riktlinjer och anvisningar för fullständiga materialspecifikationer.	33	7B3, p.g.a. pandemin har vissa omprioriteringar gjorts.
MS 6	Resultat från produktionsanalyser regelbunden uppdatering.	12, 24	2B3
MS 7	Utslitningskriterier och principer verktygsbytessekvenser.	27	Omprioriteringar har helt gjorts p.g.a. pandemin.
MS 8	Redovisning av metoder för ämneskontroll före bearbetning med avgränsning till Machine Learning (ML) och genom nanohårdhet.	27	1B3
TR 4b	Redovisning av utvecklad och anpassad modell för verktygslivslängd vid bearbetning av GCI.	30-	1B3, 7B4
TR 4a	Digitaliserad modell för verktygslivslängd.	30	5B1, 5B2, 6B1, 6B2, 6B3, 6B5
MS 9	Redovisning av de ekonomiska effekterna knutna till projektet	33-	7B5, 7SR
MS 10	Redovisning av riktlinjer för teknologiberedning för GCI-komponenter.	33	6B1, 6B2, 6B3, 6B5
TR 5	Redovisning av en integrerad tillverkningsekonomisk modell för CGI.	33-	7B4, 7SR

Nedan redovisas de direkta arbetsrapporterna som är framtagna inom projektet, rapporterna har olika karaktär från traditionella textfiler, till presentationsmaterial inför möten etc. men även datorprogram knutna till Mathcad och Matlab.

Beteckning på interna rapporter och arbetsmaterial	
1B1	2020-04-17 Teknisk rapport - Studie av skärverktygs förslitningsuppträdande ver 2.
1B2	2020-01-09 Nano-indentering GCI – Industrial tests.
1B3	Machine learning and machinability judgement of machining grey cast iron break discs
1B4	Summary Literature Survey 2020-04-20
2B1	Goal document master thesis Andreas S
2B2	Complement and extended literature Survey 2020-09-25
2B3	Industriell provkörning v_c 1200 m/min för hantering av låg skärbarhet.
3B1	Variations in Material Properties of Grey Cast Iron and its Impact on Tool Wear – LTH Version
3B2	Goal document: FNC GCI
3B3	Goal document: XRD GCI, Effect of impurities, trace elements and ageing time on grey cast iron.
4B1	Test plan CI milling and tool life nMQL.
5B1	Analysis of wear behaviour of tools in a milling process - Skärbarhetsprov fräsning
5B2	Machinability and MQL – En detaljerad projektplan.
5B3	Handlingsplan för fortsatta skärbarhetsstudier knutna till verktygsförlitning samt VT22 prioriteringar av återstående projekttid.
6B1	Degradation of multi-layer CVD-coated cemented carbide in finish milling compacted graphite iron.
6B2	On wear mechanisms and performance of Ti(C,N)-Al ₂ O ₃ CVD-coated cemented carbide during finish milling CGI with minimum quantity lubrication.
6B3	A study of tool wear behavior with MQL assisted machining - K. Monroe Diaz
6B4	Machinability study on GCI brake discs - Goal document master thesis.
6B5	Internship Report CRUCHON 2022-10-06 - Performance of PVD coated cemented carbide tools in milling
6B6	Mikrostrukturanalys och hårdhetsmätning värmebehandlat CGI.
7B1	Hardness analysis of resetting CGI 2022-10 – Värmebehandling för återställning.
7B2	Identifiering av material och processparametrar knutet till skärbarhet, referens [23].
7B3	Hållbara materialspecifikationer knutna till GCI (begränsats p.g.a. pandemin).
7B4	Datorprogram Mathcad och utvalt figurmaterial knutet till Coldings ekvation och kostnadssimulering baserad på modifierad teori baserad på referens [21].
7SR	Föreliggande slutrapport.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

En viktig inledande slutsats som kan dras är att inte bara industrin och vissa samhällsfunktioner är känsliga för den typ av störningar som pandemin medfört utan detta påverkar även den tillämpade forskningen och dess bidrag till olika samhällsfunktioner. Det kan konstateras att den tillämpade forskningen och dess fysiska beroende av samverkan med industrin är extra känslig. Vid anpassningen till pandemin blev projektet mer teoretiskt och mindre experimentellt i sin karaktär. Digitala hjälpmedel fick en än större roll i arbetet inte bara ökad modellering och simulering men också som ökade den digitala kommunikationen, vilken utvecklade sig till att vara helt oundgänglig.

