Projektresultat
Styrkeområde 2:
Flexibel produktion

Blyfria kopparlegeringar i komponenter och produkter

EGENSKAPER OCH REKOMMENDATIONER VID TILLVERKNING

PRODUKTION2030

Denna broschyr
Blyfria kopparlegeringar i komponenter och produkter – egenskaper och rekommendationer vid tillverkning **är gratis och får användas fritt i oförvanskat skick, både i privat och kommersiellt syfte. Den får inte säljas eller på något sätt förvanskas.**

LUNDS UNIVERSITET

Författare: Fredrik Schultheiss, Jakob Johansson, Henrik Persson, Mike Olsson, Sampsa Laakso och Jan-Eric Ståhl, Lunds universitet, Lund 2017

SMF-Paketering från FoI-projekt 2013-01741, ett Vinnova-projekt inom Produktion2030 i samarbete med Mistra Innovation, Lead free brass samt Tillväxtverket och EUs regionala strukturfond, Cate-Pro.

© Författarna och finansiärerna, Lund 2017

Design: Astrid Hedenström, Swerea IVF

Blyfria kopparlegeringar i komponenter och produkter

EGENSKAPER OCH REKOMMENDATIONER VID TILLVERKNING

Innehåll

Förord **5**

1. Bly i kopparlegeringar **6**

2. Lagar och förordningar **9**

3. Blyfria kopparlegeringar **10**

3.1. Mikrostruktur 10

3.2. Mekaniska egenskaper 13

3.3. Plastisk formbarhet 14

4. Skärbarhet **16**

4.1. Skärtekniska grundbegrepp och definitioner 16

4.2. Polära diagram 17

4.3. Skärmotstånd 19

4.4. Spånbildning och processdynamik 20

4.5. Ytjämnhet 23

4.6. Verktygsförslitning 24

4.7. Gradbildning 25

4.8. Generella erfarenheter vid skärande bearbetning 27

4.9. Högren koppar – Praktiska erfarenheter vid skärande bearbetning 29

5. Tillverkningsekonomi **31**

5.1. Kostnadsmodellering 31

5.2. Fallstudie 31

6. Konstruktionsprinciper **33**

6.1. Numerisk simulering (FEM) 33

6.2. Mekanisk provning 35

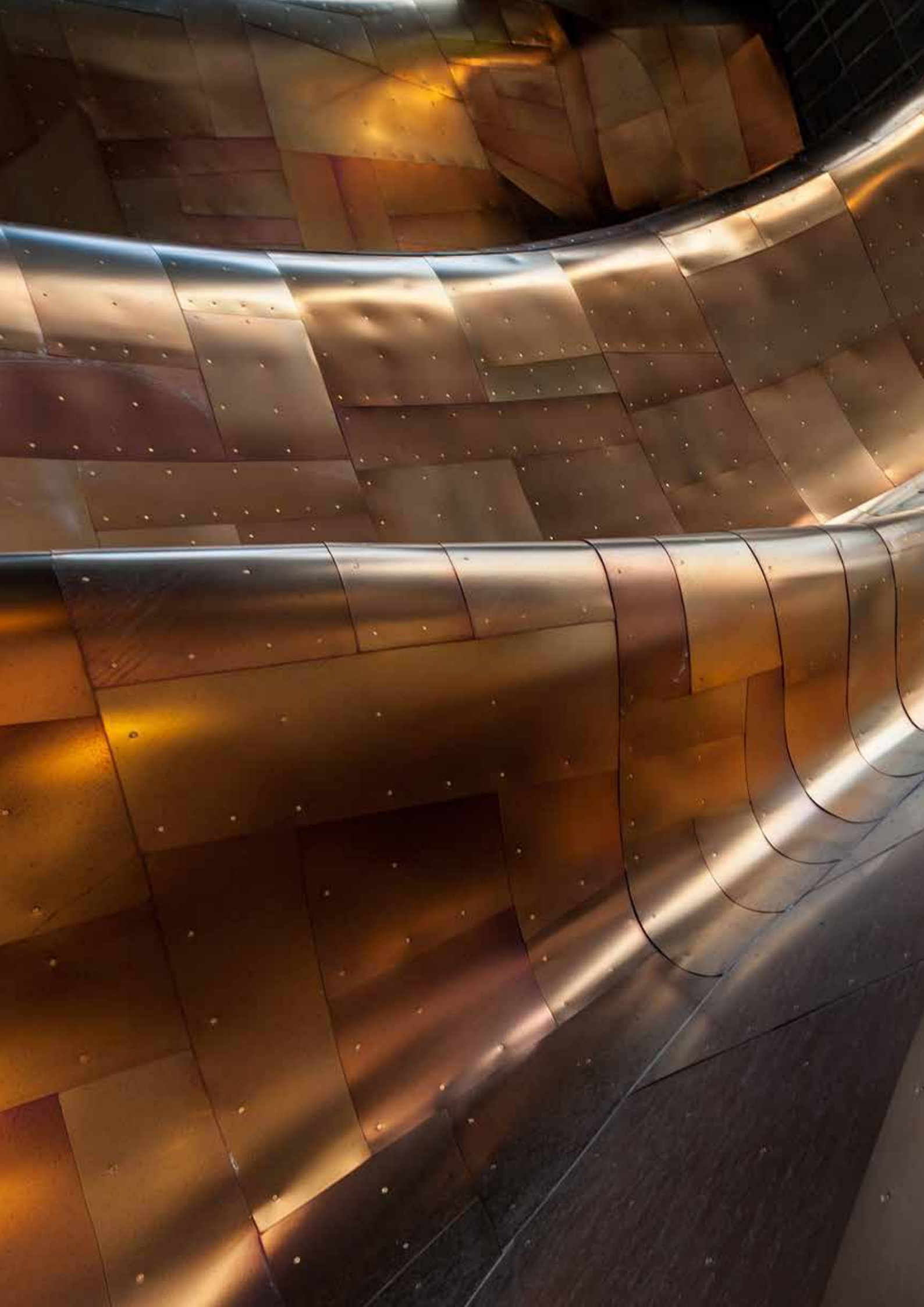
7. Hållbar produktion **37**

7.1. Livscykel 37

7.2. Återvinning 37

7.3. Spånsmide – en möjlighet 38

Fotnoter **41**



Förord

I takt med en ökad miljömedvetenhet hos allmänheten har industri, samhälle och akademi satt ett allt större fokus på hållbar produktion. Betydande insatser pågår idag som syftar till att minska människans inflyttande på miljöpåverkan och effektivare användning av våra resurser i ett hållbart perspektiv. Som en del av denna utveckling ingår att granska de material som används i våra produkter. Genom att använda material som ger god funktion hos produkten, högt materialutnyttjande och god återvinningsbarhet kan betydande miljövinster göras. Även materialens toxicitet utvärderas för att fastställa att minimal skada förorsakas människa, djur eller natur. Exempelvis innehåller idag flertalet kopparlegeringar bly för att förbättra bearbetbarheten på bekostnad av miljön.

Bly är en tungmetall som är skadlig mänska och miljö även vid låga exponeringsnivåer. Omfattande forskningsarbete pågår idag för att hitta ersättningsmaterial för att minska materialets miljöpåverkan utan att i väsentlig utsträckning öka aktuella produkters tillverkningskostnad. Denna rapport är primärt en sammanställning av de två forskningsprojekt som bedrivits vid Lunds universitet på detta område; *Blyfria kopparlegeringar i produkter och komponenter* finansierat av Vinnova via Produktion2030 och *Lead-Free Brass* finansierat av Mistra Innovation. Vidare har resultat som behandlar användning av högren koppar i komponenter hämtats från projektet CATE-Pro som är finansierat av EUs regionala strukturfond.

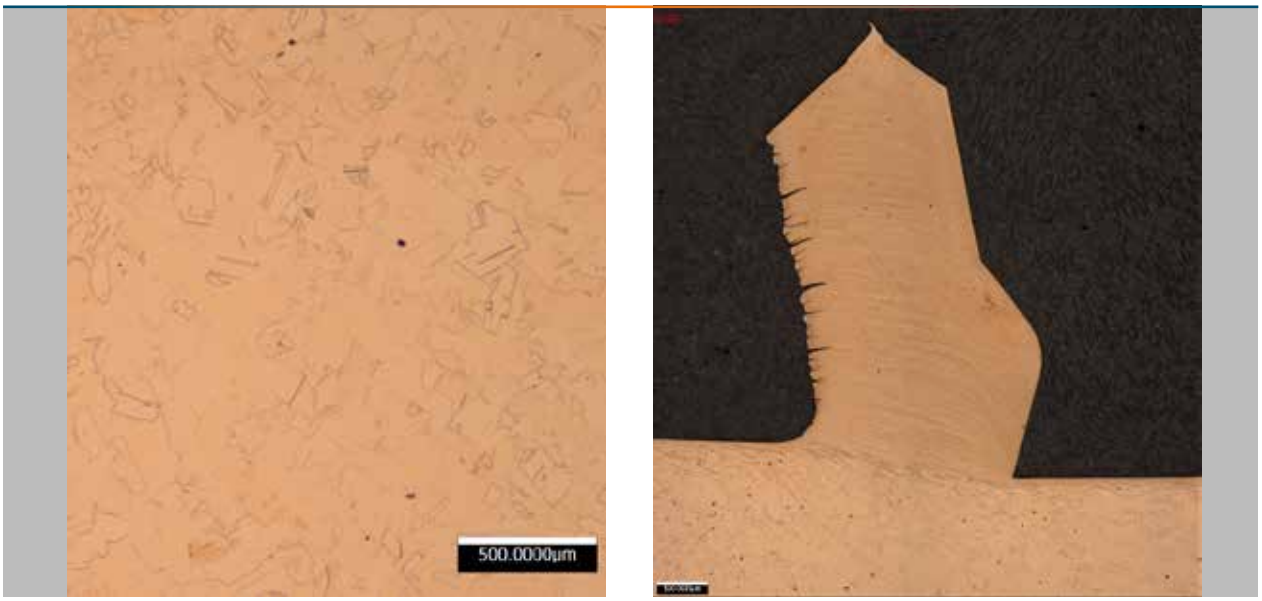
Synergin mellan de olika projekten har varit ytterst värdefull för projektens goda resultat. Författarna vill tacka alla deltagare för deras medverkan; Lunds universitet, Chalmers, Högskolan i Halmstad, Seco Tools AB, AB Markaryds Metallarmatur, Examec Group AB, Svensk Kärnbränslehantering AB, RFR Solutions AB, Produktionsteknik i Lund AB, Maskinteknik i Oskarshamn AB, Sandvik SRP AB och Oerlikon Balzers Sandvik Coating AB samt företrädare från MAX IV och ESS.

Jan-Eric Ståhl

1

Bly i kopparlegeringar

Grundämnet koppar, med atomnummer 29, är en metall med en karakteristisk röd färg och en densitet på 8920 kg/m^3, strukturbild enligt Figur 1.1 (till vänster). Eftersom koppar är en förhållandevis mjuk metall kan den formas med enkla handverktyg, vilket gjort att den tidigt fick stor användning i olika historiska föremålen, särskilt då den legeras med tenn eller zink och då erhålls kopparlegeringarna brons respektive mässing. Rena kopparlegeringar deformeras kraftigt vid skärande bearbetning på grund av kraftig vidhäftning mot verktyget, vilket illustreras i Figur 1.1 till höger i ett så kallat fruset eller avbrutet skärförlopp.



Figur 1.1: Mikrostruktur koppar (till vänster) och ett så kallat fruset skärförlopp (till höger). Skalans längd är 0.5 mm.

Med brons avses vanligen en koppar- och tennlegering men det förekommer även aluminium och nickelbronser. Tennbronser med ett tenninnehåll på upp till 10 % går vanligtvis att bearbeta plastiskt medan gjutna tennbronser i allmänhet innehåller 10-14 % tenn. Korrosionshärdigheten hos brons är mycket god och överlägsen mässingens.

Skärande bearbetning ger vanligtvis långa, duktila spånor, där skärbarheten förbättras genom ökad tennhalt eller kallbearbetningsgrad. Genom att addera upp till 20 % bly erhålls blytennbrons, vilken utmärker sig för goda lageregenskaper och god korrosionshärdighet. Benämningen rödmetall används också i vissa sammanhang och definieras som en gjutbar kopparlegering med en hög kopparhalt, vilket ger den en rödaktig färg. Rödmetall kan betraktas som en typ av tennbrons där viss del av tennet ersatts med zink. Även visst blyinnehåll kan förekomma[1].

Mässing är en koppar- och zinklegering som även kan innehålla andra grundämnen så som bly, kisel, aluminium, järn, tenn, mangan, nickel och arsenik beroende på applikation. Genom att variera legeringssamansättningen kan mässingens egenskaper varieras markant, vilket gör mässing till ett bra materialval för en mäng olika produkter. Typiska applikationer för mässing är hushållsprodukter, dörrhandtag, fästelement och VVS-detaljer för att nämna några vanliga tillämpningar, Figur 1.2.

Figur 1.2: Exempel på komponenter och produkter i mässing. Källa: Markaryds Metall Armatur, Markaryd.

