

JERNKONTORETS FORSKNING

Serie	Nr	Datum	Forskningsuppgift nr
D	813	2005-01-19	80088

(TO 80-60)

PRESSNING OCH VERKTYGSMATERIAL FÖR SINTRADE KOMPONENTER MED HÖG DENSITET (VAMP 17, Delprojekt 2)

Rapport av Birgitta Eyzop, Svenska Keram institutet

Nyckelord: pulvermetallurgi, pressning, verktygsslitage, utstötningkraft, livslängdsutvärdering

SAMMANFATTNING

Delprojekt 2 *Pressning och verktygsmaterial* är en del i det VINNOVA-finansierade projektet VAMP17, *Sintrade komponenter med hög densitet*. Delprojektets mål är att finna lämpliga verktygsmaterial och beläggningar som motstår mekaniska krafter och abrasivt eller adhesivt slitage samt utvärdering av dessa i fullskaleproduktion. Detta har gjorts genom jämförelse av olika verktygsmaterial (två verktygsstål ASP 2053 och Vanadis 6 har jämförts med hårdmetall) och beläggningar (PVD- och CVD-beläggningar har jämförts med obelagda och nitrerade verktyg), undersökning av verktygssmörjning och livslängdsutvärderingar.

Slutsatser

- För obelagda verktyg ger ASP 2053 något lägre utstötningkraft än Vanadis 6.
- PVD-beläggning ger lägre utstötningkraft än både obelagda och nitrerade verktyg, jämförbar med dyna helt i hårdmetall.
- Vid verktygssmörjning ger silikonolja längst effekt dessutom störst varaktig sänkning av utstötningkraften. Absolut störst sänkning av utstötningkraften ger teflon, men den är mycket kortvarig.
- 700 MPa är för lågt presstryck vid pressning av Astaloy Mo med 0,6% zinkstearat för att fullgod smörjning skall erhållas, vilket leder till låg gröndensitet, höga utstötningkrafter och ökat verktygsslitage. Då en lägre smörjmedelshalt inte fungerar när den används vid normala presstryck utan först när trycket ökas samtidigt, vilket beror på att man endast vid riktigt höga tryck pressar ut tillräckligt med smörjmedel mot dynans väggar när man använder låga halter smörjmedel.
- Livslängdsutvärderingen visar att vid höga presstryck är belagda verktyg ett ekonomiskt och nötningsmässigt bra alternativ till hårdmetallverktyg.
- För hårdmetallverktyg deformeras kaviteten under pressningen, vilket ger pressade densiteter som är skenbart högre än den teoretiska densiteten för pulvermaterialet. Den pressade gröndensiteten är dock likvärdig för belagda och hårdmetallverktyg. Verktygen har en variation i formen även om de håller inom toleranserna som angivits på ritningen, men detta har ej mätts upp.

ISSN 0280-249X

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	1
1 FÖRORD	2
2 INTRODUKTION	2
3 EXPERIMENTELL UPPSTÄLLNING	4
3.1 Komponentgeometri	4
3.2 Analys av utstötningskrafter	4
3.3 Mätning av grördensitet	5
3.4 Pulver	5
4 AKTIVITETER	5
4.1 Verktygsmaterial och beläggningar	5
4.2 Verktygssmörjning	7
4.3 Livslängdsutvärdering	7
4.4 Fullskaleproduktion	7
5 RESULTAT	8
5.1 Verktygsmaterial och beläggningar	8
5.2 Verktygssmörjning	10
5.3 Livslängdsutvärdering	11
5.4 Fullskaleproduktion	16
6 DISKUSSION	18
7 SLUTSATSER	20
8 TACK	21
REFERENSER	21

SAMMANFATTNING

Delprojekt 2 *Pressning och verktygsmaterial* är en del i det VINNOVA-finansierade projektet VAMP17, *Sintrade komponenter med hög densitet*. Delprojektets mål är att finna lämpliga verktygsmaterial och beläggningar som motstår mekaniska krafter och abrasivt eller adhesivt slitage samt utvärdering av dessa i fullskaleproduktion. Detta har gjorts genom jämförelse av olika verktygsmaterial (två verktygsstål ASP 2053 och Vanadis 6 har jämförts med hårdmetall) och beläggningar (PVD- och CVD-beläggningar har jämförts med obelagda och nitrerade verktyg), undersökning av verktygssmörjning och livslängdsutvärderingar.

Slutsatser:

- För obelagda verktyg ger ASP 2053 något lägre utstötningskraft än Vanadis 6.
- PVD-beläggning ger lägre utstötningskraft än både obelagda och nitrerade verktyg, jämförbar med dyna helt i hårdmetall.
- Vid verktygssmörjning ger silikonolja längst effekt dessutom störst varaktig sänkning av utstötningkraften. Absolut störst sänkning av utstötningkraften ger teflon, men den är mycket kortvarig.
- 700 MPa är för lågt presstryck vid pressning av Astaloy Mo med 0,6% zinkstearat för att fullgod smörjning skall erhållas, vilket leder till låg gröndensitet, höga utstötningkrafter och ökat verktygsslitage. Då en lägre smörjmedelshalt inte fungerar när den används vid normala presstryck utan först när trycket ökas samtidigt, vilket beror på att man endast vid riktigt höga tryck pressar ut tillräckligt med smörjmedel mot dynans väggar när man använder låga halter smörjmedel.
- Livslängdsutvärderingen visar att vid höga presstryck är belagda verktyg ett ekonomiskt och nötningsmässigt bra alternativ till hårdmetallverktyg.
- För hårdmetallverktyg deformeras kaviteten under pressningen, vilket ger pressade densiteter som är skenbart högre än den teoretiska densiteten för pulvermaterialet. Den pressade gröndensiteten är dock likvärdig för belagda och hårdmetallverktyg. Verktygen har en variation i formen även om de håller inom toleranserna som angivits på ritningen, men detta har ej mätts upp.

Göteborg 2002-11-01

Birgitta Eyzop

1 FÖRORD

Denna rapport är en delrapport i projekt VAMP17, *Sintrade komponenter med hög densitet*, och behandlar delprojekt 2, *Pressning och verktygsmaterial*. I delprojektgruppen ingick (vissa personer har endast varit med delar av projekttiden):

Christer Åslund	ANVAL/Scandinavian Powder Tech
Per Hedenqvist	Balzers Sandvik Coating AB
Mats Larsson	Balzers Sandvik Coating AB
Jan-Olof Krona	Callo AB
Leif Westin	Erasteel Kloster AB
Harri Bahrman	GKN Sinter Metals AB Kolsva
Sigurd Berg	Höganäs AB
Fredrik Vinnerborg	Höganäs AB
Urban Björk	Höganäs AB
Linda Carlinger	Svenska Keraminstitutet
Elis Carlström	Svenska Keraminstitutet
Birgitta Eyzop	Svenska Keraminstitutet
Pauli Sildéus	SKF Mekan AB
Lennart Strömberg	SKF Mekan AB
Ulf Lindstedt	SKF Nova / SKF Group Manufacturing Development AB
Göran Guldstrand	Tixon-Brukens Sverige AB / Bodycote Värmebehandling AB
Lars Ekman	Uddeholm Tooling AB
Katarina Lindström	Uddeholm Tooling AB
Sture Hogmark	Uppsala Universitet
Arne Carlsson	Viking Sewing Machines
Kerstin Fernheden	Jernkontoret

På Keraminstitutet har Linda Carlinger, Elis Carlström, Birgitta Eyzop, Axel Kristensson och Martin Sjöstedt arbetat med projektet.

2 INTRODUKTION

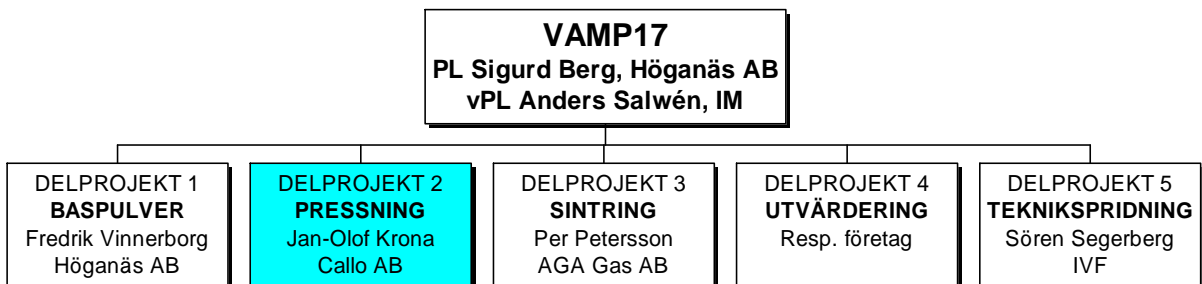
Delprojekt 2, *Pressning och verktygsmaterial*, är en del av projekt VAMP17, *Sintrade komponenter med hög densitet*. Hela projektet VAMP17 har syftat till att höja densiteten för pressade PM-komponenter. En ökad densitet förbättrar hållfasthet och densitet på ett sätt som breddar användningsområdet för PM-tekniken. Pressning och verktygsmaterial har varit ett av flera sätt att försöka öka densiteten hos PM-komponenter. De metoder som använts har varit metoder som går att tillämpa i praktisk PM-produktion och slutmålet är att den sammanlagda effekten av alla delprocessers förbättringar anses ge en robust tillverkningsteknik. Det innebär ökad kvalitet för komponenter vilket stärker PM-branschen och ökar tilltron för PM-tekniken.

PM-komponenter framställs idag normalt med densiteter upp till $7,2 \text{ g/cm}^3$. Det finns en trend att öka densitetsnivån för att ge bättre egenskaper och bredare applikationsområde för PM-komponenterna [1]. Med varmkompaktering [2] har det varit möjligt att öka densitetsnivån upp till $7,4 \text{ g/cm}^3$. Vid dessa höga densitetsnivåer tenderar tillsatser av både smörjmedel och grafit att begränsa den densitet som kan uppnås genom att fylla upp porerna i den pressade komponenten.

För att ytterligare öka densiteten finns det ett behov av att reducera nivån smörjmedel och grafit. Detta ger problem med snabbt ökande verktygsslitage och gör att studier av verktygsslitage har hög prioritet.

Mosbah et al. studerade pressning med och utan väggsmörjning. De visade att det endast finns ett litet inflytande av väggsmörjning på den pressade densiteten [3]. På samma gång visade de att det finns ett stort inflytande av väggsmörjning på utstötningskraften. Turenne et al. studerade friktion vid pulverpressning. De fann att friktionen mot verktygsväggen också influerade utstötningstadiet och mätte maximalt utstötningstryck (statisk friktion) men också den totala utstötningseenergin [4].