8.1 Projektets utmaning och svårighetsgrad

Det aktuella forskningsprojektet tog sig an en forskningsfrågan om mekanismerna bakom kallåldring. Kallåldring vet "alla" att det existerar men ingen har funnit någon lösning eller redovisat en vetenskapligt säkerställd förklaringsmodell som beskriver detta förlopp. Många, både forskare inom akademien och vid industrin, har förklaringar till bakomliggande orsaker. Hittills får dessa förklaringar betraktas som fullt möjliga hypoteser eller som en "tro av religiös karaktär". Även vi som varit aktiva i detta projekt har knackat på dörren till mekanismerna bakom kallåldring. Endast med hänsyn till denna aspekt har även detta projekt misslyckats. Förutsättningarna hade varit betydligt bättre om vi med en gång fått tillgång till stråltid vid någon stor forskningsinfrastruktur. I stället kom ett reseförbud p.g.a. pandemin. Under senaste månaden har vi kommit igång med dessa studier vid MAX IV, inledande resultat har erhållits och nya försök kommer att utföras senare i år. Även en annan internationell forskargrupp har gjort motsvarande studier som vi och anförts en hypotes om att klusterhårdning är kallåldringens bakomliggande mekanism.

En viktig kunskap som vunnits genom studier av samma material med låg respektive hög skärbarhet, är att dessa uppvisar förvånansvärt små materialtekniska skillnader. Tidigare studier har visat, i flera fall, att materialtekniska skillnader inte kunnat detekteras mellan ämnen med bra respektive dålig skärbarhet. Genom nya arbetssätt och vunnen erfarenhet kan dock dessa skillnader identifieras. Detta förhållande gäller även om materialet kan betraktas som åldrat eller färskt. Denna slutsats är i linje med de studier som gjordes för ca 10 år sedan. En försvårande omständighet är att man inte tagit hänsyn till val av verktygsmaterial vid skärbarhetsbedömningen, vilket indirekt behandlats ovan. En allt för kategorisk diskussion har förts där ett material antingen har en bra skärbarhet eller en dålig skärbarhet utan att diskutera att skärbarheten är ett uppträdande som både är beroende av val av verktygsmaterial och vilka processförutsättningar som används, t.ex. valda skärdata användningen av MQL.

8.2 Samverkan med andra projekt

Flera **nya forskningsprojekt** har etablerats under det pågående projektet. Dessa kan delas in i två olika kategorier, en kategori som direkt bygger **på tekniken och tillhörande tillverkningssektorn** och en kategori som bygger på de **insikter och samhällsutmaningar** vi står inför knutet till återvinning, hållbarhet och cirkularitet. Förståelsen om de problem som skapas på sikt då man lägger all sorts metall i samma container på återvinningscentralen inför återvinning. Metaller av olika slag (legeringar) sammansätts till produkter för att sedan används och återvinnas bidrar till att metaller blandas som inte skall blandas, vilket leder till ökade föroreningar och spårämnen återvunnet material som i sin tur leder till egenskapsdegradering och bearbetningsproblem. I dagsläget hanteras detta problem med tillsatser av primär metallråvara som späder ut aktuella föroreningar och spårämnen och anpassar smältan till önskad sammansättning.

Vanligtvis tillsätts 15 % ny primär metall vid gråjärnsgjutning. Enligt uppgift tillsätts 70 % ny primär metall vid gjutning av CGI, trots detta erhålls önskade variationer i material-egenskaper och i skärbarhet.

Projekt har initierats inom följande områden:

- Användning av stora forskningsinfrastrukturer för industriellt värdeskapande (VR).
- Utveckling av hållbara smörjmedel baserade på modifierade vegetabiliska oljor med nano-additiv för ersättning av mineralolja (Vinnova, Mistra).
- Beviljat planeringsanslag för framtagning av ansökan till Vinnovas KC avseende bl.a. integrerade sensorer för optimerad bearbetning (Vinnova).
- Effektiv återvinning av metaller för en hållbar utveckling knutet till produkttegenskaper och tillverkning (Energimyndigheten).
- Ansökan om Vinnovas KC tillsammans med Chalmers avseende hållbar cirkulär ekonomi för aluminiumlegeringar och järnbaserade gjutna legeringar.

8.3 Fortsatt forskning och tillhörande rekommendationer

Med hänsyn till förestående utmaningar föreslås att fortsatt forskning inom området fokuserar på vissa områden enligt nedan.