Många mässingslegeringar innehåller idag upp till 3 % bly för att förbättra skärbarheten hos materialet. Bly i mässing ger bättre skärbarhet genom att förbättra spånbrytningen, sänka skärkrafterna, minska verktygsförslitningen och möjliggöra bättre ytfinhet och toleranser[2] i förhållande till blyfria alternativ. Användningen av bly har dock på senare tid blivit alltmer ifrågasatt, inte minst på grund av blyets skadliga inverkan på människor och miljö.

Bly är en tungmetall som är skadlig även vid låga exponeringsnivåer och har funnits ha akut och kronisk effekt på mänsklig hälsa. Metallen är även skadlig för djur, växter och mikroorganismer[3]. Forskning har funnit att bly kan laka ur mässingskomponenter om dessa används i VVS-applikationer[4]. Detta skapar risk för att bly läcker ut i dricksvatten om denna typ av mässing används i dessa applikationer. Den internationella studiegruppen för bly och zink (ILZSG) uppskattade att cirka 115 000 ton bly användas 2003 av de länder som rapporterade till organisationen, vilket uppskattas utgöra cirka 80 % av hela världsförbrukningen under samma tidsperiod[3].

Bly är lösbar i smält mässing men fälls ut vid korngränserna under svalning och bildar där partiklar 1 till 10 µm. Storleken och fördelningen av dessa blypartiklar kommer ha en inverkan på skärbarheten för materialet[5]. Det är känt att tillsatsen av bly (2-3 %) i mässing markant sänker skärkrafterna samt reducerar verktygets förslitningshastighet. Länge har man hävdat att bly bidrar till en smörjande effekt[6] i skärprocessen mellan verktyg och arbetsmaterial medan nya forskningsresultat[7] visar att den genom blyet sänkta hållfastheten reducerar skärkrafterna, vilket i sin tur reducerar temperaturen i skärprocessen som bidrar till ett minskat kemiskt slitage på verktyget i form av diffusion.

De uppenbara negativa miljöaspekterna förknippat med dagens blyanvändning i mässing har under senare år resulterat i en mängd förslag på möjliga ersättningsmaterial. Till exempel har möjligheten att ersätta bly med vismut utforskats med gynnsamt resultat[8]. Andra forskare har även föreslagit tillsatsen av en liten mängd titan[9]. Det höga priset har dock förhindrat någon mer utbredd användning av dessa grundämnen som ersättning för bly i mässing. En alternativ lösning som har presenterats är användningen av kisel i mässing (kiselmässing), även om detta inte ger fullt så stora skärbarhetsförbättringar som bly[10].

Figur 1.3: Exempel på armaturkomponenter färdiga för marknaden i lågblyad eller blyfri mässing. Källa: Markaryds Metall Armatur.

2

Lagar och förordningar

På grund av den skadliga inverkning som bly har på miljön så är dess användning hårt reglerad. Idag tillåts kopparlegeringar innehålla maximalt 4 % bly enligt EU-direktivet RoHS[11]. Samma nivå anges även för fordonsdetaljer i EU-direktivet ELV[12]. Det finns utöver dessa även en rad andra EU-direktiv som tar upp användningen av bly. EU-direktivet REACH[13] anger den maximala nivån 0.05 % bly i smycken. Detta är också den halt bly som författarna valt att utgöra gränsen mellan blyfritt respektive en lågblyad legering.

EU-direktivet REACH tar även upp en information om farliga ämnen i varor på 0.1 %, vilket idag inkluderar cirka 30 blyföreningar som tillverkare måste informera om, dock inte metalliskt bly. Utöver dessa bestämmelser finns idag reglering av bly i en rad olika produkter; leksaker, bensin, kosmetika, material i kontakt med livsmedel, förpackningar, avloppsslam och dricksvatten för att nämna några av användningsområdena.

I sammanhanget ovan är det värt att notera att redan 1956 antog Sovjetunionen en standard som begränsade mängden bly i kopparlegeringar till 0.05 % i alla livsmedel och medicinska tillämpningar[14].

Sveriges riksdag har även beslutat om 16 miljökvalitetsmål som enligt beslutet bör uppnås inom en generation. Till dessa miljömål hör en giftfri miljö med den övergripande målsättningen att förekomsten av ämnen i miljön som har skapats i eller utvunnits av samhället inte ska hota människors hälsa eller den biologiska mångfalden. Halterna av naturfrämmande ämnen är nära noll och deras påverkan på människors hälsa och ekosystemen är försumbar. Halterna av naturligt förekommande ämnen är nära bakgrundsnivåerna. I preciseringen står det att användningen av särskilt farliga ämnen har så långt som möjligt upphört. Till gruppen särskilt farliga ämnen räknas bland annat bly, kadmium och kvicksilver[15].

3
Blyfria kopparlegeringar

Det finns en stor mängd olika kommersiellt använda kopparlegeringar med mycket varierande kopparinnehåll. En stor och dominerande undergrupp i familjen kopparlegeringar är mässingslegeringar där koppar främst legerats med zink.

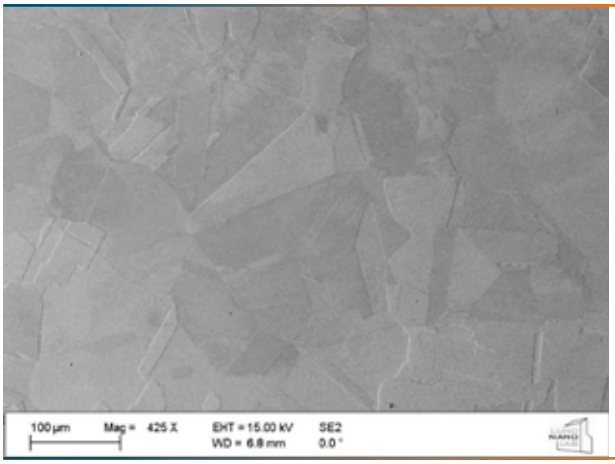
I nedan redovisade studie har 5 utvalda mässingslegeringar enligt Tabell 3.1 studerats med avseende på egenskaper och kemisk sammansättning.

	Typ	EN12167	Cu	Zn	Pb	Si	P	Sn	Mn	Fe	Al
Material 1	Blyad	CW614N	57.3	Rest.	3.3	-	-	-	-	-	-
Material 2	Lågblyad	CW724R	76	Rest.	max 0.09	3	0.05	-	-	-	-
Material 3	Lågblyad	CW510L	57	Rest.	0.2	-	-	0.3	-	0.3	-
Material 4	Blyfri		59	Rest.	0.03	-	-	0.03	1.3	0.1	-
Material 5	Lågblyad		59	Rest.	0.07	-	-	-	0.7	1.1	0.3

Tabell 3.1: Kemisk sammansättning för undersökta mässingsmaterial angivet i viktprocent.

3.1.
Mikrostruktur

Koppar i ren form är ett enfasigt material som lätt kan deformeras och plastiskt formas utan att spricka. Materialet har en ytcentrerad kubisk (FCC) kristallstruktur, vilket gör det mycket duktilit. Det är inte möjligt att härda ren koppar genom värmebehandling men materialet deformationshärdas mycket lätt, Figur 3.1. Vid skärande bearbetning av högren koppar (Cu-halt 99,95 wt. procent) deformationshärdas material under den skurna ytan vilket påverkar materialegenskaperna och därmed produktens hållfasthet, Figur 3.2[16].

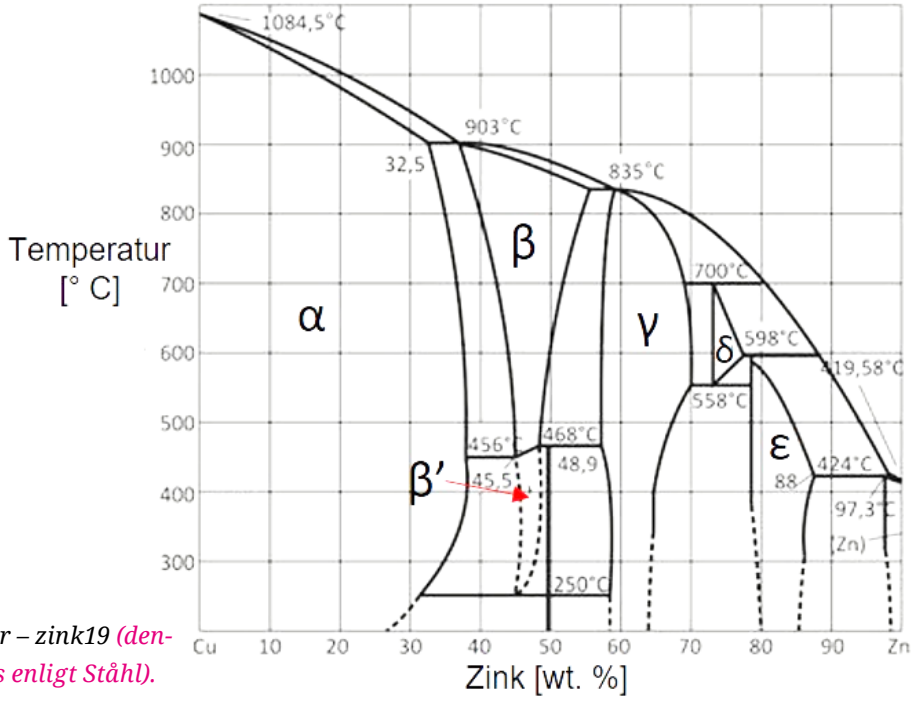


Figur 3.1: Mikrostruktur för högren koppar (Cu-halt 99.95 %), där varje korn är en kristall och har olika kristallorientering.

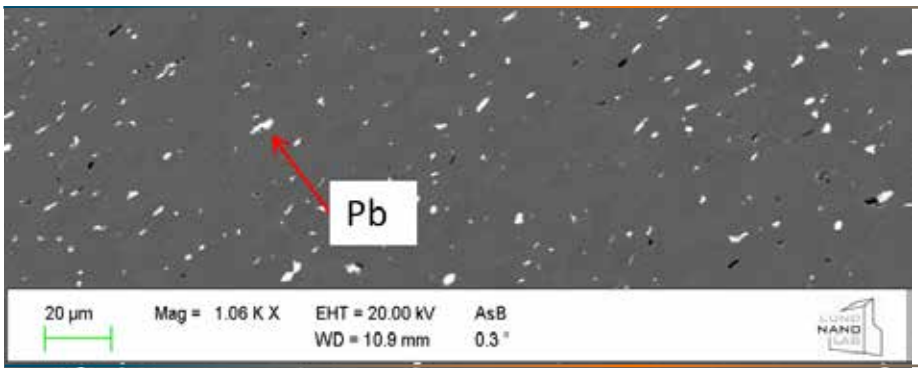
Figur 3.2: Kraftigt deformerad ytstruktur hos högren koppar efter svarvning med skärdjupet 1 mm, matningshastigheten 0.35 mm/varv och skärhastigheten 150 m/min där ett kraftigt deformerat material ε_{III} erhålls till 45 µm och ett maximalt deformationsdjup erhålls till 115 µm.

Tillsätts zink i koppar benäms legeringen mässing och det stabila fasdiagrammet för koppar/zink-systemet redovisas i Figur 3.3. Har legeringen en zink-halt över 30 % börjar en β-fas skiljas ut och mängden β-fas ökar med ökad zinkhalt. Denna fas är betydligt hårdare än den kopparrika α-fasen och har en rymdcentrerad kubisk (BCC) struktur. Mässingslegeringar med zinkhalt under 30 % används primärt till kallsmide medan legeringar med högre zinkhalt lämpar sig bättre för varmformning. Under 450°C övergår β-fasen till en något hårdare, mindre formbar β'-fas. Varmsmide bör därför ske över denna temperatur. Överstiger zinkhalten 50 % blir legeringen vitaktig och är för spröd för de flesta industriella applikationer[17].

Bly tillsätts i olika kopparlegeringar för att förbättra dess bearbetbarhet, både med avseende på skärande och plastisk bearbetning. Lösligheten av bly i koppar avtar med minskad temperatur och vid avsvalning skiljs bly ut ur legeringen och bildar en egen fas bestående av rent bly mellan korn bestående av andra faser. För att det utskilda bly ska bidra till en stor förbättring i bearbetbarhet eftersträvas en jämn fördelning av utskiljningarna, vilka bör ha en storlek i intervallet 1-10 µm, Figur 3.4[18]. Friskärande mässingslegeringar innehåller ofta runt 3 wt. % bly.



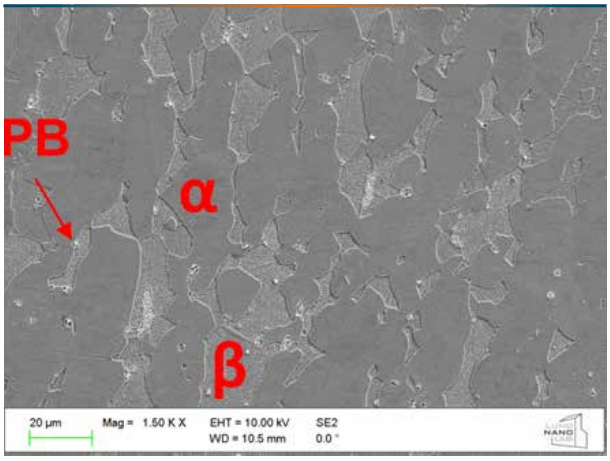
Figur 3.3: Fasdiagram koppar – zink19 (denna ska ritas om och förenklas enligt Stål).