Att studera verktygsslitage genom att ta bort verktyget från pressen och göra mätningar på verktygsytan är en tidsödande metod. För att få kontinuerliga och snabbare värden på verktygsslitage utvecklade de en metod som mäter krafterna under pressning och utstötning under pressning i produktionsstakt. Temperaturen har en signifikant effekt på hur smörjmedlen fungerar [5]. Detta är ett ytterligare argument varför det är viktigt att studera friktion och utstötningskrafter under produktionsliknande villkor där det finns tid att bygga upp en typisk produktionstemperatur.



Projektets huvudmål:

- Projektet skall definiera tillverkningsmetod som möjliggör produktion av slutkomponent genom enkel pressning till densitetsnivåer angivna i delmål.
- Projektet skall överföra teknik till användare inom PM-processen.

Projektets delmål:

- Projektet skall visa att tillverkning i laboratorieskala är möjlig till en grändensitet av $7,55 \text{ g/cm}^3$ för cylindrisk kuts med diameter 25,4 mm för 50,0 g av Distaloy AE + 0,3% C.
- Projektet skall utvärdera kostnadseffektiv sintring för temperaturer $\geq 1200^\circ\text{C}$.
- Projektet skall undersöka möjligheterna till uppkolning under sintring. För komponent med 0,2% C i kärnan skall ytkolhalten, skikt 5 mm vara 0,5%.
- Projektet skall för tillverkningskoncept visa inverkan av formfaktor.
- Projektet skall för angivna slutkomponenter verifiera tillverkningskoncept.

Mål för delprojektet:

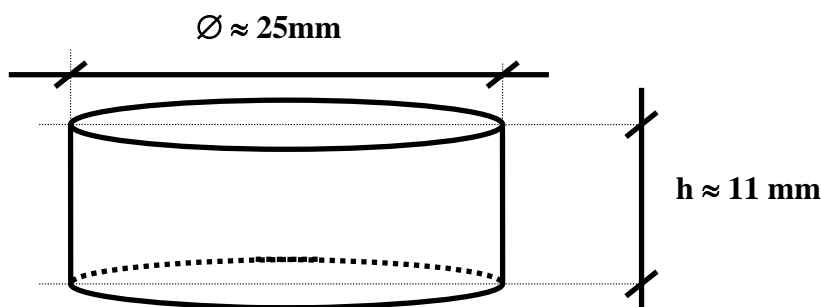
- Finna lämpliga verktygsmaterial som motstår mekaniska krafter samt abrasivt eller adhesivt slitage.
- Rangordna provade material/kombinationer.
- Finna lämplig typ av beläggningsprocess och ytbeläggning.
- Utvärdering av fullskaleproduktion.

3 EXPERIMENTELL UPPSTÄLLNING

Inom delprojektet jämfördes olika verktygsmaterial och ytbeläggningar i serier om 600 komponenter. På SKF Mekan kördes en produktionsserie för utvärdering av fullskaleproduktion. Dessutom görs en jämförelse mellan verktyg av obelagda och belagda verktygsstål samt hårdmetall för att undersöka nötning och livslängd vid olika förhållanden.

3.1 Komponentgeometri

Den geometri som används vid mätning av komponenters grändensitet (GD) är cylindrisk och kallas ofta för GD-kuts. Figur 1 visar hur komponenten ser ut efter kompaktering.



Figur 1. Geometri för GD-kuts.

Vid fullskaleproduktionsförsöken används en mutter, se figur 2, som ingår i SKF Mekans ordinarie produktion. Vid tillverkningen körs kampanjer om 30 000 muttrar och årsproduktionen är ca 4 miljoner. Muttern pressas med 150 tons presskraft till en grändensitet av $7,2\text{ g/cm}^3$ och har efter pressning innerdiameter 63 mm, ytterdiameter 85,5 mm och tjocklek 12,5 mm samt vikt 200 g.



Figur 2. Mutter för utvärdering av fullskaleproduktion.

3.2 Analys av utstöttningskrafter

Utslöttningskraften kan dels användas för att karakterisera smörjningen mot verktygsväggen, dels för en tidig indikation på verktygsslitage. Ett högt maximum visar på problem med utstötning och fluktuation av kurvan strax efter maximum ger också en indikation på nötningssproblem. Genom att studera utstöttningskraften som funktion av tiden fås en bild av hela utstöttningsförloppet. Olika verktygsmaterial ger olika beteenden vilka syns tydligt i denna typ av diagram. Ökande maximum av utstöttningskraften ger en tidig indikation på slitaget av pressverktyget.

3.3 Mätning av gröndensitet

Mätning av gröndensitet sker genom en mätning av GD-kutsens diameter och höjd för beräkning av dess volym. Därefter vägs GD-kutsen på en labvåg med hög noggrannhet och densiteten beräknas.

3.4 Pulver

I delprojektet används fyra olika pulver, Astaloy Mo, Distaloy AE, ASC 100.29 och PASC60 från Höganäs AB. I Distaloy AE ingår 0,49% Mo, 3,87% Ni och 1,43% Cu medan Astaloy Mo endast har 1,60% Mo som legeringsämne. Det rena järnpulvret är mjukare och anses därför mer lättpressat. Pulver som är förlegerade med Mo anses som mer slitande och svårare att pressa till höga densiteter. PASC-pulvret valdes eftersom det var det pulver som användes för produktion av den komponent som pressades i produktionsmiljön.

4 AKTIVITETER

Delprojekt *Pressning och verktygsmaterial* löpte över tiden 1999-02 till 2002-06 med målsättningen att optimera presstryck, verktygsmaterial och verktygssmörjning som en del i konceptet att nå projekt målet densiteten $7,55 \text{ g/cm}^3$ för GD-kuts av Distaloy AE med $<0,3\%$ C.

4.1 Verktygsmaterial och beläggningar

Verktøy av två olika verktygsstål, Vanadis 6 (Uddeholm Tooling AB) och ASP 2053 (Era-steel Kloster AB), belades med olika ytbeläggningar (fakta, se tabell 1) och jämfördes med hårdmetallverktyg. Vanadis 6 är ett PM verktygsstål medan ASP 2053 är ett PM snabbstål tillverkat med ASP/ESH-processen (Electro Slag Heating). Endast dynorna belades medan stansarna användes obelagda. Egenskaper som påverkar verktygsprestandan visas i figur 3. GD-kutsar kallkompakterades vid 700 MPa. Materialen var Astaloy Mo och ASC 100.29, båda med 0,6% respektive 0,8% zink-stearat, och tillverkningshastigheten ca 5-6 bitar per minut.

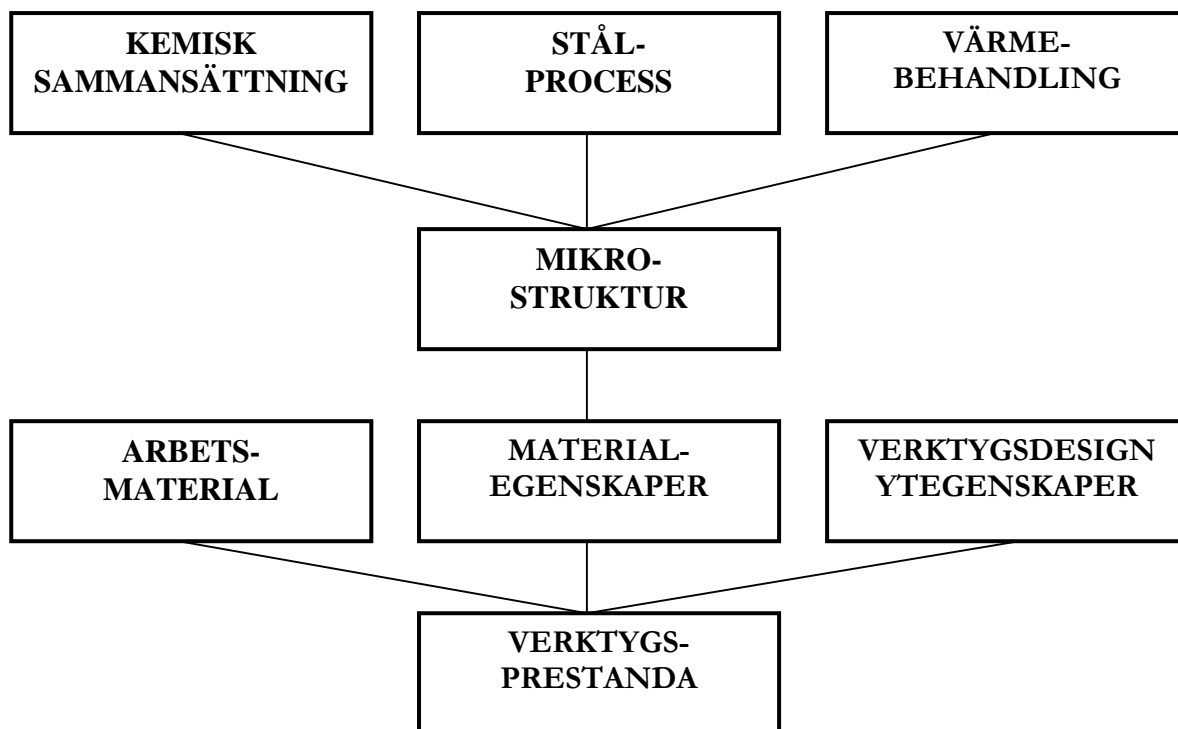
Vid CVD (Chemical Vapour Deposition) reagerar två reaktanter i gasfas på ytan av den detalj som skall beläggas. Fördelar med CVD är att beläggning kan ske med många olika material (keramer, metaller och halv-ledare), relativt tjocka skikt kan beläggas vilket ger bra slitageegenskaper, beläggningen har en fin mikrostruktur med låg porositet och god vidhäftning samt det är den bästa metoden för att belägga i hål och på skymda ytor. Nackdelar med CVD är att substrattemperaturen blir hög vilket ökar risken för formförändring av verktyget under beläggningsprocessen, alla provets ytor beläggs och att en CVD-reaktion som fungerar bra på ett substrat ej behöver fungera på ett annat. Eftersom man endast belägger med ett tunt skikt går det inte att efterbearbeta för att kompensera för formförändringen. PVD (Physical Vapour Deposition) är en process där beläggning materialet förångas genom upphettning i vakuum och deponeras på substratet. Med PVD kan det vara svårt att nå ned i djupa hål med beläggningen, medan en av fördelarna är den låga beläggningstemperaturen.