- **Fullfölja planerade experiment** på stora forskningsinfrastrukturer samt utvärdera dessa samt i bästa fall förklara bakomliggande mekanismerna för kallåldring samt nyttiggöra dessa resultat på olika sätt både akademiskt och industriellt.
- Om studierna enligt punkten ovan inte kan leda vidare så föreslås **förenklade studier göras på enfasiga material** och förhållandevis enkla material, ren ferrit och ren austenit. Försök görs genom nanohårdhetsmätningar (nano-indentering) och kompletteras med neutronstudier eller synkrotronljusstudier för att finna bevis för exempelvis klusterhårdning. Bakgrunden till förslaget är att det är välkänt att även plåtmaterial kallåldras. I dessa fall erhålls de motsatta effekterna vid djuppressning där materialet har en bäst-före-dag för att inte spricka vid formning. Detta indikerar att även dessa material minskar sin duktilitet genom kallåldring.
- Ytterligare undersöka **gränser för spårämnen och föroreningar** knutet till produkttegenskaper och producerbarhet genom nya experimentella försök där samma material används och återvinns cykliskt upp till exempelvis 5 gånger. De 5 största materialgrupperna (tonnage och värdemässigt) bör ingå i ett integrerat forskningsprogram/centra. Konsekvenserna analyseras knutet till gjutning och nödvändiga tillsatser (legeringselement och ympmedel), produkttegenskaper och producerbarhet. Även omfattningen av materialförluster vid upprepade återvinningscykler bedöms och analyseras.

Denna satsning skulle kunna bidra till den nödvändiga och disruptiva teknologi inklusive förfaranden som skulle kunna leda industri och samhälle in i en hållbar cirkulär ekonomi – Kanske den viktigaste forskningssatsningen vi har framför oss med störst hållbarhetspotential.

- Utveckla möjligheterna till **övervakning, styrning och optimering** av bearbetningsprocesser så att dessa kan anpassas till specifika förutsättningar. En realtids-optimering skulle kunna göras med hänsyn förutsättningarna avseende mista detaljkostnad eller högsta produktionstakten eller lägsta miljöbelastningen eller

en kombinerad optimering mot alla kriterierna. Dessa kriterier har olika minima med avseende på skärdata och andra förutsättningar.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

<u>Part</u>	<u>Kontaktpersoner</u>	
Lunds universitet	Jan-Eric Ståhl Rebecka Lindvall Christina Windmark Oleksandr Gutnichenko	 LUNDS UNIVERSITET
Linköpings universitet	Ru Lin Peng	li.u LINKÖPINGS UNIVERSITET
Volvo GTO	Lena Magnusson Åberg Sebastian Sirén	
Automotive Components Floby	Samuel Awe	 AUTOMOTIVE COMPONENTS FLOBY
Seco Tools AB	Rachid M'Saoubi Daniel Johansson m.fl.	SECO 