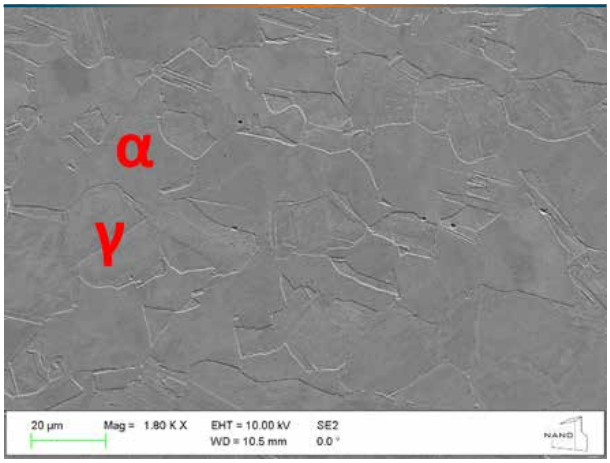
Figur 3.4: Fördelning av blyutfällningar i den friskärande mässings-legeringen material 1.

Material 1 och material 3, 4 och 5 har i huvudsak α-β-struktur med varierande mängd β-fas, från ungefär 30 volymprocent β-fas i material 1 till en jämn fördelning mellan faserna i de andra materialen. I material 5 finns, förutom α- och β-faser, utskiljningar av Fe4Si-partiklar för att förbättra materialets skärbarhet.

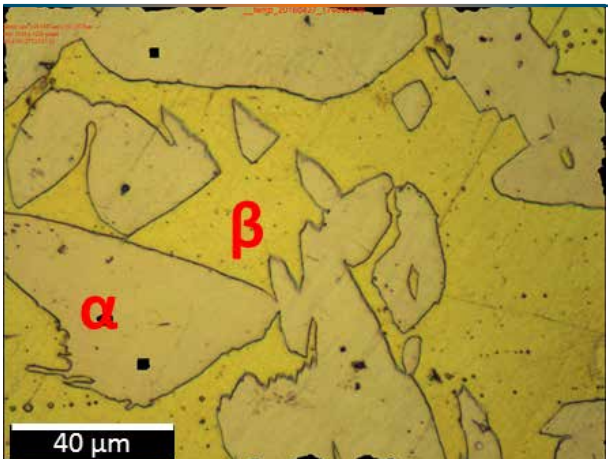
Mikrostrukturen i material 2 skiljer sig väsentligt från de andra fyra materialen eftersom legeringen innehåller en mindre mängd zink men även 3 % kisel. Kisel bildar tillsammans med koppar och zink en spröd och abrasiv γ-fas. Tillskottet av kisel i legeringen gör att materialets skärbarhet ökar samtidigt som det ökar materialets hållfasthet och reducerar dess termiska ledningsförmåga[20].



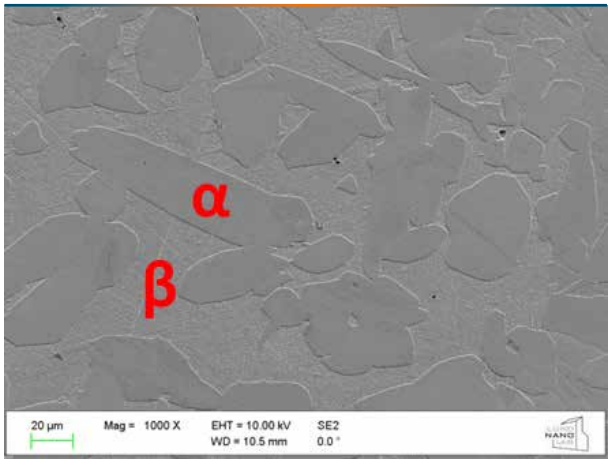
Figur 3.5: Mikrostruktur för material 1.



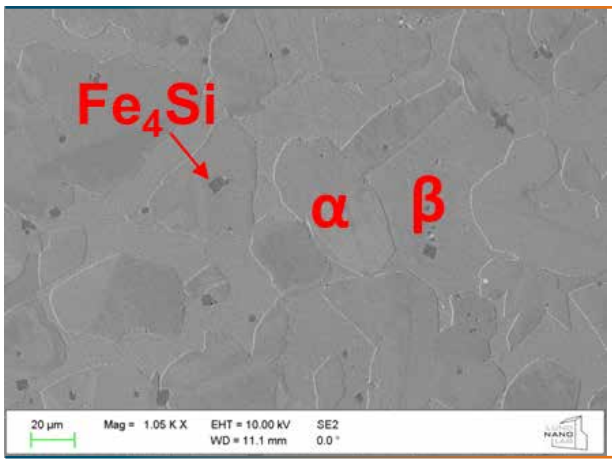
Figur 3.6: Mikrostruktur för material 2.



Figur 3.7: Mikrostruktur för material 3.



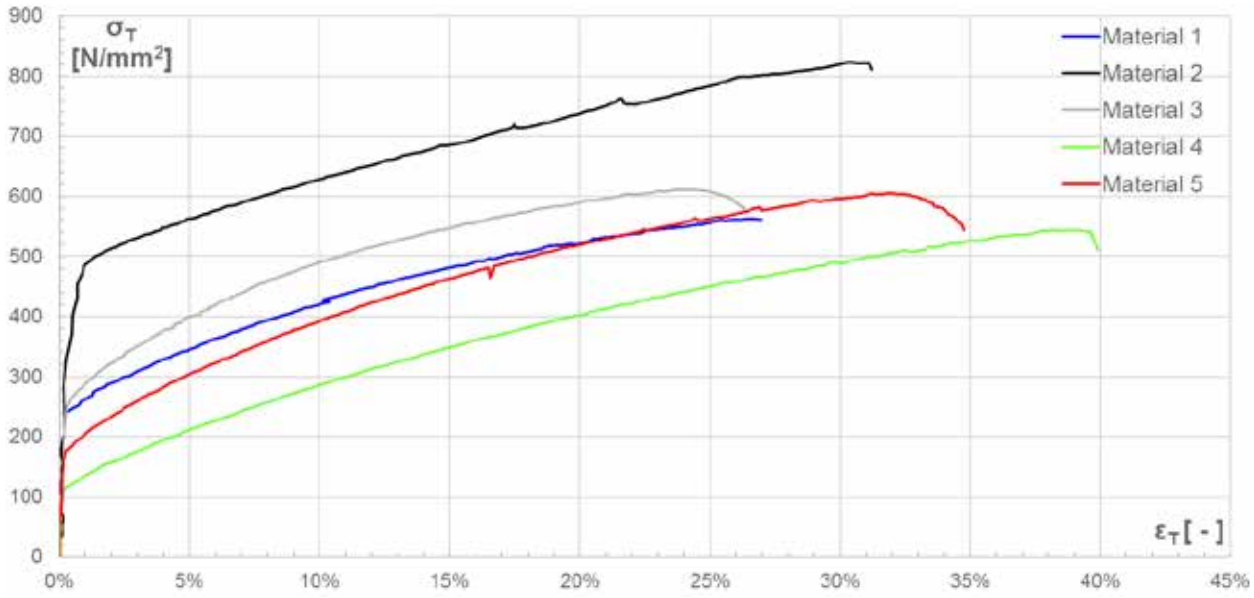
Figur 3.8: Mikrostruktur för material 4.



Figur 3.9: Mikrostruktur för material 5.

3.2. Mekaniska egenskaper

För att utvärdera de olika mässingsmaterialen har dragprov utförts i de fem olika legeringarna enligt dragprovsstandarden SS-EN 10 002-1 med resultat enligt Figur 3.10. För att resultaten av dragproven ska vara jämförbara med varandra har sann töjning och spänning räknats fram. Sann spänning och töjning tar hänsyn till den minskande tvärsnittsaren under dragprovet, till skillnad från teknisk spänning och töjning som baseras på provstavens ursprungsarea. Inget av de studerade materialen uppvisar en tydlig sträckgräns, därför har $R_{p\,0.2}$ använts. $R_{p\,0.2}$ beräknas som den spänning som ger 0.2 % plastisk töjning.



Figur 3.10: Sann spänning och töjning för dragprov utförda i material 1-5.

Provstavarna trådgnistades ur stångämnen i syfte att minimera effekterna från deformationen som erhålls vid skärande bearbetning. För att säkerställa att provresultaten inte påverkas av lokala variationer i utgångsmaterialet utfördes tre dragprov i varje material. Medelvärdet av mätresultaten för materialen redovisas i Tabell 3.2. Värt att notera är de höga värdena på sträck- och brottgräns för material 2. De visar att det är ett mer hållfast material än de övriga fyra samtidigt som brottförlängningen är i samma storleksordning som för de övriga materialen.

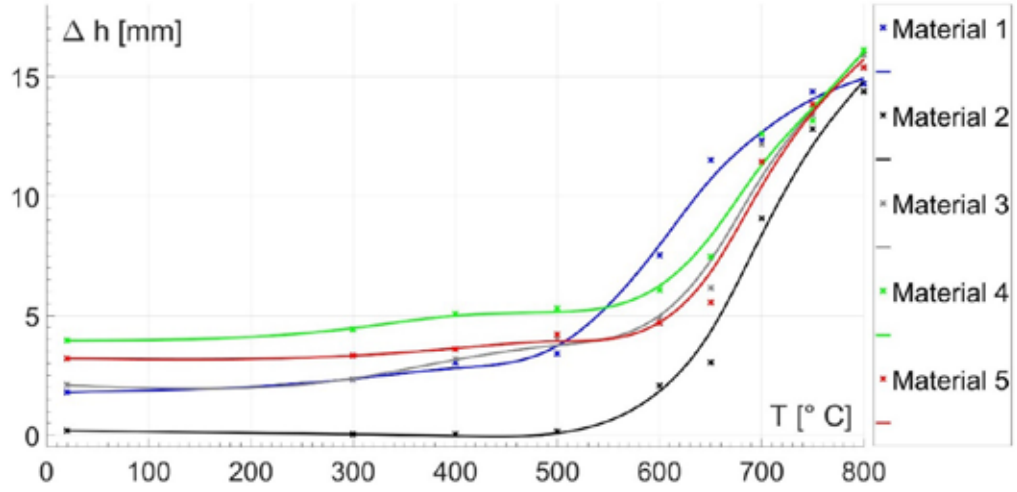
	Sträckgräns, $R_{p\,0,2}$ [N/mm²]	Brottgräns, R_m [N/mm²]	Brottförlängning, ε_m [%]
Material 1	255	562	26.5
Material 2	441	812	30
Material 3	272	617	26.5
Material 4	124	545	37.9
Material 5	184	602	34.6

Tabell 3.2: Hållfasthetsdata för materialen 1-5.

3.3. Plastisk formbarhet

Vid tillverkning av komponenter i olika kopparlegeringar är de plastiska formningsmetoderna vanligt förekommande. För att ge indikationer på formändringsmotstånd för materialen 1-5 har försök utförts där cylindrar med diametern 28 mm och höjden 25 mm förvärmts till temperaturer mellan 20 och 800°C och därefter komprimerats med lasten 30 ton. Efter komprimeringen mättes cylinderns höjdförändring, Figur 3.11.

Resultaten från dessa studier visar att Material 2 kräver högre temperatur än de övriga materialen för att kunna deformeras lika mycket, det vill säga Material 2 behåller sin högre hållfasthet i högre grad även vid förhöjda temperaturer, vilket är väntat på grund av dess kiselhalt.



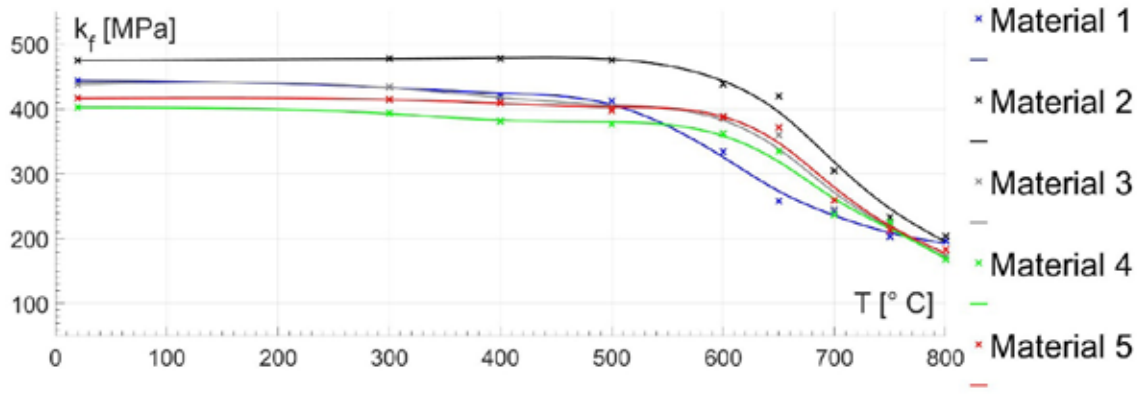
Figur 3.11: Höjdförändring Δ_h vid kompaktering av cylindrar i fem olika mässingsmaterial vid olika temperaturer.