Olika beläggningstekniker ger skilda skiktjocklekar. Val av skiktjocklek i nötningstillämpningar bestäms främst av hur mycket slitage som kan tolereras. En för tjock beläggning ger sämre måtnoggrannhet, ytjämnhet och ökad risk för avflagnings till ett högre pris. Dessutom har olika tekniker olika förmåga att bilda jämnt tjock beläggning på komponenter med besvärliga geometrier och vissa processer ger försämrade ytjämnhet [6]. Allmänt ger ytomvandlingsmetoder bättre vidhäftning av skiktet än ytbeläggningsmetoder. Substratets ytfinhet är viktig för slutresultatet av ytbeläggningen, oavsett metod. Substratet måste bära beläggningen vid

belastning utan att deformeras detta gör att det krävs en hög hårdhet på substratmaterialet. En viktig aspekt vid beläggning av pressverktyg är att friktionskoefficienten sänks.

	Nitrering	Balinit Futura PVD	CVD TICOL	Balinit Hardlube PVD	Balinit Duplex PVD
Kemisk beteckning	N ₂	TiAlN	TiC	TiAlN/WC/C	CrN
Beläggningstemperatur (°C)	480-530	480	960-1 020	480	480
Mikrohårdhet (HV 0,05)	1 100 (HV 1)	3 000	3 000	2 600	1 750
Friktionskoefficient mot stål utan smörjning		0,4		0,2	0,5
Nominell skiktjocklek (µm)	100 (5) ASP 200 (12) V6	1-5	5-7	2-6	1-4
Termisk stabilitet		+++++	++++	+++	++++
Abrasiv slitstyrka		++++	+++++	++++	++
Skydd mot kallsvetsning		+++		++++	++

Tabell 1. Beläggningar, data från Balzers Sandvik Coating och Tixon-Brukens Sverige
CVD = Chemical Vapor Deposition, PVD = Physical Vapor Deposition



Figur 3. Egenskaper som påverkar ett verktygs prestanda.

4.2 Verktugssmörjning

För att kunna pressa och stöta ut komponenter krävs det så mycket som 0,40-1,00% smörjmedel i tillsats till pulvret, medan endast 0,05% behövs om smörjmedlet appliceras på verktyget. Verktugssmörjning har därför utvecklats för att minska halten inre smörjmedel och därigenom kan komponenter med högre densitet framställas. Bl a har Gasbarre utvecklat ett system vilket bygger på fluidisation av smörjmedlet och elektrostatisk attraktion [7]. Det finns tekniska problem men resultaten som uppnåtts visar på potentialen med verktugssmörjning. Produktionstakten blir visserligen lägre med verktugssmörjning men genom att använda en servodriven fyllskopa har Gasbarre lyckats göra minskningen så liten som möjligt. Dessutom får komponenterna bättre ytfinhet än om smörjmedlet tillsätts till metallpulvret. Även återfjädringen vid pressning blir lägre, vilket ger jämnare pressresultat mellan olika komponenter och mindre storleksvariationer. Med verktugssmörjning minskar även slitaget på verktyget vilket ger bättre pressresultat och mindre variationer. Komponenterna löper även mindre risk att gå sönder vid utstötning från pressen då utstötningskraften blir lägre.

En inledande studie med fyra olika smörjmedel, CRC 5-56, grafit, silikonolja samt polytetrafluoreten (PTFE eller teflon i dagligt tal), gjordes genom manuell sprayning av smörjmedlet på pressverktyget. Pressning sker vid 700 MPa med Distaloy AE pulver utan inre smörjmedel. Efter en applicering följdes utstötningskraften under ett antal presscykler, därigenom var det möjligt att se effekten av kvarvarande smörjmedel.

4.3 Livslängdsutvärdering

Utifrån resultaten i aktiviteten 4.1 *Verktugsmaterial och beläggningar* gjordes två verktyg i ASP 2053 (Erasteel Kloster AB) med beläggning av Balinit Hardlube (Balzers Sandvik Coating AB), ett obelagt verktyg i ASP 2053 samt ett referensverktyg i hårdmetall. Pulver är Astaloy Mo med 0,6% Zn-stearat.

Analys av livslängd och nötning av pressverktygen gjordes genom undersökning av:

- Upptagning av presskurvor och registrering av utstötning krafter.
- Fotografering av verktyg.
- Avtryck av pressverktyget gjordes med en replikametod och analyserades med avseende på ytstruktur.
- Undersökning av eventuella förändringar hos provbitarna till följd av verktygsnötning (mätning av densitet, dimension, ytstruktur).
- Verktygen skickades efter avslutad pressning till Uppsala Universitet för analys där.

Avtryck och fotografering av pressverktyget gjordes efter 500, 3 000 samt 10 000 kutsar i varje serie. Undersökning av GD-kutsarna gjordes på ca var 300:e komponent. Uppstod stort slitage under försöken så avbröts pressningen så att verktyget inte var för slitet när det skickades till Uppsala Universitet.

4.4 Fullskaleproduktion

Fullskaleutvärderingen gjordes för att långtidstesta ett verktyg med PVD-beläggning och se om de positiva effekterna kvarstod vid en körning i produktionsmiljö och med ett antal producerade komponenter som är typiskt för en produktionskampanj. Ett lyckat resultat skulle ge möjligheter att uppnå lägre verktygskostnader än med hårdmetallverktyg. För utvärdering i fullskaleproduktion tillverkades en mutter i hos SKF Mekan AB. SKF Mekan är ensamma om att tillverka denna typ av mutter (en låsmutter för rullningslager) med PM och produktionen ligger på 4 miljoner godkända muttrar per år. Den mutter som används i dessa försök väger 0,200 kg och arean är 25,8 cm². Gröndensiteten är 7,15-7,2 g/cm³, presstrycket

150 ton och produktionstakten 10-12 slag per minut. Verktyget var tillverkat av ASP 2053, vakuumbehandlat, avspänningsglödgat och belagt med Balinit Hardlube. Verktyget har mikroblästrats före polering och beläggning. Matris och dorn har hårdhet HRC 63 samt stämplarna HRC 62. Det diametrala spelet är 3/100 mm mellan matris och stämpel samt 2/100 mm mellan don och stämpel. Normalt använder SKF Mekan ett verktyg i hårdmetall.

Testprogram och dokumentation:

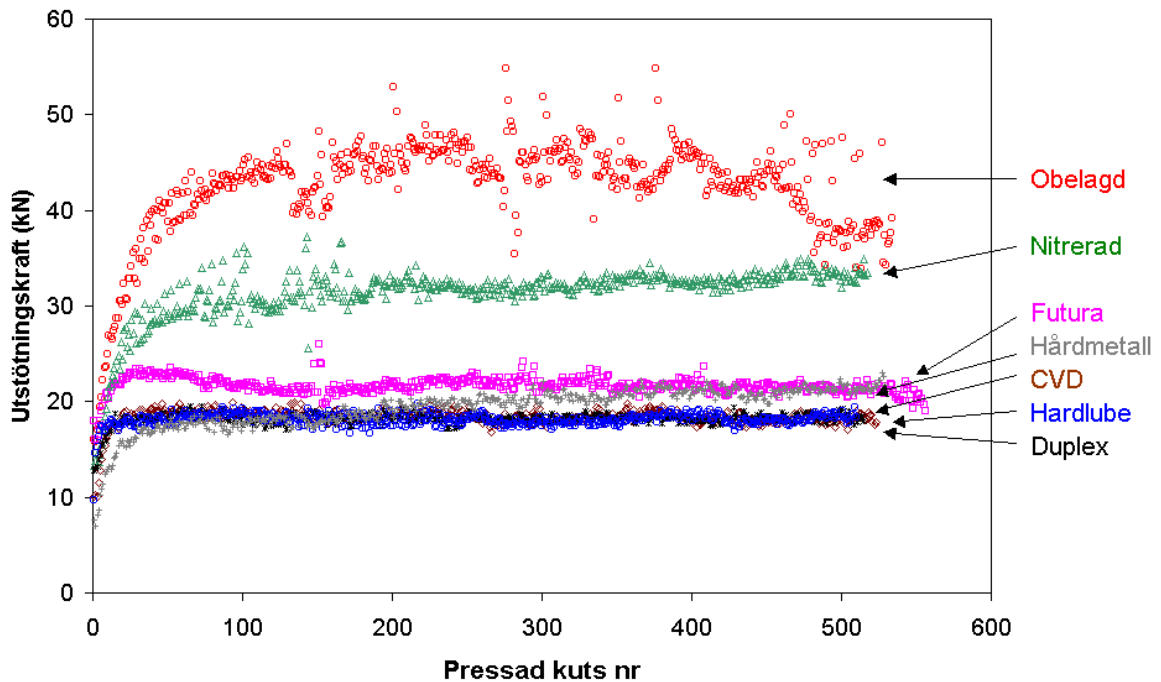
- Inkörning av verktyget måste ske långsamt de första 5-10 komponenterna.
- Efter 500 komponenter inspekteras verktyget visuellt och fotograferas med digitalkamera samt var 100:e mutter tas ut för undersökning.
- Efter 2 000 komponenter inspekteras verktyget visuellt och fotograferas med digitalkamera samt var 100:e mutter tas ut för undersökning.
- Efter 10 000 komponenter inspekteras verktyget visuellt och fotograferas med digitalkamera samt var 200:e mutter tas ut för undersökning.
- Pressparametrar och utstöttningskrafter loggas kontinuerligt.
- Journal förs över förändringar/justeringar i parameterinställningar, ev polering av verktyget m m.
- Av största vikt är att undersöka om det blivit repor på verktyget eller om det blivit påkletningar och då speciellt studera kritiska punkter på verktyget, t ex hörn.