10 Referenser och utvalda rapporter

- [1] Gjuteriföreningen, 2013.
- [2] Johansson D., Johansson J., Zhou J. M., Gutnichenko O., Schultheiss F., Bushlya V., Ståhl J-E., Variation of Machinability in Cold Age Strengthened Gray Cast Iron, 7th International Swedish Production Symposium, Lund 2016.
- [3] Lindvall Rebecka, Variationer i skärbarhet, Produktionsanalys vid Volvo GTO, Powertrain Production Skövde, Industriell produktion vid Lunds universitet, Lund 2019.
- [4] R. Ebner, Influence of Ageing, Sampling Site and Machining of Test Specimen Upon Tensile Strength and Hardness of Grey Cast Iron, BCIRA, Vol. 50, pp. 689-691, 1963.
- [5] W. Nicola och V. Richards, Age Strengthening of Cast Iron, Phase I: Statistical Verification, AFS Transactions, Vol. 107, pp. 749-755, 1999.
- [6] Von L. Richards, Aging of Graphitic Cast Irons and Machinability, Materials Science and Engineering Department Missouri University of Science and Technology and American Foundry Society, TKA Waupaca, Metals Technology, Inc., Dalton Foundry, ASAMA, Coldwater Manufacturing, Motor Castings, MOOG, Automotive, Wells Manufacturing, Rolla US, 2012.
- [7] V. Richards och D. Van Aken, Age Strengthening of Gray Cast Iron: Kinetics, Mechanical Property Effects, Transactions of the American Foundry Society, Vol. 111, pp. 733-741, 2009.
- [8] W. Stets, A. Lötschert, G. Wolf, Improving the Mechanical Properties of Grey Cast Iron by Alloying with Nitrogen, Casting Plant and Technology, pp. 4-25, 2009.
- [9] Volodymyr Bushlya, Daniel Johansson, Filip Lenrick, Jan-Eric Ståhl, Fredrik Schultheiss, Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass, Wear 376-377. P. 143-151, 2017.
- [10] Gutnichenko, O, Bushlya, V, Zhou, J and Ståhl, J-E 2017, Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with pcBN tools, Wear, vol. 390-391, pp. 253-269.
- [11] Ståhl Jan-Eric, m.fl. Lägesrapport till Vinnova 2019-05-10, Konkurrenskraftigt gråjärn för hållbar utveckling” inom programmet Materialbaserad konkurrenskraft med diarienummer 2017-03213.
- [12] Andreia Sommerfeld, Bernd Böttger, and Babette Tonn, Graphite Nucleation in Cast Iron Melts Based on Solidification Experiments and Microstructure Simulation, J. Mater. Sci. Technol., Vol.24 No.3, 2008.
- [13] Andreia Sommerfeld and Babette Tonn, SPS07, Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing, Sheffield, July 2007.
- [14] Qiulian Wang, Fei Liu, Congbo Li, An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop, Journal of Cleaner Production 52 (2013) 122-133.
- [15] Windmark Christina, Bushlya, Volodymyr and Ståhl Jan-Eric, CPR a general Cost Performance Ratio in Manufacturing - A KPI for judgement of different technologies and development scenarios, (2018) In Procedia CIRP 72. p.1220-1226.
- [16] V. Bushlya, F. Lenrick, J-E. Ståhl, R. M'Saoubi, Influence of oxygen on the tool wear in machining CIRP Annals - Manufacturing Technology 67 (2018) 79-82.
- [17] Jan-Eric Ståhl, Volodymyr Bushlya, Sustainable and Excellent MAterials for FORTHcoming Manufacturing and Technologies - Big Science in Machining, Lund University 2019.

- [18] Ståhl, J-E. 2017, 'An integrated cost model for metal cutting operations based on engagement time and a cost breakdown approach' International Journal of Manufacturing Research, vol. 12, nr. 4, s. 379-404. DOI: 10.1504/IJMR.2017.088397
- [19] Pajazit Avdovic, Machinability variations in Alloy 718 - With focus on machining of turbine components, doctoral thesis at Division of Production and Materials Engineering, Lund University, Lund 2011.
- [20] Daniel Johansson, Tool Life and Cutting Data Modelling in Metal Cutting – Testing, Modelling and Cost Performance, doctoral thesis at Division of Production and Materials Engineering, Lund University 2019.
- [21] Ståhl J-E., Windmark C, HÅLLBARA PRODUKTIONSSYSTEM – Länken mellan teknik och ekonomi med ett globalt perspektiv, ISBN 978-91-44-12642-5, Studentlitteratur AB 2022.
- [22] Ståhl J-E., m.fl. Ståhl J-E, m.fl. Skärande bearbetning i teori och praktik, Studentlitteratur AB i samarbete med SECO Tools AB Fagersta, draftversion och planerad officiell utgivning våren 2024.
- [23] C. Jaunviksna, Machinability study on GCI brake discs – Effects of material variations and process behavior on tool life, (7B2) LTH, 2023.
- [24] K. Monroe Diaz, A Study of tool wear behaviour during milling of Compacted Graphite Iron under dry and minimum quantity lubrication conditions, CODEN: LUTMDN/(TMMW-5335)/1-107/2022, LTH, 2022.
- [25] Bjerke, A. et al. Machinability enhancement by Designed Micro-alloying, till Metalliska Material, Rapport B 735, Jernkontorets forskning, Stockholm 2021.
- [26] Ståhl J-E. Requirements and potential for high performance cutting tools based on superhard phases in new applications, keynote speech, De Beers Diamond Conference hosted by Warwick University, UK; 2016.
- [27] Häggglund, S. (2013). Methods and Models for Cutting Data Optimization, Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [28] Johansson D., (2019) Tool Life and Cutting Data Modelling in Metal Cutting Testing, Modelling and Cost Performance, PhD thesis, Division of Production and Materials Engineering, Lund University, Lund.
- [29] Ståhl J-E., Metal Cutting – Theories and Models, ISBN 978-91-637-1336-1, SECO Tools, Fagersta – Lund 2012.