Generellt kan konstateras att studerade mässingslegeringar bibehåller sitt formändringsmotstånd upp till cirka 500°C oberoende legeringstyp.

En vanlig utvärderingsstorhet för bedömning av kraft och energiåtgång vid plastisk formning är just formändringsmotståndet och då som funktion av temperaturen. Vid en statisk analys kan deformationsmotståndet för ett material beräknas som presskraften dividerat med den medelarea som komponenten har vid deformationens slutskede. Det bör dock påtalas att det finns två dominerande felkällor vid denna typ av analys:

1. Friktion och varierande friktion mellan verktyg och arbetsmaterial.
2. Kylning av arbetsmaterialet mot de båda verktygshalvorna (presskolv och städ) som ger upphov till temperaturgradienter.

Erfarenhetsmässigt bör en smidestemperatur för Material 2 ligga cirka 50°C över de övriga materialen för att uppnå samma formbarhet, vilket även diagrammet nedan indikerar.



Figur 3.12: Formändringsmotstånd k_f som funktion av smidestemperatur.

4
Skärbarhet

Skärbarhet är ett relativt begrepp som varierar för given skärprocess under dess olika förutsättningar. Den traditionella definitionen på skärbarhet är ”arbetsmaterialets uppträdande i skärprocessen och dess inflytande på bearbetningsresultatet” eller kan beskrivas med: Hur enkelt ett arbetsmaterial låter sig bearbetas till på förhand fastställda toleranskrav avseende dimension, form och ytjämnhet?

Ett arbetsmaterials skärbarhet kan indelas i fem huvudgrupper beroende på applikation enligt följande kategorier:

- Ytor och ytintegritet.
- Spånform och gradbildning.
- Energikonsumtion och skärkrafter.
- Verktygsnedbrytning (förslitning).
- Miljöfaktorer.

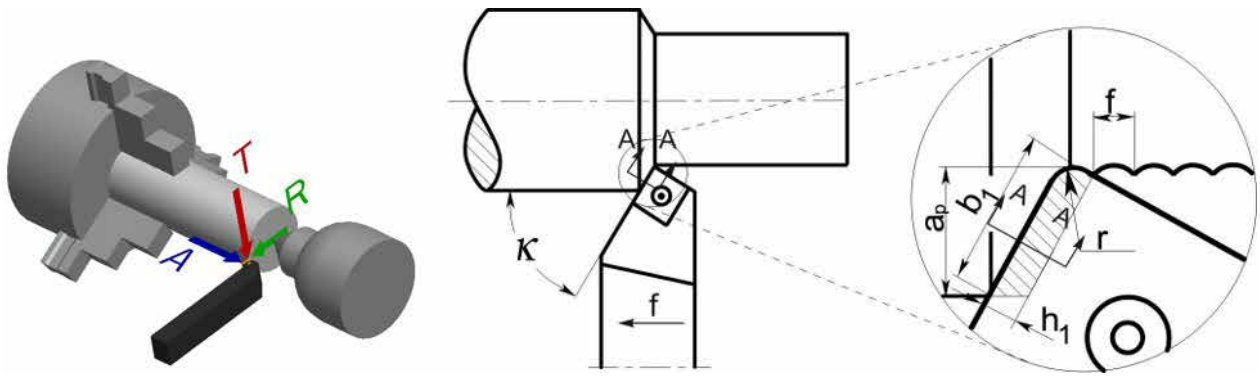
Nedan utvärderas de valda kopparlegeringars skärbarhet med avseende på följande processuppträdanden; spånform och gradbildning samt erhållen ytjämnhet och verktygsförslitning.

4.1.
Skärtekniska grundbegrepp och definitioner

Skärande bearbetning syftar till processer där man med en eller flera skäreggar avlägsnar material i form av spånor från ett arbetsstycke. Avverkat material per tidsenhet bestäms av skärdataparametrarna (skärdata) skärhastighet v_c, matning f och skärdjup a_p, där vc motsvarar den relativa och maximala hastigheten i m/min mellan skäreggen och arbetsstyckets oskurna yta, f verktygets axiella förflyttning per rotationsvarv av arbetsstycket, och ap representerar verktygets radiella ingrepp med arbetsstycket. Huvudskäreggens vinkelställning beskrivs av ställvinkeln κ. Av skärparametrarna och ställvinkeln bestäms också den teoretiska spåntjockleken h_1 och den teoretiska spånbredden b_1 enligt Ekvation 4.1 och Ekvation 4.2, vars produkt ger spånarean A. Riktningar associerade med svarvning och de ingående parametrarna för bestämning av den spånarean A illustreras i Figur 4.1.

$$h_1 \approx \sin(\kappa) \cdot f \qquad b_1 \approx \frac{a_p}{\sin(\kappa)} \qquad A \approx b_1 \cdot h_1$$

Ekvation 4.1, 4.2 och 4.3.

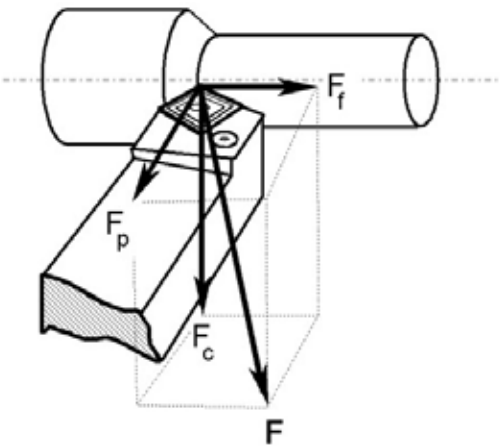


Figur 4.1: Ortogonala riktningar associerade med svarvningsoperationer och parametrar för definition av spånarean, i AR-planet för svarvning.

Belastningen på verktyget kan beskrivas med tre ortogonala kraftkomposanter; F_c i tangentiell riktning, F_f i axiell riktning och F_p i radiell riktning, Figur 4.3. Tillsammans bildar de till den resulterande skärkraften F, enligt Ekvation 4.4. Vidare kan de respektive kraftkomposanterna oftast med god noggrannhet modelleras linjärt enligt Ekvation

4.5 som funktion av den teoretiska spåntjockleken h1. Genom att mäta skärkraften vid olika matningar (se Ekvation 4.1 för relationen mellan matning och teoretisk spåntjocklek) kan de linjära sambanden bestämmas.

Den resulterande skärkraften F ligger bland annat till grund för dimensionering av fixturer och annan uppspänningsutrustning för arbetsmaterial. Huvudskärkraften F_c används för bestämning av erforderlig skäreffekt (energiförbrukning) och erforderligt motormoment.



Figur 4.2: Skärkraftskomponenter vid svarvning.

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

$$F_c = C_2 + C_1 \cdot h_1$$

$$F_f = D_2 + D_1 \cdot h_1$$

$$F_p = E_2 + E_1 \cdot h_1$$

Ekvation 4.4 och 4.5.

4.2. Polära diagram

Det är ofta svårt att bedöma materials potentiella skärbarhet utifrån dess mekaniska egenskaper eftersom många olika faktorer påverkar skärprocessen. Andersson och Ståhl[21] har föreslagit en metod för att bedöma materials skärbarhet och metoden har vidareutvecklats av Xu med fler[22] och Olovsjö med fler[23]. I metoden bedöms materialens potentiella skärbarhet genom att olika materialegenskaper mäts och jämförs med ett valt referensmaterial.

De materialegenskaper som direkt har inflytande på den potentiella skärbarheten är:

Duktilitet: Ett materials duktilitet bedöms efter materialets brottförlängning ε_b och har materialet en hög duktilitet finns en betydande risk för att arbetsmaterial vidhäftar på verktyget, vilket kan leda till ökad verktygsförslitning och att i vissa fall kan också löseggar avsetts och bidra till dålig ytjämnhet. Det är inte ovanligt att duktila material även ger problem med spånformning och spånbrytning. Värden för parametern har hämtats från Tabell 3.2.

Deformationshårdnande: Ett deformationshårdnande material innebär att arbetsmaterialets flytgräns ökar med ökad deformation. Detta medför att en redan skuren och därmed deformerad yta är hårdare och belastar den nästkommande skäreggen mer. Den lokala hårdheten i ytan ökar skaderisken bland annat för egglinjen. Materialets benägenhet att deformationshårdna bedöms med kvoten Dn mellan materialets brottgräns och sträckgräns enligt Ekvation 4.6. Värden för parametern har hämtats från Tabell 3.2.

$$D_n = \frac{R_m}{R_{p0,2}}$$

Ekvation 4.6.

Termisk ledningsförmåga: Hög värmeledningsförmåga eller termisk konduktivitet k gör att den värme som genereras i skärprocessen lättare leds bort från skärzonen och in i arbetsstycket. Detta medför att verktyget temperatur blir lägre och därmed också verktygsslitaget. Eftersom det i skärprocessen är fördelaktigt med lägre temperaturer betraktas ett högt värde på termisk ledningsförmåga som positivt i modellen. Värden på materialens hårdhet finns i Tabell 4.1.

Hårdhet: Hårdheten bedöms efter materialets makrohårdhet, i aktuellt fall enligt Brinell. Med ökad hårdhet i arbetsmaterialet följer ökat skärmotstånd och högre skärkrafter, vilket leder till ökad temperatur och ökat verktygsslitage. Värden på materialets hårdhet finns i Tabell 4.1.

Abrassivitet: Abrassiviteten beräknas som skillnaden i mikrohårdhet mellan hårda och mjuka faser i materialet. För att mäta denna pol eller parameter har materialens mikrohårdhet mätts i 400 punkter med en Bekowich-spets med lasten 50 mN. Abrassiviteten beräknas med Ekvation 4.7, där Wab är materialets abrassivitet, H materialets makrohårdhet, VF_{II} volymandelen hård fas, H_{II} är hårdheten i den hårdare fasen och H_I hårdheten i den mjukare fasen. Värden på materialens abrassivitet finns i Tabell 4.1.

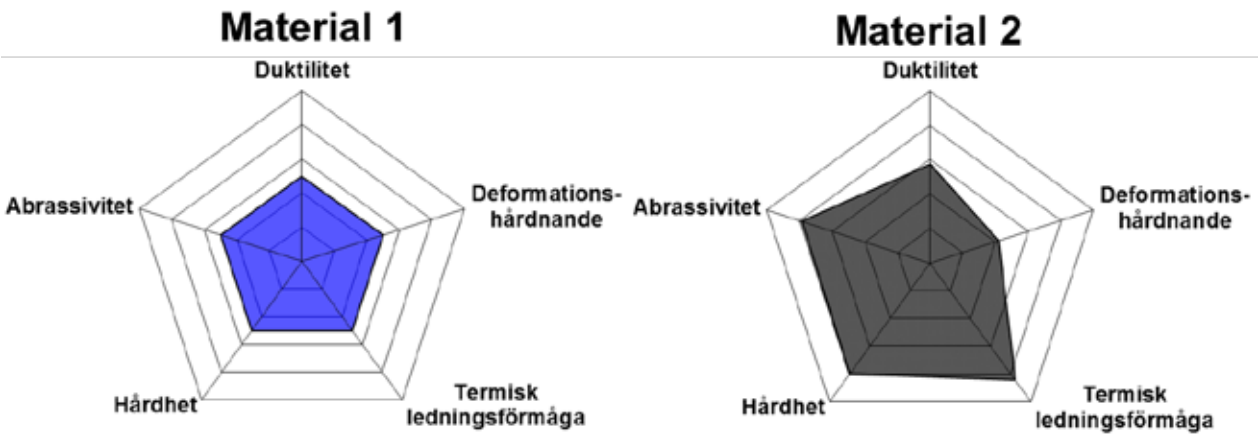
$$W_{ab} = H + VF_{II} \cdot (H_{II} - H_I)$$

Ekvation 4.7.

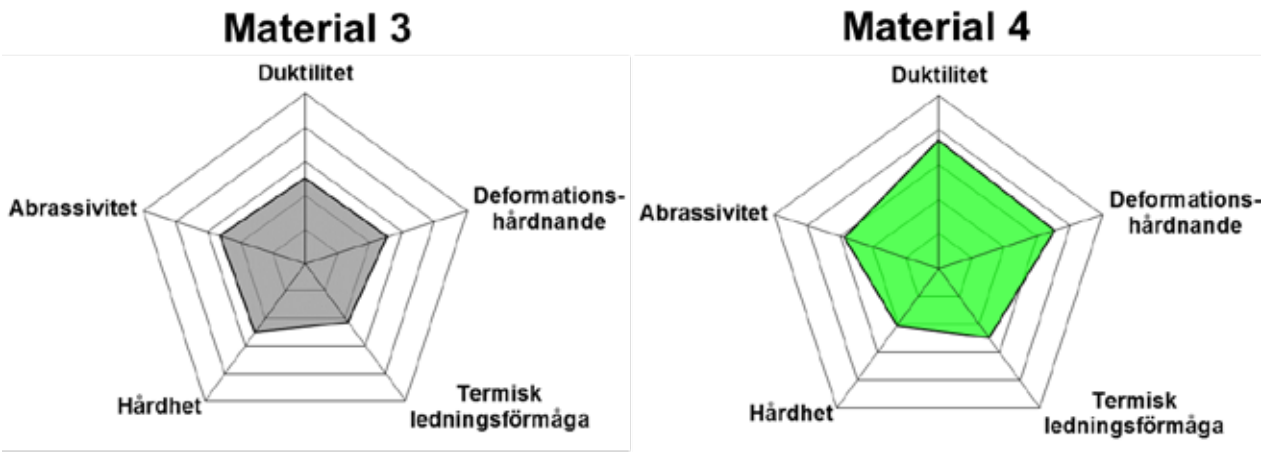
Polära diagram för fem olika mässingslegeringar finns i Figur 4.3 till Figur 4.5. I diagrammen har Material 1 (blyad mässing) valts som referensmaterial och de andra materialen jämförs mot dess egenskaper.