5 RESULTAT

5.1 Verktygsmaterial och beläggningar

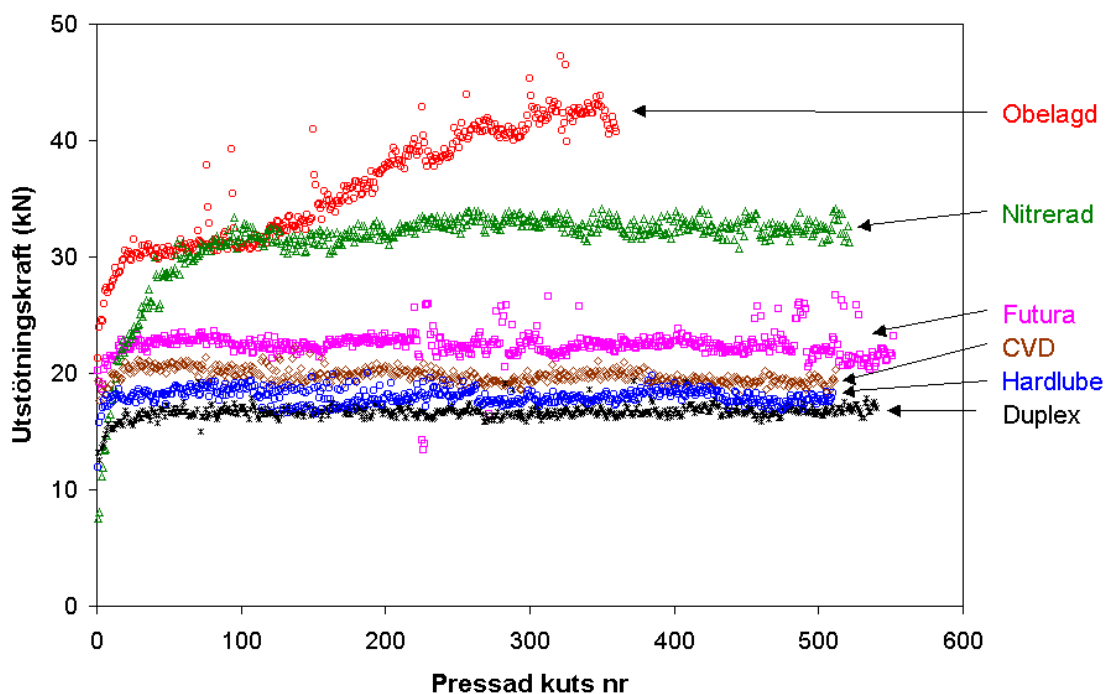
Resultaten av utstöttningskraftsmätningar visade sig vara reproducerbara och gav samma maximum och kurvutseende vid upprepade testningar av samma pulver. Polering av verktyg är reproducerbart inom vissa gränser, då för många poleringsomgångar (användningar) förändrar spelet mellan stans och dyna i verktyget och därigenom påverkar utstöttningskraften. Pulver med lägre halt av smörjmedel (zinkstearat) sliter mest på verktygen och ger högre utstöttningskraft. Kallsvetsning (stick-slip) är mer vanligt förekommande i Astaloy Mo än för ASC 100.29, d v s sekundära, tertiära, o s v toppar är tydligt synliga i utstöttningsdiagrammen.

Utsöttningskrafterna för de olika beläggningarna jämfört med obelagt och hårdmetallverktyg visas i figur 4 för Vanadis 6 och för ASP 2053 i figur 5.



Figur 4. Utstöttningskrafter för Vanadis 6 verktyg, Astaloy Mo med 0,6% Zn-stearat.

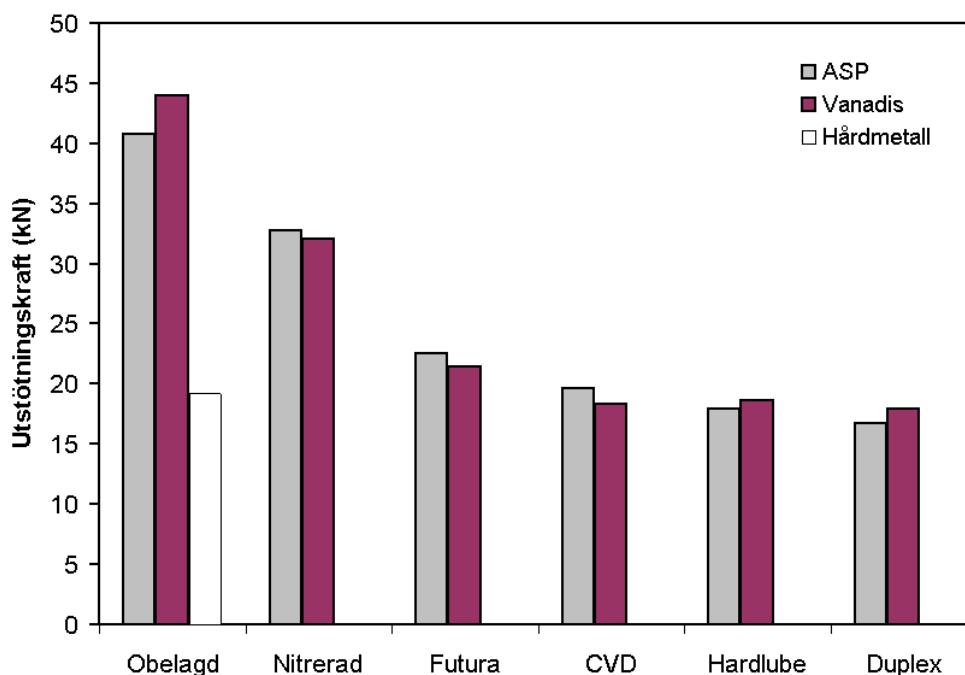
Kurvan för det obelagda verktyget är ojämn då pulver fastnar i verktyget, ett skikt byggs upp för att sedan nätas bort vilket ger varierande utstöttningskrafter. Vid bortnötning av påsmetat material följer delar av verktygsstålet med, s k adhesiv nötning.



Figur 5. Utstöttningskrafter för ASP 2053 verktyg, Astaloy Mo med 0,6% Zn-stearat.

För obelagda verktyg gav ASP 2053 något lägre utstöttningskraft än Vanadis 6, se figur 6. PVD-beläggning gav lägre utstöttningskraft än både obelagda och nitrerade verktyg och dessutom en konstant utstöttningskraft oavsett antal pressade kutsar (upp till 500 pressade

kutsar) och basmaterial. Hardlube och Duplex ger något bättre resultat än den hårdare beläggningen Futura och har utstötningskrafter motsvarande en dyna helt i hårdmetall. Nitring ger den minsta förbättringen av verktygsslitage av de testade belägningarna, men kan trots det vara användbar tack vare att det är en enkel och billig metod. CVD-beläggningar har troligen god vidhäftning och ger tjockare skikt än PVD, d v s längre hållbarhet vid slitage av skiktet, men den högre beläggningstemperaturen innebär större problem att hålla toleranser.



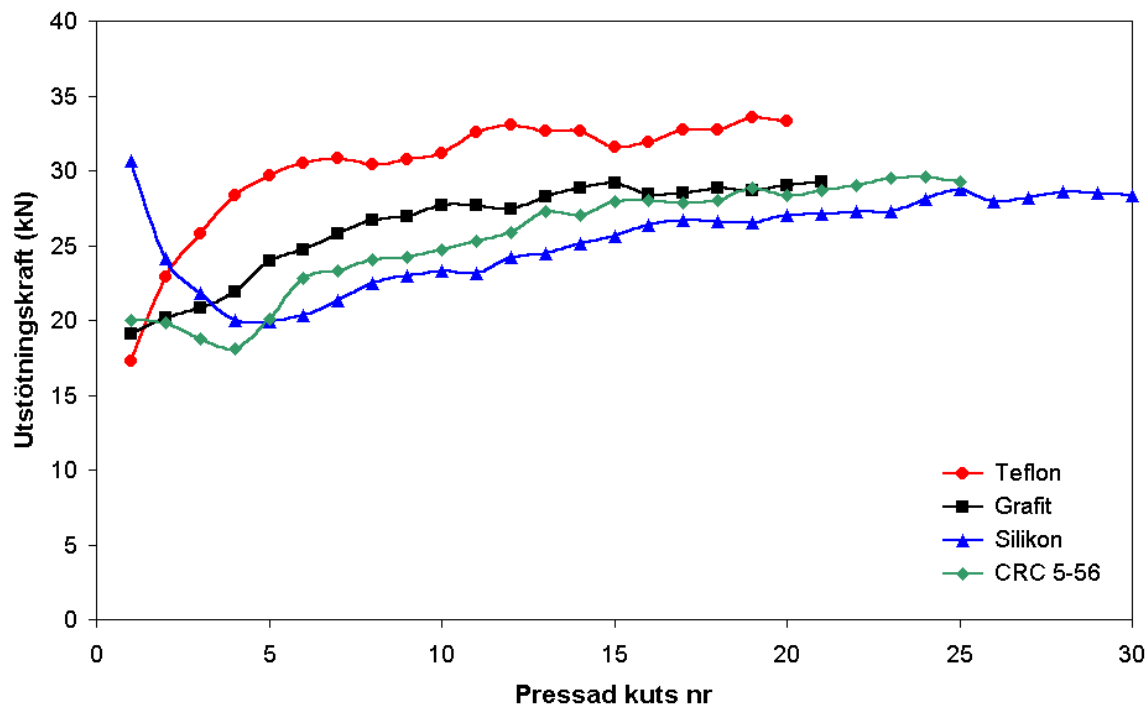
Figur 6. Jämförelse mellan ASP 2053, Vanadis 6 och hårdmetall, pulver Astaloy Mo med 0,6% Zn-stearat.

5.2 Verktygssmörjning

Den inledande studien med en jämförelse mellan teflon, grafit, silikonolja och CRC 5-56 visar att olika smörjmedel minskar den maximala utstötningskraften olika mycket, se figur 7. Dessutom har de olika lång effekt och olika reaktionstid (tid från appliceringen tills dess en effekt av smörjningen kan iakttas), se tabell 2. Silikonolja hade den mest långvariga effekten och gav dessutom störst varaktig sänkning av utstötningskraften. Absolut störst sänkning av utstötningskraften gav teflon, men den var mycket kortvarig. Försöken avbröts då det inte bedömdes som rimligt att verktygssmörjning kommer att bli praktiskt användbar i produktionen inom närmaste framtiden p g a tekniska problem och lägre produktionsstakt.