	Hårdhet [HB]	Abrassivitet [-]	Värmeledningsförmåga [W/mK]
Material 1	103.6	1.15	113[24]
Material 2	125.1	1.42	35[25]
Material 3	103.8	1.17	139[26]
Material 4	92.48	1.22	113
Material 5	93.83	1.22	113

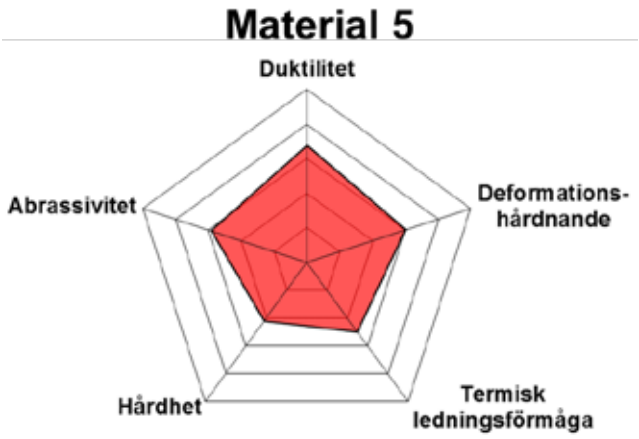
Tabell 4.1: Materialdata för att bedöma materialens potentiella skärbarhet.



Figur 4.3: Polärdiagram för Material 1 till vänster och för Material 2 till höger.



Figur 4.4: Polärdiagram för Material 3 till vänster och för Material 4 till höger.



Figur 4.5: Polärdiagram för Material 5.

4.3. Skärmotstånd

Skärmotståndet, Cr, beskriver motståndet för att avverka arbetsmaterialet per spånarea för given process och skärdata[27,28,29] enligt Ekvation 4.8 efter modell av Woxén/Johansson. Cr mäts i N/mm^2, alternativt Nmm/mm^3, vilket är ett mått på den energiåtgång per mm^3 som krävs för avverka material från arbetsstycket. Cr_1 och Cr_2 beskriver i sin tur den last och energiåtgång som ligger på spånsidan respektive släppningssidan av skärverktyget.

Ekvation 4.8.

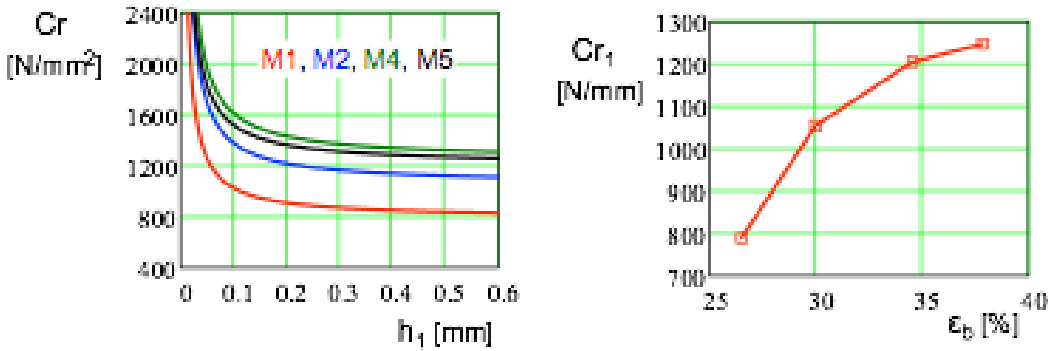
$$C_r = \frac{F_c}{h_1 \cdot b_1}$$

$$C_r = \frac{C_2 + C_1 \cdot h_1}{h_1 \cdot b_1} = \frac{C_1}{b_1} + \frac{C_2}{h_1 \cdot b_1} = Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_1}$$

Skärkraftsmätningar vid svarvning har gjorts i materialen 1, 2, 4 och 5 med olika matningar och skärdjup för att beräkna materialens skärmotstånd vid v_c 400 m/min enligt Ekvation 4.8. I försöken användes planslipade hårdmetallskär med neutral geometri utan spånbrytare. De duktila materialen 4 och 5 uppvisar högst skärmotstånd, Tabell 4.2. Konstanterna i modellen har beräknats för ap 1.5 mm men har även provats för skärdjupen a_p 1 och 2 mm med god överensstämmelse, Figur 4.6. Det kan konstateras att det finns ett klart samband mellan brotttöjning ε_b enligt Tabell 3.2 och skärmotståndskonstanten Cr1. En ökad brottförlängning medför en ökad kontaktlängd mellan spåna och verktyg som i sin tur leder till ökade skärkrafter verkande på skärets spånsida.

	Cr_1 [N/mm²]	Cr_2 [N/mm²]
Material 1, M1	788	24
Material 2, M2	1054	33
Material 4, M3	1247	37
Material 5, M4	1205	32

Tabell 4.2: Skärmotstånd för materialen 1, 2, 4, 5.



Figur 4.6: Skärmotstånd Cr för materialen M1, M2, M4 och M5 (till vänster) och sambandet mellan brottöjning för studerade material och skärmotståndskonstanten Cr_1 (till höger).

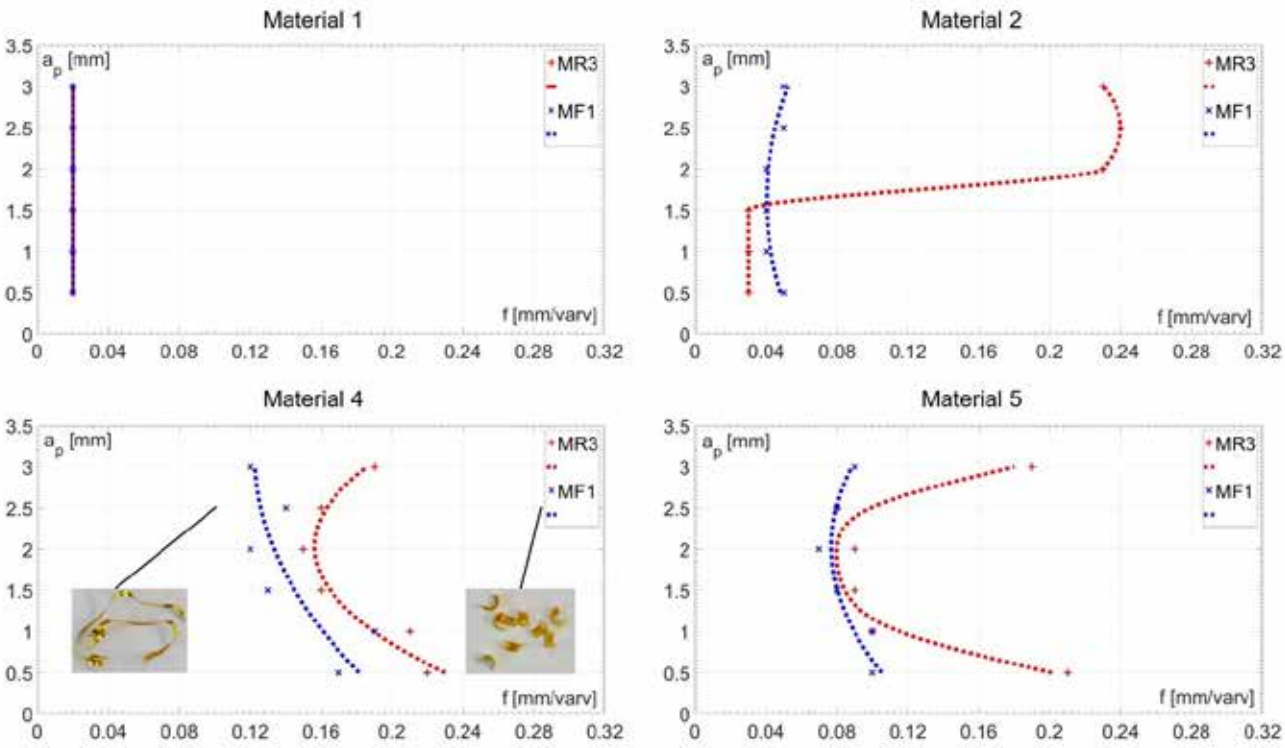
4.4. Spånbildning och processdynamik

Skärkrafternas uppträdande under konstanta förhållanden betraktas ofta statiskt, det vill säga att krafterna representeras av ett medelvärde och anses vara konstanta över tid. I själva verket varierar dock krafterna dynamiskt på grund av variationer i spånbildning och vibrationer i maskin, verktyg och arbetsstycke. Spånbildningen för ett material beror i betydande grad på materialegenskaper, verktygsgeometri och valda skärdata. Låglegerade kopparlegeringar uppvisar ofta problematik i spånbrytning i form av långa kontinuerliga spån som kan hänga upp sig i maskin och verktyg. Långa spån kan även försämra ytjämnheten genom så kallad spånhamring enligt Figur 4.7. Problem med spånhamring kan vara särskilt problematisk vid bearbetning av mjuka långspånande material som exempelvis högren koppar då den bearbetade ytan lätt skadas av den ofta hårdare spånan.

Figur 4.7: Kontinuerliga spånor vid svarvning i högren koppar.

En relativt enkel utvärdering av spånbildningskaraktäristiken för ett arbetsmaterial är att ta fram en så kallad spånkarta som markerar gränsen mellan spånor som är acceptabla och spånor som bör undvikas med hänsyn till störningsrisken. Figur 4.8 till Figur 4.10 visar spånformkartor för två obelagda hårdmetallskär med olika spånbrytargeometrier (MF1 och MR3, SECO TOOLS) för materialen 1, 2, 4, och 5, där skärdjup och matning varierats med skärhastigheten v_c = 400 m/min. Gränsen är markerad mellan kontinuerliga spånor (till vänster) och där spånbrytning förekommer (till höger). Det är dock viktigt att påpeka att spånformkartor ofta är helt unika för kombinationen mellan verktyg och arbetsmaterial under de specifika förhållande för diagrammets framtagning. Högtryckskylning med skärmedia kan exempelvis förändra spånformdiagrammet radikalt.

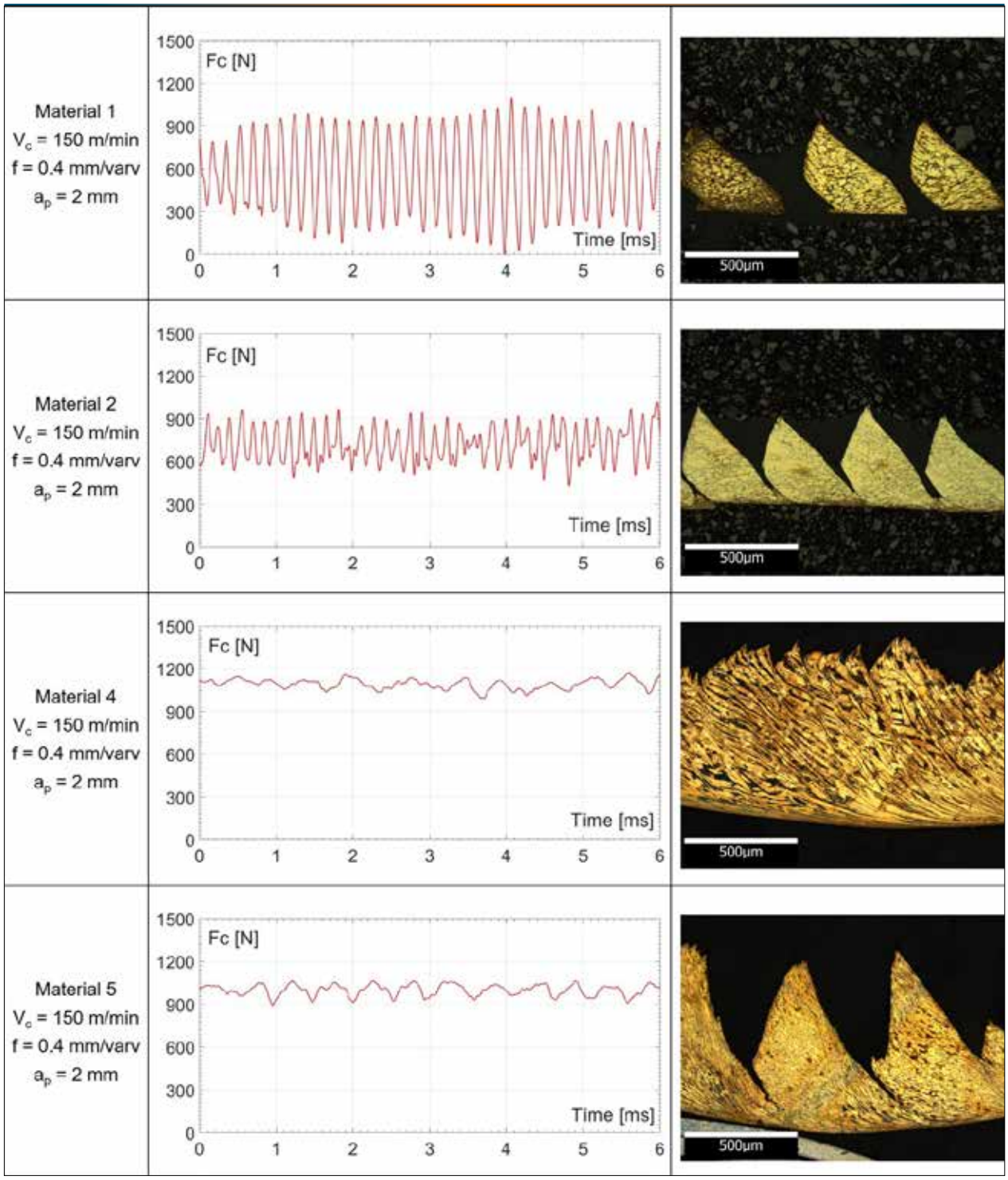
Det kan konstateras i Figur 4.8 (överst till vänster) att samtliga använda kombinationer i skärdata ger en god spånbrytning i Material 1, det vill säga blyad mässing. Detta förhållande är en faktor varför man önskar använda bly som en legeringstillsats.



Figur 4.8: Spånkartor från kontinuerlig longitudinell svarvning med v_c= 400 m/min för två olika spånbrytargeometrier i materialen 1, 2, 4 och 5.

I Figur 4.9 visas hur spånsegmenteringen för material 1, 2, 4 och 5 ger upphov till variationer i respektive huvudskärkraft F_c vid kontinuerlig longitudinell svarvning. Försöken är utförda med neutral verktygsgeometri (spånvinkel och lutningsvinkel 0°), och med skärdata: v_c = 150 m/min, f = 0.4 mm/varv, a_p = 1 mm samt κ = 93°.

Störst variation i skärkraften uppvisas av Material 1 enligt Figur 4.9, vars blyinnehåll ger upphov till ett sprött materialuppträdande i skärprocessen. Detta resulterar i en kraftig spånsegmentering och små korta så kallade klyvspån, vilket också förklarar utseendet på tillhörande spånformdiagram i Figur 4.8. Den höga duktiliteten (töjbarheten) för material 4 resulterar i lägst skärkraftsvariation med långa kontinuerliga flytspån. I detta fall erhålls en relativt lång kontaktlängd mellan spåna och verktyg vilket resulterar i högre skärmotstånd enligt Tabell 4.2.



Figur 4.9: Relationen mellan dynamisk skärkraft F_c och erhållen spånmorfologi för materialen 1, 2, 4 och 5.

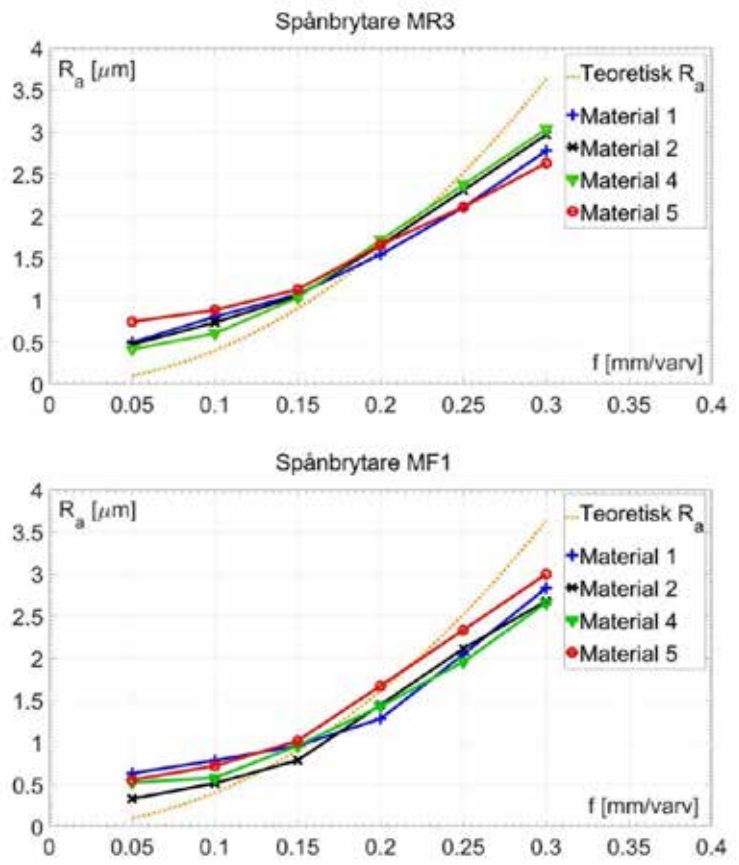
4.5.
Ytjämnhet

Ytkrav specificeras ofta baserat på en komponents funktion och krav och önskemål på estetiskt utseende. Den erhållna ytjämnheten på en bearbetad yta är en direkt följd av vald skärdata, verktygsgeometri, arbetsmaterialets egenskaper samt styvhet i maskin, verktyg och arbetsstycke. Figur 4.10 visar en jämförelse av R_a-värdet för materialen 1, 2, 4, och 5 för två obelagda hårdmetallskär, dock med olika spånbrytare. Den verkliga ytan jämförs också med ett teoretiskt beräknat R_a-värde enligt Ekvation 4.9[30], där rε betecknar skärverktygets nosradie och κ_b vinkeln mellan biskär och arbetsstyckets yta. För given skärdata och verktygsgeometri är Ekvation 4.9 giltig för matningar $f \leq 0.195$ mm/varv.

$$R_a \approx 0{,}77 \cdot \left[r - \frac{r_\varepsilon^{\,2}}{f} arcsin\left(\frac{f}{2r_\varepsilon}\right) - \frac{r_\varepsilon}{2}\sqrt{1 - \frac{f^2}{4 \cdot r_\varepsilon^{\,2}}} \right] \approx 0.77 \cdot \left(1 - \frac{\frac{f}{2r_\varepsilon}}{arcsin\left(\frac{f}{2r_\varepsilon}\right)} \right) \cdot r$$

$$\text{för } f \leq 2\sqrt{a_p(2r_\varepsilon - a_p)} \leq 2r_\varepsilon \text{ och } f \leq 2r_\varepsilon \cdot sin(\kappa_b)$$

Ekvation 4.9.

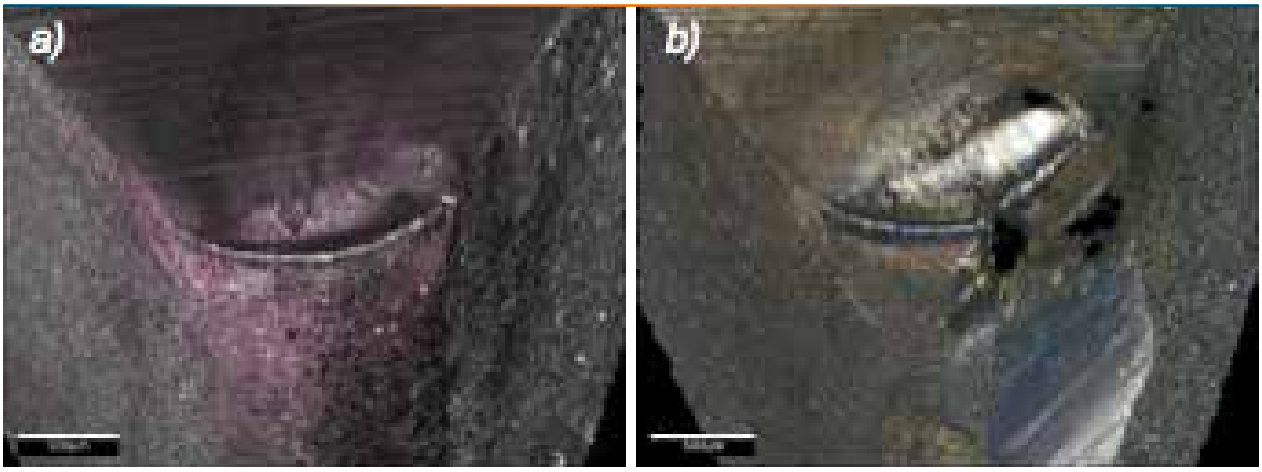


Figur 4.10: Verklig och teoretisk ytjämnhet (R_a) för två olika spångeometrier i materialen 1, 2, 4 och 5.

Det kan konstateras att skillnaderna mellan de olika mässingstyperna är liten avseende erhållen ytjämnhet. Vidare gäller att i stort kan man räkna med att erhålla en ytjämnhet som motsvarar den teoretiska, det vill säga det ytjämnhet som erhålls enligt Ekvation 4.9. Detta förutsätter att processen är stabil och att inga kritiska vibrationer uppkommer. Det är vanligt att den praktiskt erhållna ytjämnheten är samma eller bättre än den teoretiskt beräknade i arbetsmaterial med hög brottöjning i kombination med erforderligt hög deformationshårdnad.

4.6. Verktygsförslitning

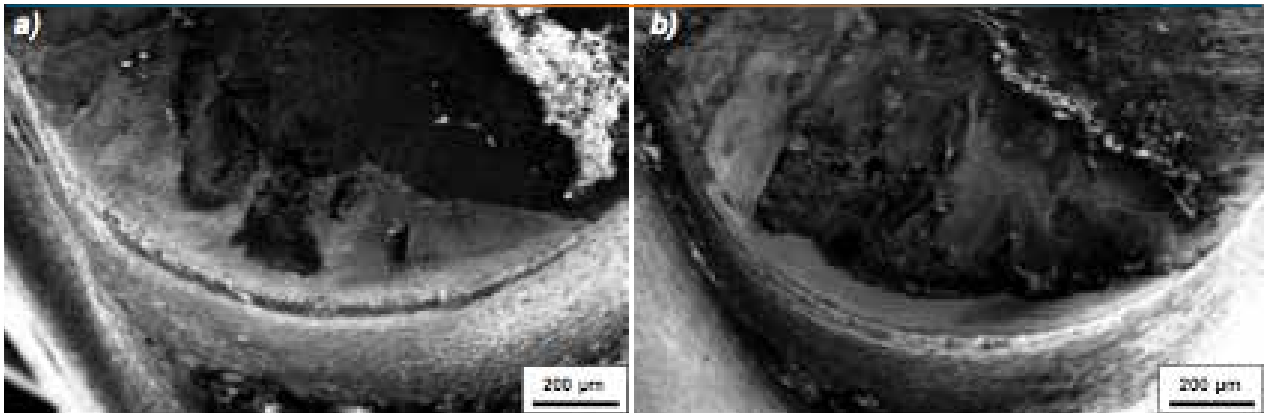
De låga skärkrafterna vid bearbetning av koppalegeringar gör att verktygsförslitningen vanligtvis är liten eller begränsad. Vid bearbetning av Material 2 med ett obelagt hårdmetallskär havererade skäret efter 142 minuters bearbetning vid v_c = 400 m/min, a_p = 0.8 mm och f = 0,20 mm/varv. Vid motsvarande försök i Material 1 hade en försumbar gropförslitning erhållits efter 160 minuters bearbetning då försöket avslutades[31], Figur 4.11.



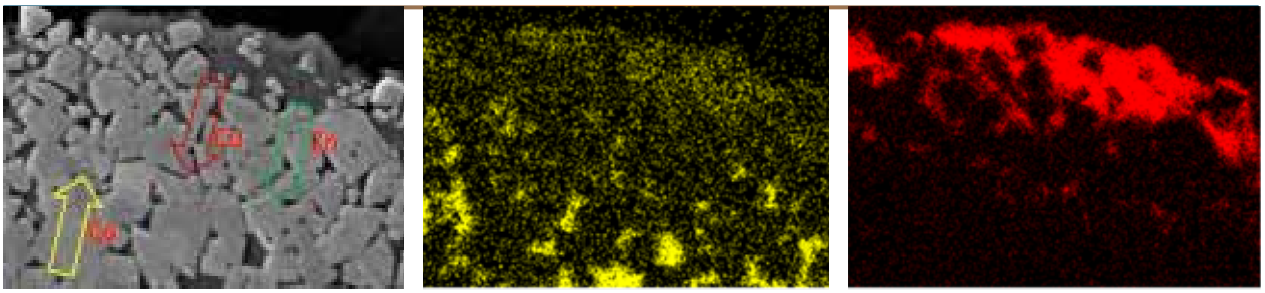
Figur 4.11: Verktygsförslitning obelagt hårdmetallverktyg i a) Material 1 och b) Material 2.

Genom att använda belagda skär kan verktygslivslängeden utökas markant. Vid bearbetning av Material 2 med en amorf diamantliknande beläggning eller beläggning bestående av (Ti,V,Zr,Hf,Nb,Ta)N gav samma förutsättningar en helt försumbar förslitning efter 145 minuters bearbetning varvid försöken avslutades på grund av materialbrist, Figur 4.12. En senare studie visade att den förslitning som erhållits främst kunde härledas till diffusion mellan skärverktygets spånsida och arbetsmaterialet.