Smörjmedel	Minskning i utstötningskraft (kN)	Reaktion	Effekt försvunnen efter (antal komponenter)
CRC 5-56	9	Fördröjd	20
Grafit	10	Direkt	10
Silikonolja	8	Fördröjd	40
Teflon	13	Direkt	10

Tabell 2. Effekt av externt smörjmedel

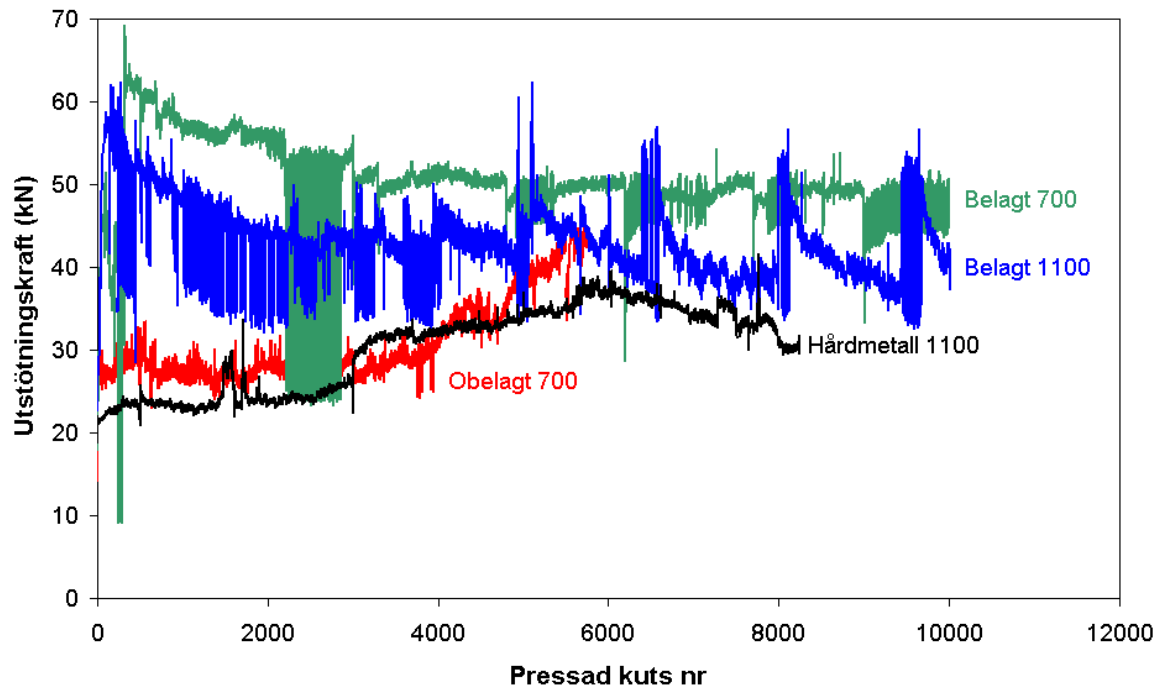


Figur 7. Variation i maximal utstötningkraft för olika externa smörjmedel, presskraft 700 MPa, pulver Distaloy AE.

5.3 Livslängdsutvärdering

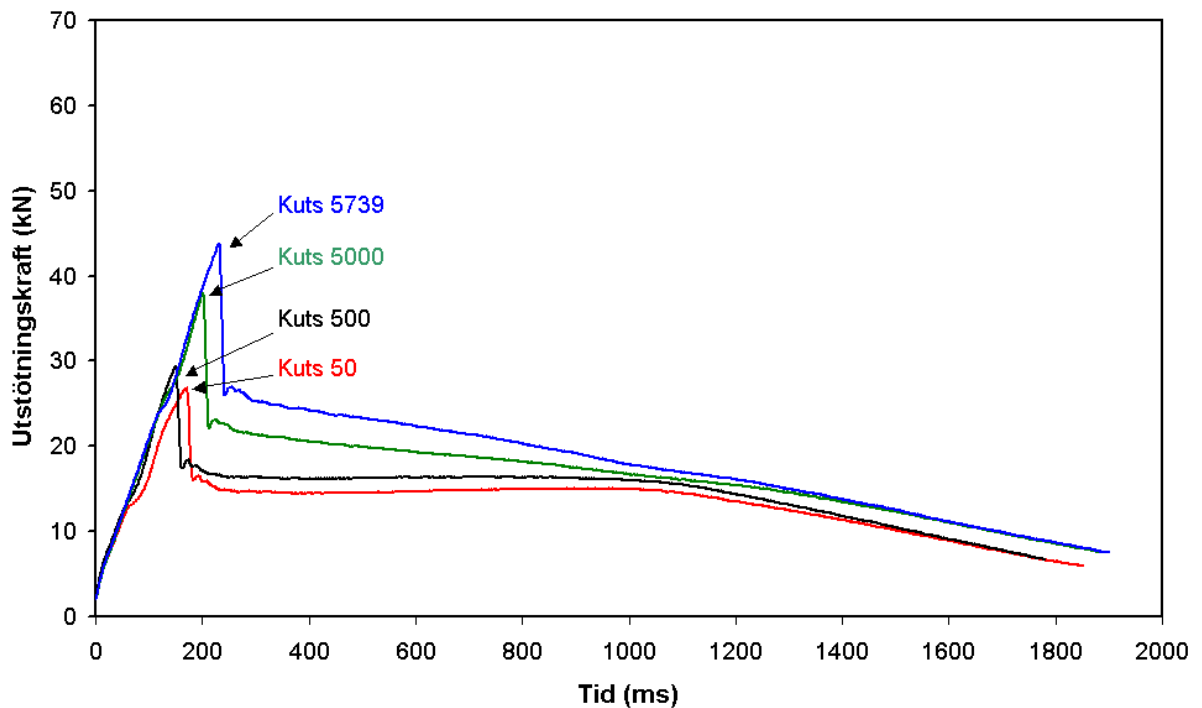
Ett verktygs livslängd beror inte enbart på vilket material som pressas, utan även till vilken gröndensitet som komponenten pressas, vilken mängd smörjmedel som tillsätts, hur mycket nötning som kan tillåtas, substratets respektive beläggningens egenskaper, verktygets komplexitet samt toleranser mellan verktygets olika delar [8]. Med verktyg i stål kan ofta upp till 200 000 komponenter pressas och för hårdmetallverktyg upp till 1 000 000 komponenter. Störst slitage på verktyget sker vid utstötning av den pressade komponenten och då i verktygets övre del och framför allt på dynan.

Presserien med hårdmetallverktyg vid 1 100 MPa avbröts efter 8 248 kutsar p g a höga oljud vid utstötningen. Då var understämpeln något vriden åt vänster och det var kraftiga påkletningar på understämpelns skaft. Det belagda verktyget kunde köras alla 10 000 kutsar vid 1100 MPa. Pressning med det obelagda verktyget vid 700 MPa fick avbrytas efter 5 742 kutsar då utstötningkraften stigit från 27 kN till 45 kN. Det belagda verktyget kunde köras alla 10 000 kutsar vid 700 MPa, se figur 8.



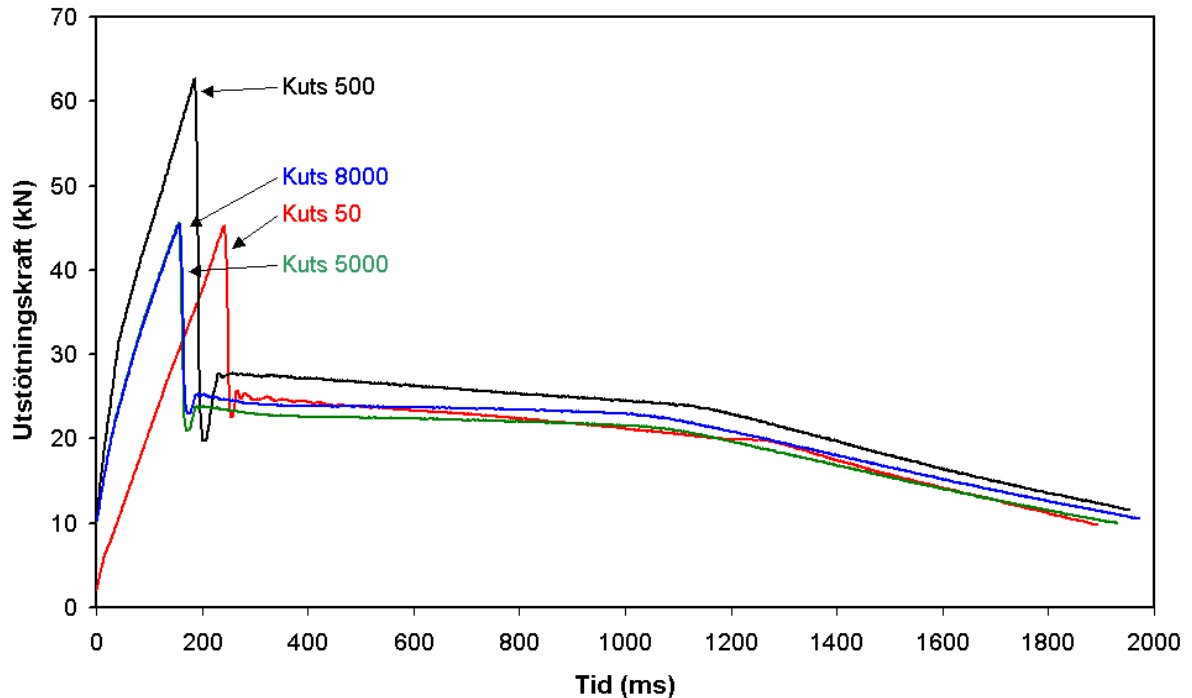
Figur 8. Maximal utstötningkraft för hela presserien.

Utstötningkraften för det obelagda verktyget steg genom hela presscykeln, se figur 9. Det skedde en viss påkletning av pulver på verktyget vilket ledde till ökade utstötningkrafter. När pulverskiktet slets bort följer en del av verktygsmaterialet med och adhesiv nötning sker. Replikaavgjutningarna visar tydligt det ökande verktygsslitage, dels i form av påklettat pulver och dels som bortnött verktygsmaterial.