Kobolt som används som bindemedel i hårdmetallen diffunderar ut ur verktyget och i viss omfattning ersätts av koppar och zink enligt Figur 4.13, vilket tillsammans med ett adhesivt beteende hos arbetsmaterialet resulterar i förslitning av verktyget[32].



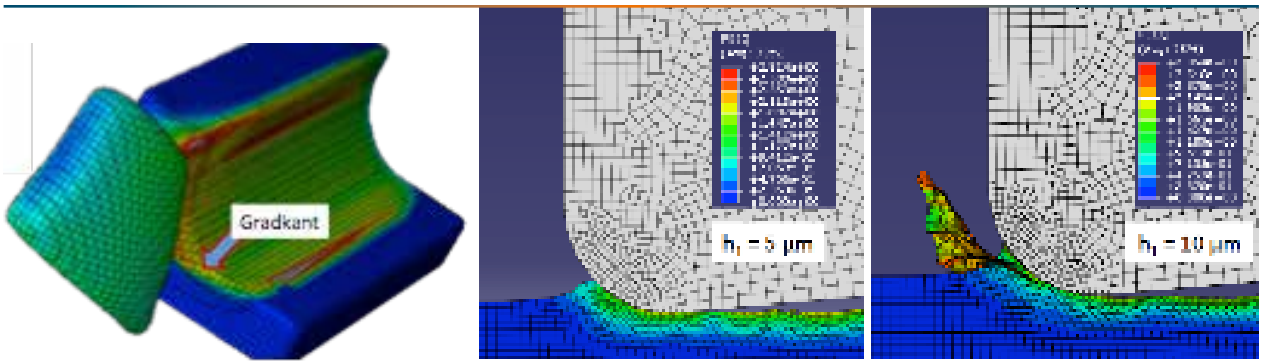
Figur 4.12: Verktygsförslitning vid bearbetning av material 2 med hårdmetallverktyg belagt med a) diamantliknande beläggning och b) beläggning bestående av (Ti,V,Zr,Hf,Nb,Ta)N.



Figur 4.13: Diffusionsprocess i skärverktyget där hårdmetallens bindemedel (Co-gul färg) diffunderar in i spånan medan koppar (Cu-röd färg) och zink från mässingslegeringen diffunderar in i verktyget enligt EDX-analysen.

4.7. Gradbildning

Gradbildning på kanter och ytor efter skärande bearbetning är ett påtagligt problem, särskilt vid bearbetning av duktila material som exempelvis kopparlegeringar. Uppkomsten av grader beror på att villkoren för att upprätthålla en fungerande skärprocess inte är uppfyllda. För att kunna undvika en gradbildning måste arbetsmaterialet balansera och bära de skärkrafter som uppstår i processen. Om reaktionskrafterna inte kan åstadkommas av arbetsstycket och dess uppspänning kommer stagnationspunkten i skärprocessen gå förlorad. Stagnationspunkten är en skiljeväg mellan spåna och arbetsmaterial.



Figur 4.14: Simulering av gradkant vid verktygets utgång ur arbetsmaterialet (till vänster) och skärprocess med och utan utvecklad stagnationspunkt (till höger). Källa: Agmell M.

Gradtyper kan klassificeras i fyra grupper baserat på den bakomliggande mekanismen[33,34]. De gradtyper som finns har inga etablerade svenska benämningar utan kallas; Poisson grad, rollover grad, tear grad eller så kallad rivgrad, och cut-off grad. Vid svarvning förekommer Poissongraden och även en form av vallbildning enligt Figur 4.15 (till höger). Vallbildning uppstår genom att materialet flyter ut i den radiella riktningen då verktyget matas i den axiella riktningen.

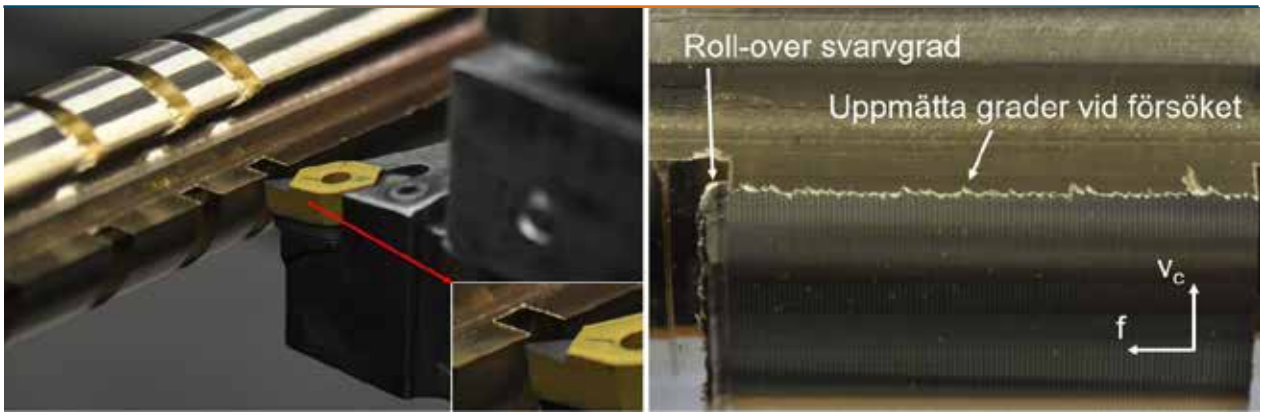
En roll-over grad uppkommer i matningsriktningen vid slutet av en passage när arbetsmaterialet viker åt sidan istället för att avverkas, Figur 4.16 (till höger) och simuleringen enligt Figur 4.14 (till vänster). En tear grad kan uppkomma då material rivits av istället för att ha skjuvats av med spånan, och en cut-off grad är det material som blir kvar på

arbetsstycket vid till exempel avstickning eller sågning. Indelningen av gradtyper kan också göras i utgångsgrader och ingångsgrader.

Följderna av gradbildning på produktionen av en komponent kan delas in i tekniska, ekonomiska, och säkerhetsrelaterade problem. De tekniska problemen inkluderar mått- och toleransavvikelser, monteringsproblematik, driftstörningar och verktygsförslitning. De ekonomiska följderna kommer av att kostnaderna för utrustning och tid spenderad på avsyning och avgradning. Gradernas vassa karaktär utgör en säkerhetsrisk för de som hanterar dem och utgör en dominerande orsak till personskador inom industrin.

Graddimensioner och följdproblematiken ökar typiskt med duktiliteten och deformationshårdnandet i arbetsmaterialet. Figur 4.15 (till vänster) visar en grad i ett ventilhus till en tvåvägsventil, som är ett exempel på en grad som potentiellt kan utgöra tekniska problem vid användning av komponenten.

Figur 4.15: Exempel på gradbildning från bearbetning av en tvåvägsventil i mässing (till vänster), och vallbildning vid svarvning i högren koppar (till höger).

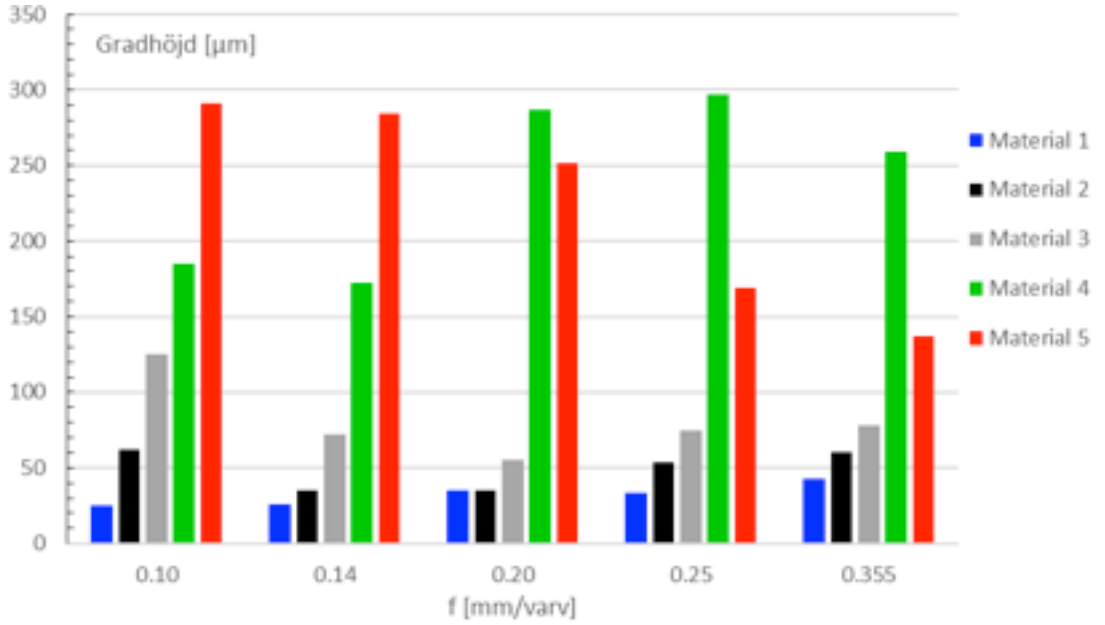


Figur 4.16: Försöksuppställning för utvärdering av gradbildning (till vänster).

Figur 4.17 visar uppmätt gradhöjd för olika matningar i material 1-5. Försöket är gjort vid intermittent svarvning, där ett axiellt spår frästs ut i arbetsstycket. Spårets sidoytor är parallella med arbetsstyckets radiella riktning, för en 90° verktygsutgång i tangentiell riktning. Vid försöken användes skär som planslipats i sin verktygshållare för att erhålla skär utan spånbrytare, och skärets spånsida parallell med det i arbetsstycket frästa spårets sidoyta vid verktygsutgången, Figur 4.16. Gradernas höjd mättes i tangentiell riktning som det vinkelräta avståndet mellan spårets sidoyta och gradtoppen.

Figur 4.3 till Figur 4.5 visar materialegenskaperna som påverkar skärprocessen för materialen 1-5 i form av polära diagram. Material 4 och 5 är de material med högst duktilitet och deformationshård-

nande enligt Figur 3.10 och de som även uppvisar störst grader i jämförelse med de andra materialen. Minst gradbildningsbenäget har Material 1, vars blytillsats gör att det uppträder förhållandevis sprött i skärprocessen. I de fall då graddimensionen minskar med en ökad matning, kan en avvägning behöva göras mellan erhållen yta och tid och kostnad för avgradningsoperationer.



Figur 4.17: Gradhöjd som funktion av matningen för materialen 1-5, vc = 200 m/min, ap = 1 mm, κ = 90°.

Teoretiskt sätt kan inte gradbildning och grader undvikas vid skärande bearbetning men däremot kan gradbildningen minimeras genom vissa åtgärder:

- Bearbeta alltid utifrån och in i arbetsmaterialet, detta gäller speciellt vid fräsning då detta är praktiskt möjligt. Denna princip leder till ökade cykeltider då verktyget hela tiden arbetar utifrån och in, vilket leder till längre verktygsvägar utan materialavverkning. Den ökade cykeltiden måste ställas mot kostnaden för avgradning.
- Generellt gäller att minskad eggradie (vassare egglinje) leder till en minskad gradhöjd.

4.8. Generella erfarenheter vid skärande bearbetning

Vissa generella erfarenheter och rekommendationer kan ges vid en övergång från blyad till blyfri eller lågblyad mässing. De största problemen vid en övergång till blyfria eller lågblyade materialalternativ är:

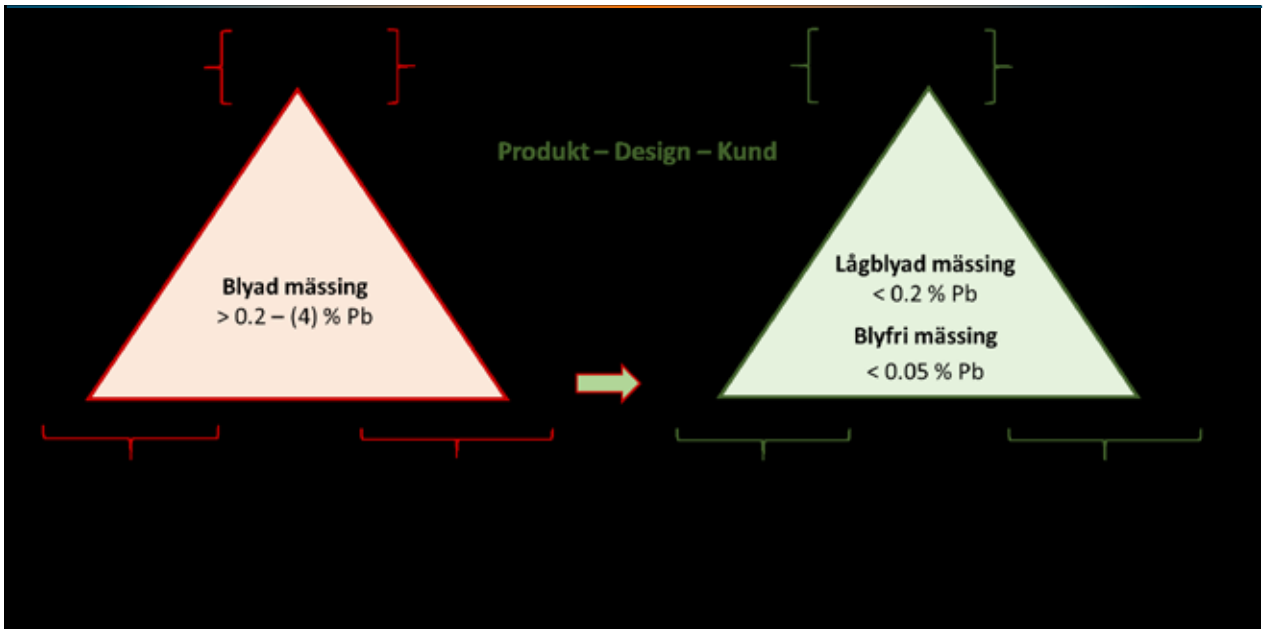
- Spånform, lågblyade material ger längre och mer sammanhängande spånor som försvårar automatisk bearbetning, innerbearbetning och håltagningsoperationer.
- Ökat verktygsslitage, lågblyad mässing medför ökade verktygskostnader på grund av avsevärt högre verktygsslitage.