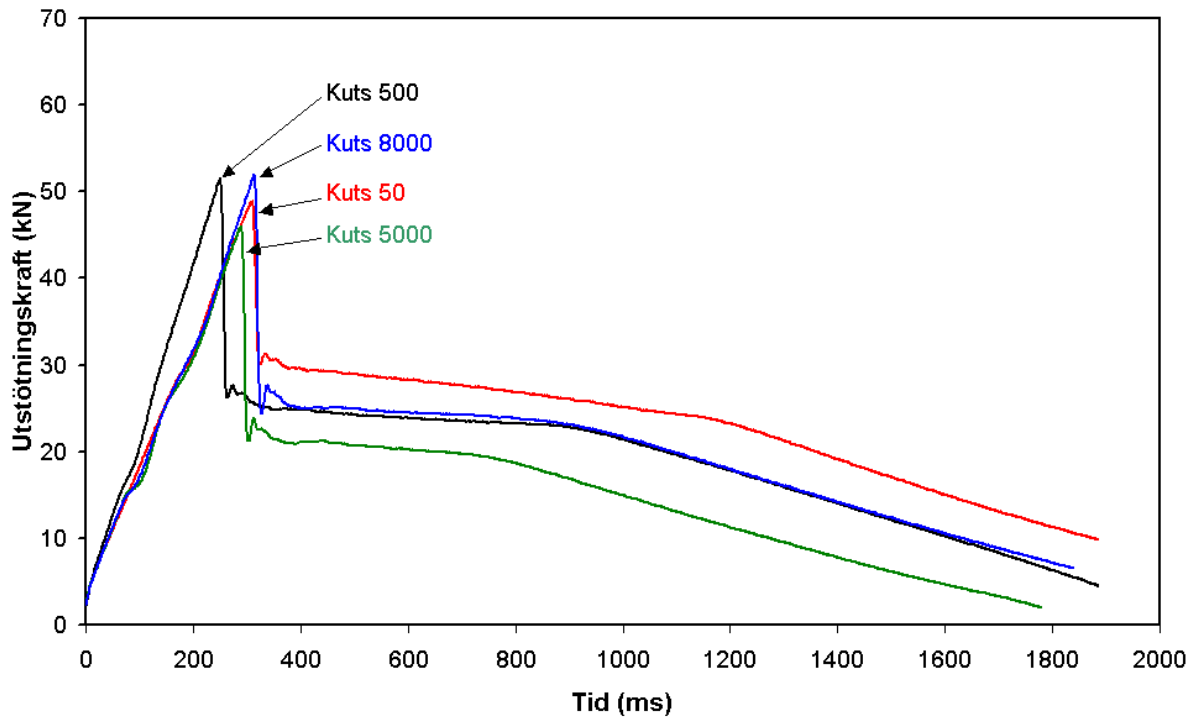
Figur 9. Utstötningkraft för obelagt verktyg, presstryck 700 MPa.

Det belagda verktyget vid 700 MPa har högst utstöttningskrafter av alla fyra verktyg. I början ligger utstöttningskraften på 60 kN för att efter ett inkörningsskede minska till ca 50 kN, se figur 10. Även här sker påkletning av pulver men PVD-skiktet skyddar verktyget från kraftig nötning, vilket också syns på avgjutningarna.



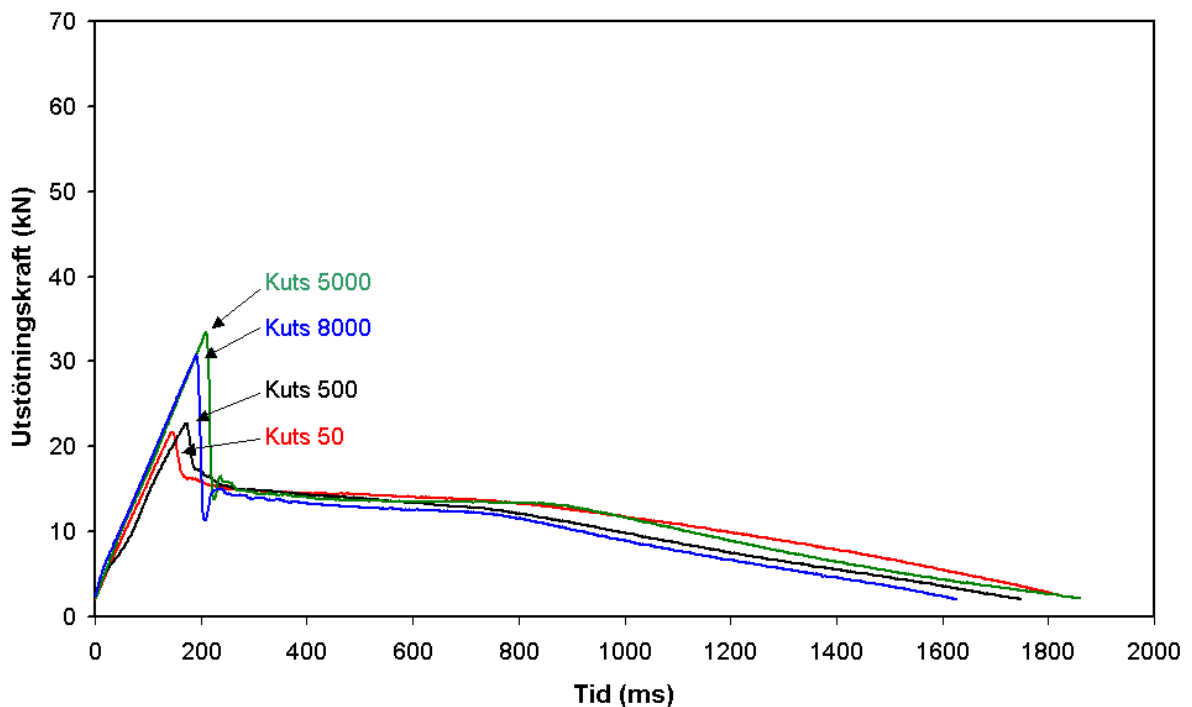
Figur 10. Utslöttningskraft för belagt verktyg, presstryck 700 MPa.

Det belagda verktyget, presstryck 1100 MPa, hade höga utstöttningskrafter i början för att efter ett inkörningsskede minska, se figur 11. Även här skedde påkletning av pulver under pressningen, vilket ledde till höga utstöttningskrafter (55 kN), men PVD-skiktet med låg friktion gjorde att det kunde släppa utan att verktyget skadades. Då återgick utstöttningskraften till den lägre nivån (44 kN) tills ett nytt pulverskikt byggts upp. Detta upprepas sedan under hela presserien. Förloppet med påkletning av pulver och sedan bortnötning av pulverskiktet syns tydligt på gummiavgjutningarna.



Figur 11. Utstöttningskraft för belagt verktyg, presstryck 1100 MPa.

För hårdmetallverktyget vid det förhöjda presstrycket ökar den maximala utstöttningskraften under presserien, se figur 12. Avtrycken i gummi visar tydligt den ökande påkletningen av pulver på verktyget, vilket leder till konstant ökande utstöttningskrafter.

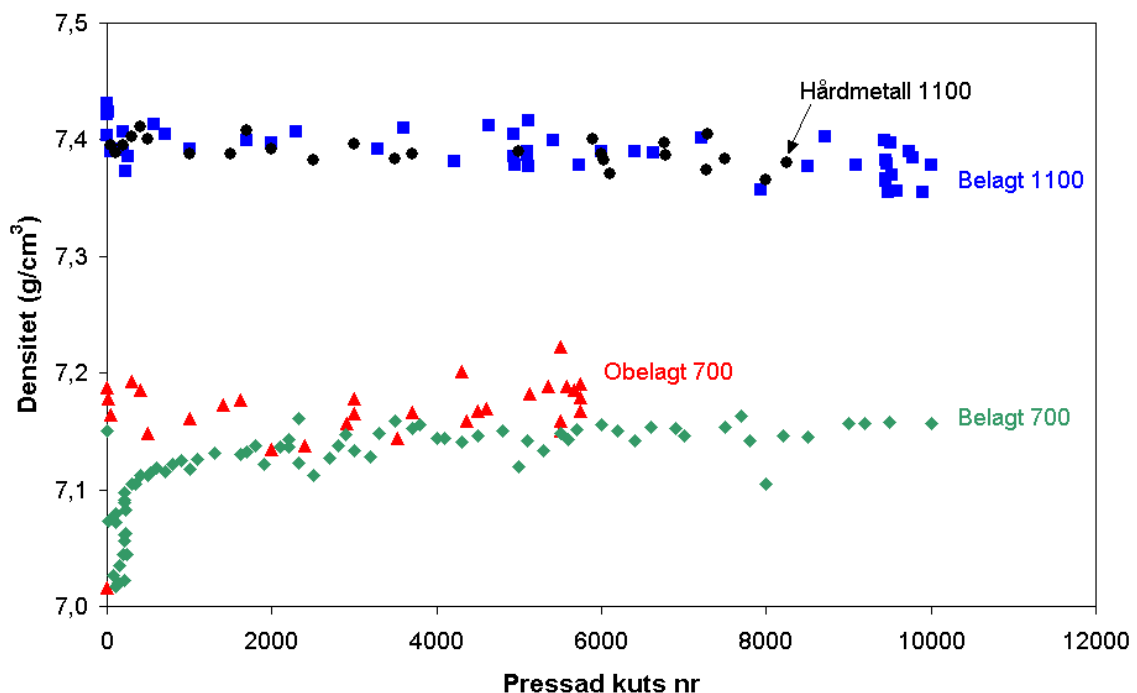


Figur 12. Utstöttningskraft för hårdmetallverktyg, presstryck 1100 MPa.

Kompakteringskurvor för de fyra verktygen, figur 13-16, visar att kompakteringsförloppet var oberoende av verktygsmaterial och eventuellt slitage. Däremot sjönk pressad densitet för det obelagda och hårdmetallverktygen med ökande verktygsslitage.

Ett materials teoretiska densitet (TD) är den beräknade porfria densitet där hänsyn är tagen till mängden av varje ingående ämne och dess specifika vikt. Under kompaktering av varje kuts registreras kontinuerligt stämplarnas läge vilket gör att kutsens höjd kan beräknas. Mängden pulver som fylls i är inställd i pressen och ur dess värden kan den pressade densiteten (PD) beräknas. Gröndensiteten (GD) beräknas efter utstötning av kutsen ur verktyget genom att kutsens diameter och höjd mäts för beräkning av dess volym. Därefter vägs GD-kutsen på en laboratorievåg med hög noggrannhet och densiteten beräknas. Under höga tryck deformeras kaviteten i pressverktyget vilket leder till en pressad densitet som är skenbart högre än den teoretiska. Vid pressning med maximalt tryck är densiteten högre än när trycket minskats och densiteten sjunker ytterligare efter utstötning av komponenten p g a springback (eller återfjädring), vilket innebär att komponenten expanderar något då det pålagda trycket försvinner.

Gröndensiteterna för de pressade GD-kutsarna i det belagda och hårdmetallverktyget vid presstryck 1 100 MPa är $7,39\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ respektive $7,39\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, se figur 13. Ingen förändring sker under försökens gång. För det obelagda och det belagda verktyget vid 700 MPa är gröndensiteten $7,16\pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ respektive $7,14\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Med det belagda verktyget vid 700 MPa uppnåddes ej presstrycket helt för de första 1 000 GD-kutsarna, vilket gör att även densiteten är lägre i början. Gröndensiteten $7,14\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ gäller för kuts 1 100 till 10 000, tas samtliga GD-kutsar med blir den $7,11\pm 0,04 \text{ g/cm}^3$.



Figur 13. Gröndensitet för de pressade GD-kutsarna

Vid jämförelse mellan pressade densiteter ur kompakteringskurvorna och uppmätta gröndensiteter framkommer stora skillnader mellan verktygen, se tabell 4. Den låga densiteten för kuts 8000 för det belagda verktyget beror på att ett skikt av pulver är under uppbyggnad på verktygsväggen. I de fall då gröndensiteten är högre än den pressade densiteten är det ej samma kuts som mätts.

Vid utstötning av pressade komponenter ur verktyg sker ofta en expansion, s k återfjädring eller spring-back, då det pålagda trycket försvinner. Det medför att gröndensiteten blir lägre än den pressade densiteten. För de belagda verktygen är återfjädringen försumbar. Hård-

metallverktyget har stor återfjädring, som dock minskar vid ökat slitage på pressverktyget eftersom den pressade densiteten sjunker. Även det obelagda verktyget har stor återfjädring, vilken minskar då verktygsslitaget ökar och den pressade densiteten minskar.

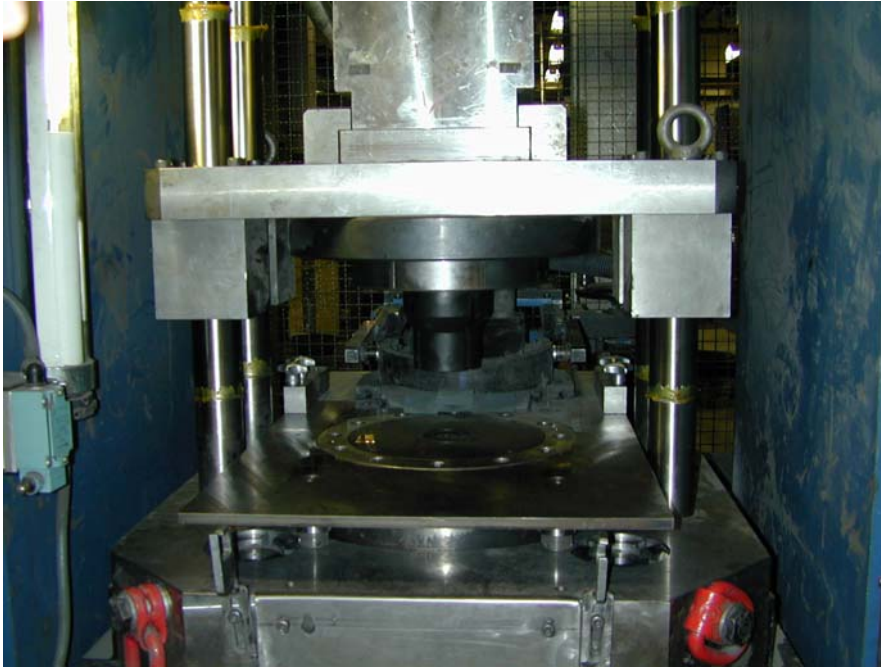
		Kuts 50	Kuts 500	Kuts 5000	Kuts 8000
Obelagt, 700 MPa	GD (g/cm ³)	7,16	7,15	7,18	
	F _{ut} (kN)	26,9	29,4	38,1	
Belagt, 700 MPa	GD (g/cm ³)	7,08	7,11	7,12	7,11
	F _{ut} (kN)	45,3	62,7	45,6	45,5
Belagt, 1100 MPa	GD (g/cm ³)	7,39	7,41	7,42	7,36
	F _{ut} (kN)	48,9	51,3	45,6	36,9
Hårdmetall, 1100 MPa	GD (g/cm ³)	7,40	7,40	7,39	7,37
	F _{ut} (kN)	21,7	22,8	33,5	30,9

Tabell 4. Maximala utstötningskrafter (F_{ut}), och grändensiteter (GD) för kuts 50, 500, 5000 och 8000 för de fyra verktygen. Teoretisk densitet för Astaloy Mo med 0,6% zinkstearat är 7,60 g/cm³.

5.4 Fullskaleproduktion

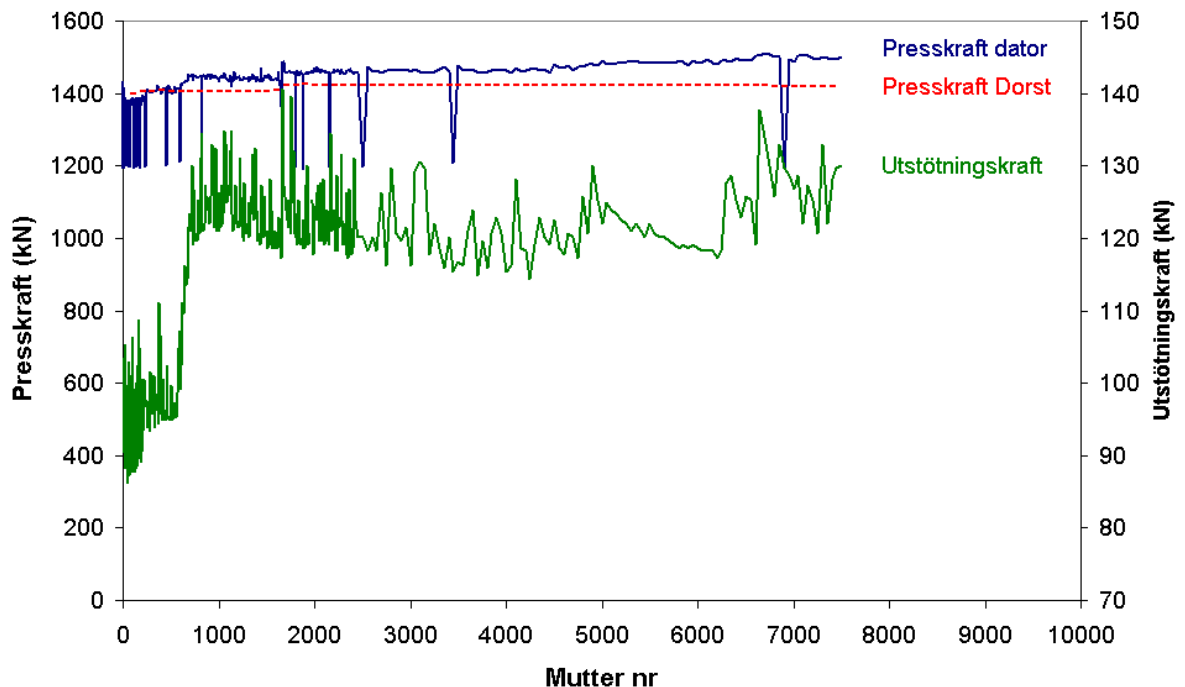
Fullskaleutvärderingen skedde vid SKF Mekan 020514-020515. Pressverktyget visas i figur 14. Totalt pressades 7500 muttrar innan verktyget sprack. Då hade det blivit en stor spricka i överstämpeln vid ett av fyra spår. Detta är ett känt konstruktionsproblem för verktyg till den aktuella muttern beroende på designen. Överstämpeln är känslig medan understämpeln håller. Då verktygshaveriet beror på konstruktionsproblem går det tyvärr ej att säga om ett belagt verktyg skulle fungera i produktion av den aktuella muttern och därmed ersätta dyrare hårdmetallverktyg.

För att alla muttrar skall vara lika stora vägs de vid utmatningen och fyllskopans höjd justeras automatiskt vid behov. Under körningen noterades att vid pressning av muttrar 1660-1666 hade en list i fyllskopan lossnat vilket medförde ojämn fyllning. Vid mutter 6780 ändrades pressens bör kraft från 1423 kN till 1419 kN.



Figur 14. Pressverktyget monterat i Dorstpressen.

Vid 600 pressade muttrar steg utstöttningskraften från 90-100 kN till 120 kN, se figur 15. Från den 3000:e muttern uppvisar utstöttningskraften samma beteende som för det belagda verktyget vid 1100 MPa, d v s påkletning av pulver leder till ökande utstöttningskrafter. När pulverskiktet slits bort sjunker utstöttningskraften igen.



Figur 15. Presskraft och maximal utstöttningskraft för muttrarna pressade vid SKF Mekan 020514-020515.

Densiteterna för fyra av de pressade muttrarna framgår av tabell 5. De har alla godkänd densitet och den ändras inte då utstötningkraften varierar. Mutter 4795 delades i fyra delar för att se eventuella densitetsvariationer, men samtliga hade densiteten $7,11 \text{ g/cm}^3$.

Mutter nr	Gröndensitet (g/cm^3)
90	7,11
1900	7,12
4795	7,11
4999	7,11

Tabell 5. Densiteter för pressade muttrar vid SKF Mekan.

6 DISKUSSION

Ett flertal faktorer påverkar densiteten vid kompaktering, bl a smörjmedel, pulvrets homogenitet, partiklarnas form och storlek (beror på atomiseringsprocess), verktygets geometri, presstryck, kompakterings hastighet och temperatur [9]. Ett sätt att höja densiteten, och därigenom förbättra de mekaniska egenskaperna, är att höja presstrycket. De största problemen är ökad risk för stämpelbrott, ökat verktygsslitage och borttagning av smörjmedel ur täta komponenter. Danninger et al. [10] visade dock att det största förväntade problemet, stämpelbrott, inte var så allvarligt om komponenternas geometri inte är för komplicerad och kräver multipla stämplor.

Kallkompaktering av metallpulver sker i flera olika steg: (i) omlagring av pulvret, (ii) elastisk deformation, (iii) plastisk deformation och (iv) fragmentering (för icke-duktila metaller). I början av pressningen sker elastisk deformation i punktkontaktarna; när sedan trycket ökar glider pulverpartiklarna mot varandra och omlagring sker. Plastisk deformation sker sedan, vilket leder till en ökning av de platta partikelytorna samt deformationshärdning. Vid mycket höga tryck sker elastisk deformation av bulkmaterial, vilket resulterar i återfjädring vid utstötning av komponenten. [11]

Vid pulverpressning förekommer framför allt två typer av nötning: *adhesivt* (d v s kallsvetsningar mellan pulver och verktygsvägg bryts upp och små delar av verktygsmaterialet följer med) och *abrasivt* (d v s hårda partiklar repar det mjukare verktygsmaterialet). Adhesiv nötning minskas genom att man förhindrar att pulvret fastnar på verktygsväggen (genom smörjning, ytfinhet och ytbeläggning), förhindrar plastisk deformation (hårt verktygsmaterial), förhindrar svetsning (genom kylning, låg hastighet, verktygsmaterial med hög termisk konduktivitet) samt förhindrar mikrosprickor i verktygsmaterialet när kallsvetsningar bryts upp (verktygsmaterial med hög brottseghet). Vid abrasiv nötning är det viktigt att beakta vilka hårda faser som förekommer i pulvret och om dessa är hårdare än verktygsmaterialet, eftersom de hårda partiklarna deformerar och tar bort verktygsmaterial genom plogning. [12] Viktiga egenskaper för olika verktygsdelar framgår av tabell 6 [13].

Fördelar med hårda beläggningar är högre hårdhet och lägre friktionskoefficient. Flerskiktbeläggningar ger en jämnare övergång från arbetsytans hårdhet och spänningar till stålsubstratets. Skiktmaterial och substratmaterial har ofta olika termisk utvidgning, vilket kan orsaka höga inre spänningar efter temperaturförändringar. Problemen kan minskas genom att ett mellanskikt får ta upp delar av spänningarna. [6]

Dynor	Stämplor	Kärnor	Alla delar
Högst nötningsmotstånd	Nötningsmotstånd	Nötningsmotstånd	Välpolerad
Utmattningshållfasthet	Utmattningshållfasthet	Seghet, för del under dynnivå	Liten störning p g a värmebehandling
Hållfasthet och hårdhet (sprickmotstånd)	Seghet		
	Hållfasthet och hårdhet (stukningsmotstånd)		

Tabell 6. Viktiga egenskaper för dynor, stämplor och kärnor [13].

De pressade gröndensiteterna vid samma presstryck var desamma för både det belagda och hårdmetallverktyget vid 1100 MPa medan nötningen av det belagda verktyget är mindre, vilket syns tydligt på replikaavgjutningarna. Utstötningskraften är visserligen lägre för hårdmetallverktyget, men den ökar under hela presserien vilket tyder på ökande verktygsslitage. Det belagda verktyget har mycket höga utstötning krafter då påklett pulver ger direkt metall-metallkontakt, men det hårda PVD-skiktet med låg friktion gör att det påklett pulvret kan släppa från verktyget utan att orsaka adhesiv nötning. Därför kan belagda verktyg vara ett mycket bra alternativ till hårdmetallverktyg vid förhöjda presstryck, >1 000 MPa, såväl ur ekonomisk som ur slitagesynpunkt. Skall pressverktyget beläggas borde ASP 2005 väljas som verktygsmaterial, då detta stål är både segare och billigare än ASP 2053, vilket använts i dessa försök. För obelagda verktyg är dock ASP 2053 bättre.

Utslagningskurvorna i denna rapport har oftast analyserats med avseende på långsiktiga trender. På kortare sikt sker ofta en cyklisk uppbyggnad följt av ett snabbt fall av utstötningskraften. Detta beror på att ett påklett skikt av pulver byggs upp vid den adhesiva nötningen och ökar utstötningskraften. När det påklettade skiktet är så tjockt att det rivs loss, sjunker åter utstötningskraften varefter processen upprepas men ofta på en högre nivå på utstötningskraften om den adhesiva nötningen är kraftig.

Vid 700 MPa är utstötningskraften för det belagda verktyget högst av alla fyra verktygen och dessutom är gröndensiteten lägst. Detta tyder på att presstrycket är för lågt för att pressa ut tillräckligt med smörjmedel för att god smörjning under pressning och utstötning av kutsarna skall uppnås.

Verktygssmörjning gav positiva indikationer och intressanta skillnader i varaktighet och i effekt. Ett varaktigare smörjmedel behöver inte appliceras så ofta och kommer därigenom att ha en mindre negativ påverkan på produktionstakten än ett smörjmedel som har sämre varaktighet och därmed måste appliceras oftare. En svårighet i att tolka de inledande försök som gjorts inom detta projekt är att det saknats ett sätt att automatiskt kontrollera mängden tillsatt smörjmedel och därigenom mäta den och hålla den konstant. Upprepade försök har visserligen visat samman tendenser men det är ändå möjligt att ifrågasätta den experimentella metodiken i dessa orienterande försök.

7 SLUTSATSER

En metod har tagits fram att följa verktygsslitage under produktionsliknande förhållanden. Genom att mäta utstötningskrafterna direkt på pressverktyget kan verktygsslitage observeras och till viss del kvantifieras. Metoden, som kompletterats med direkta slitagestudier av verktyget, har visats sig vara tillförlitlig och väl fungerande. Resultat som uppvisats vid en kortare studie (ca 500 presscykler) stämmer väl överens med resultat som uppnått vid längre tester (upp till 10 000 presscykler). Därigenom är det möjligt att använda metoden för kortare screening-tester av nya verktygsmaterial och beläggningar.

Genom att göra verktyg av högpresterande verktygsstål och belägga med PVD-skikt har det varit möjligt att ta fram verktyg med likvärdiga prestanda och till lägre pris än motsvarande hårdmetallverktyg. En ytterligare fördel med att kunna byta ut hårdmetall är att risken för haveri hos verktyget minskar när man går mot ett segare verktygsmaterial.

Projektet har gett konkreta erfarenheter om hur man skall optimera pressning mot höga densiteter. När pressning skall utföras vid höga densiteter har det visat sig vara viktigt att ändra smörjmedelshalt och tryck samtidigt. En lägre smörjmedelshalt, som ger potential för höga densiteter, fungerar inte när den används vid normala presstryck utan först när man också samtidigt ökar trycket. Detta beror på att man endast vid riktigt höga tryck pressar ut tillräckligt med smörjmedel mot dynans väggar när man använder låga halter smörjmedel. Fenomenet orsakar svårigheter att ställa in pressar för höga densiteter eftersom trycket inte kan ökas stegvis (något man helst vill göra för att undvika verktygshaveri). Ovanstående system med mätning av utstötningskrafter ger förbättrade möjligheter till pressinställning med tidig varning för ogynnsamma pressförhållanden.

- För obelagda verktyg ger ASP 2053 något lägre utstötningskraft än Vanadis 6.
- PVD-beläggning ger lägre utstötningskraft än både obelagda och nitrerade verktyg, jämförbar med dyna helt i hårdmetall.
- Vid verktygssmörjning ger silikonolja längst effekt och dessutom störst varaktig sänkning av utstötningskraften. Absolut störst sänkning av utstötningskraften ger teflon, men den är mycket kortvarig.
- 700 MPa är för lågt presstryck vid pressning av Astaloy Mo med 0,6% zinkstearat för att fullgod smörjning skall erhållas, vilket leder till låg gröndensitet, höga utstötningskrafter och ökat verktygsslitage. Då en lägre smörjmedelshalt inte fungerar när den används vid normala presstryck utan först när trycket ökas samtidigt, vilket beror på att man endast vid riktigt höga tryck pressar ut tillräckligt med smörjmedel mot dynans väggar när man använder låga halter smörjmedel.
- Livslängdsutvärderingen visar att vid höga presstryck är belagda verktyg ett ekonomiskt och nötningsmässigt bra alternativ till hårdmetallverktyg.
- För hårdmetallverktyg deformeras kaviteten under pressningen, vilket ger pressade densiteter som är skenbart högre än den teoretiska densiteten för pulvermaterialet. Den pressade gröndensiteten är dock likvärdig för belagda och hårdmetallverktyg. Verktygen har en variation i formen även om de håller inom toleranserna som angivits på ritningen, men detta har ej mätts upp.

8 TACK

VINNOVA för det ekonomiska bidraget som givits projektet.

Höganäs AB, Sigurd Berg, för utmärkt projektledarskap.

Jernkontoret, Kerstin Fernheden, för administration av projektet.

SKF Mekan AB, Pauli Sildéus, för industriell förankring och intressant produktionsstudie.

Callo AB, Jan-Olof Krona, för hjälp med verktygsdesign och tillverkning samt med know-how om pressning.

REFERENSER

1. C. N. Degoix, A. Griffo, R. M. German; *Effect of lubrication mode and compaction temperature on the properties of FE-Ni-Cu-Mo-C*; International Journal of Powder Metallurgy, 32 [2] (1998) 29-33.
2. G. F. Bocchini, *Warm compaction of metal powders: why it works, why it requires a sophisticated engineering approach*; Powder Metallurgy 42 [2] (1999) 171-180.
3. P. Mosbah, D. Bouvard, E. Ouedrago, P. Stutz; ; Powder Metallurgy, 40 [4] (1997) 269-277.
4. S. Turenne, C. Godère, Y. Thomas, P-É Mongeon; *Evaluation of friction conditions in powder compaction for admixed and die wall lubrication*, Powder Metallurgy, 42 [3] (1999) 263-268.
5. S. Turenne, C. Godère, Y. Thomas; *Effect of temperature on the behaviour of lubricants during powder compaction*; Powder Metallurgy, 43 [2] (2000) 139-142.
6. S. Jacobson; *Ytbeläggning och ytomvandling – ytskiktsskompositer*; Uppsala Universitet Tekniska Högskola, 1994.
7. W. G. Ball, G. P. Gasbarre Jr, R. R. Philips; *Lower melting temperature die wall lubricants*; P/M Science & Technology Briefs, 2 [1] (2000) 22-26.
8. M. Torkar, V. Leskovsek, B. Sustarsic, P. Panjan; *Failure of tools for metallic powder compaction*; Engineering Failure Analysis, 9 (2002) 213-219.
9. L. N. Smith, P. S. Midha, A. D. Graham; *Simulation of metal powder compaction, for the development of a knowledgebased powder metallurgy process advisor*; Journal of Materials Processing Technology, 79 (1998) 94-100.
10. H. Danninger, P. Billgren, S. Vathilakis, Z. Zengin, M. Drozda; *Production of high-density P/M-parts through compaction at high pressures*; Proceeding of the International Metallurgy Conference Exhibition, 2 (1986) 1067-1070; Editors: W. A. Kaysser, W. J. Huppmann.
11. R. M. German; *Particle packing characteristics*; Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, USA (1989).
12. R. Andersson, P. Billgren; *ASP, a PM-high speed steel for PM-compacting tools*; Modern Development of Powder Metallurgy, 17 (1985) 359-383.
13. D. C. Major, J. E. Hammond; *A review of metallurgical and economic aspects of tooling materials for the compaction of powder-metal parts*; Powder Metallurgy, 8 [16] (1965) 319-334.