Problem med spånbrytning kan drastiskt reduceras om man kan övergå från kontinuerlig svarvning till de intermittenta processerna fräsning eller så kallad svarvfräsning, Figur 4.18. Erfarenheter visar att också produktiviteten kan ökas på detta sätt. Exempel visar att cykeltiden för att tillverka en detalj kan i dessa fall halveras. En viktig aspekt är en maskinutrustning bör bestyckas med dubbla skärmediasystem om man i samma maskin önskar bearbeta både blyad och lågblyad mässing. I annat fall kan ställtider för rengöring av maskinutrustningen bli mycket kostsam.

Relativt sett har alla mässingslegeringar en hög skärbarhet med avseende på verktygsslitaget, men då särskilda krav ställs på verktygets formkomplexitet bland annat vid tillverkning av vissa armaturkomponenter krävs långa verktygslivslängder för att få god bearbetningsekonomi. Dessa verktyg kan vara mångdubbelt dyrare än de vändskär som används vid konventionell skärande bearbetning, vilket gör att verktygslivslängden måste i motsvarande grad vara längre. För att uppnå ekonomisk bearbetning med ett verktyg i hårdmetall enligt Figur 4.19 krävs en livslängd motsvarande cirka 10 h. En erforderligt lång livslängd kan erhållas genom att belägga verktygen. Erfarenheter visar sig att diamantbaserade beläggningar och beläggningar med högt kväveinnehåll kan fungera väl. I sammanhanget bör nämnas att det kan vara fördelaktigt att använda intermittenta skärprocesser och verktygsbeläggningar vid all mässingsbearbetning.

Figur 4.18: Investering i intermittenta processer i stället för kontinuerliga processer är en väg för att undvika problem med de mer långspånande lågblyad mässingstyperna.
Källa: Markaryds Metall Armatur, Markaryd.

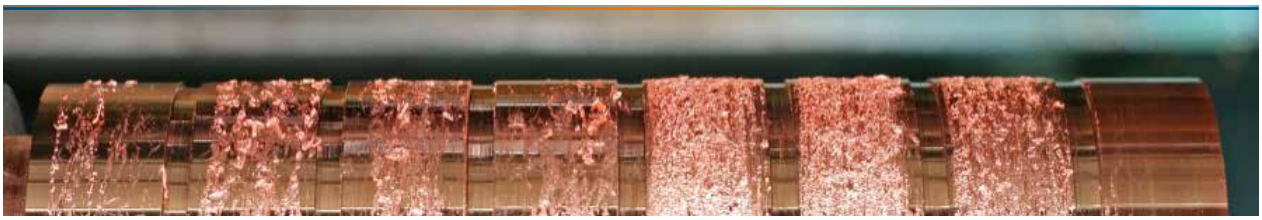
Figur 4.19: Exempel på formverktyg för skärande bearbetning vid tillverkning av en armaturkomponent.
Källa: Markaryds Metall Armatur, Markaryd.



Figur 4.20: Moment och karakteristika vid övergång från blyad till blyfri eller till lågblyad mässing.

4.9.
Högren koppar – praktiska erfarenheter vid skärande bearbetning

Högren koppar (Cu > 99.95 %) är en mycket duktil metall i ren form, vilket har en stor inverkan vid skärande bearbetning och framförallt vid svarvoperationer. Vid val av skärverktyg kategoriseras koppar i icke-ferritiska material (Grupp N enligt ISO 513), där obelagda verktyg är att föredra för att kunna minimera verktygets eggradie, det vill säga få så skarpt verktyg som möjligt. En skarp egg är helt nödvändigt att använda för att avverka materialet. I annat fall ökar problematiken med gradbildning och vidhäftning av avverkat material på den skurna ytan enligt Figur 4.21. Skärmedia (skärvätska) är även att föredra för att bland annat motverka vidhäftning och kallsvetsning av material på den genererade ytan.



Figur 4.21: Vidhäftningsproblematik på den skurna ytan vid bearbetning av högren koppar.

Vid svarvning av högren koppar är spånbrytning nästintill obefintlig, svarvningsprocessen kännetecknas av långa kontinuerliga spånor där risken för att spånorna ska trassla in sig i maskinen/arbetsstycket och förstöra den redan bearbetade ytan är överhängande. Problematiken med spånorna är framförallt förekommande vid större skärdjup och matningar. Även vid små skärdjup och lägre matningar är spånorna kontinuerliga men spånorna är finare vilket minskar risken att ytan på arbetsstycket förstörs även om spånorna skulle trassla in sig. Problematiken med kontinuerliga spån gäller

framförallt svarvning, i en fräsningsprocess uppstår inte samma problem med spånbildningen då spånan bryts av i den intermittenta fräsprocessen.

Löseggsbildning är ytterligare ett problem vid svarvning av koppar där materialet har ett ytterst oberäkneligt uppträdande. Löseggsuppbyggnad kan uppstå plötsligt under skärande processen och förekomsten av lösegg varierar från ett arbetsmaterial till ett annat. Skärande processen kan i ena fallet vara problemfri till att i nästa få akuta problem med löseggsbildning enligt Figur 4.22.

Figur 4.22: Medföljande lösegg kallsvetsad mot spånan.

I Tabell 4.3 visas generell rekommendation för svarvning av högren koppar och rekommendation vid högre krav på ytjämnhet, R_a < 0.6 µm, enligt Tabell 4.4.

Vid materialbyte från ett blyinnehållande material till ett blyfritt är det viktigt att se över vilka delar av produktionskedjan som påverkas, från rent tillverkningstekniska aspekter till inköp och logistik. Skarpa obelagda skär är ofta en fördel vid bearbetning i kopparlegeringar.

Värt att notera är att resultatet vid bearbetning av högren koppar kan variera mellan olika operatörer samt användande av maskinutrustningen.

v_c [m/min]	f [mm/varv]	a_p [mm]	r_ε [mm]
70 – 200	0.01 – 0.3	0.1 – 1.0	0.2 – 0.8

Tabell 4.3: Generell rekommendation för svarvning av högren koppar.

Vid materialbyte från ett blyinnehållande material till ett blyfritt är det viktigt att se över vilka delar av produktionskedjan som påverkas, från rent tillverkningstekniska aspekter till inköp och logistik. Skarpa obelagda skär är ofta en fördel vid bearbetning i kopparlegeringar.

v_c [m/min]	f [mm/varv]	a_p [mm]	r_ε [mm]
70 – 200	0.01 – 0.05	0.1 – 0.2	0.2

Tabell 4.4: Rekommendation för svarvning vid höga krav på ytjämnhet (Ra < 0.6 µm).

Används blyfria och blyinnehållande material parallellt kan det vara nödvändigt att hålla restprodukter från bearbetningen åtskilda för att kunna skicka restprodukterna till återvinning.

5
Tillverkningsekonomi

Kostnadsbilden kommer att drastiskt förändras vid en övergång från blyad mässing till alternativ som lågblyad mässing. Vissa av dessa förändringar framgår indirekt i Figur 4.20 tidigare. De kostnadsposter som kommer att öka är vanligen:

- Ökad materialkostnad för blyfri alternativt lågblyad mässing bland annat relaterat till ökad kopparhalt, färre leverantörer och mindre materialvolymer.
- Mer komplex logistik, mindre rationell återvinning och mindre materialströmmar samt kostnad för märkning av restmaterial och komponenter.
- Ökade verktygskostnader.
- Längre produktionstid.

Flera av de kostnadsdrivande faktorerna ovan kan till stora delar hanteras genom teknisk utveckling som behandlats ovan. En av de viktigaste åtgärderna i detta sammanhang är att utnyttja det blyfria och lågblyade materialets högre hållfasthet genom att konstruera produkterna med ett tunnare gods. Denna åtgärd gör att det är lämpligt att tillverka nya produkter i de lågblyade alternativa materialen. Detta förhållande gör också att det är svårt att kunna göra direkta och exakta kostnadsjämförelser mellan samma komponenter med olika blyhalt. Exempel visar att den viktbesparing som kan göras i en komponent kan täcka in cirka hälften av den ökade materialkostnaden (2016) för en typisk armaturkomponent, övriga kostnader får kompenseras med produktionsteknisk utveckling och uttag av ett högre pris tack vare ökat kundvärde.

5.1.
Kostnadsmodellering

Många olika tillverkningskostnadsmodeller har publicerats genom åren. Vanligtvis kan dessa modeller delas in i mikroekonomiska modeller, som beskriver inverkan av specifika processparametrar på tillverkningskostnaden, och makroekonomiska modeller som avser beskriva tillverkningskostnaden på ett mer holistiskt plan. En modell som försöker inkludera de positiva aspekterna från båda dessa typer av kostnadsmodeller har publicerats av Ståhl[35]. Denna modell har använts för att utvärdera resultatet från fallstudien.

5.2.
Fallstudie

För att utvärdera skillnaden i tillverkningskostnad mellan blyinnehållande mässing och blyfri mässing gjordes en fallstudie där samma detalj bearbetades i de två materialen. Detaljen har en diameter på cirka 20 mm och är en del av en termostat enligt Figur 5.1.

Figur 5.1: Exempeldetalj tillverkad i material 1 (till vänster) och material 2 (till höger).

Under fallstudien registrerades all produktionsdata vilket möjliggjorde beräkning av tillverkningskostnaden för de olika undersökta fallen enligt Tabell 5.1. Det bör understrykas att tillverkningskostnaden är den som erhölls utan att någon förändring gjordes av tillverkningstekniken, det vill säga den etablerade tekniken för blyad mässing tillämpades rakt av på lågblyad mässing.

Som synes erhålls en markant högre tillverkningskostnad vid bearbetning av blyfri mässing, i aktuellt fall cirka 75 % högre än för motsvarande tillverkning i blyinnehållande mässing med 3.3 % bly. Inköpskostnaden för blyfri mässing är idag förhållandevis högt men detta förklarar inte hela skillnaden. Resultaten indikerar även högre kassationer och lägre takt vid bearbetning av blyfri mässing, vilket tillsammans med högre verktygsförslitning och fler produktionsstillestånd utgör grunden för den stora skillnaden i tillverkningskostnad.

	Material 1	Material 2	Ökning
Tillverkningskostnad [€/st.]	0.13	0.24	77 %
Tillverkningskostnad [exklusive råmaterial€/st.]	0.04	0.06	72 %

Tabell 5.1: Beräknad tillverkningskostnad.

Efter det att ny teknologi införts, beskriven enligt ovan, kan en uppskattning göras att skillnaden reduceras så att kostnaden för det lågblyade alternativet är cirka 25 % högre. En faktor som gör jämförelsen svår är också skillnaden i maskintimkostnad mellan blyade komponenter som bearbetas i äldre maskiner och lågblyade komponenter som tillverkas i nya maskiner. De nya maskinerna har en avsevärt högre produktivitet samtidigt som maskintimkostnaden är betydligt högre i förhållande till de äldre maskinerna. Det är inte självklart att man ska jämföra enskilda komponenter i aktuellt avseende utan man bör jämföra hela produkten eller produktfamiljen. Vissa komponenter görs besparingar på väggtjocklek etcetera, medan andra komponenter inte kan anpassas till det lågblyade materialets egenskaper.

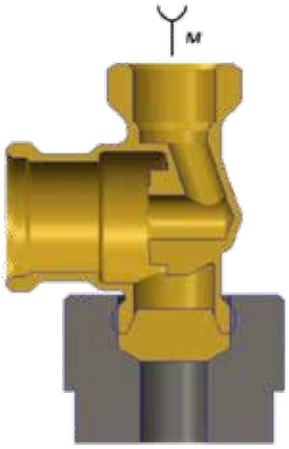
6
Konstruktionsprinciper

En fördel med blyfria kopparlegeringar är att de ofta har en högre hållfasthet än motsvarande blyade materialen, men som nämnts ovan har de även generellt en högre inköpskostnad.

I en fallstudie (demonstrator) av ett ventilhus som från början var tillverkad i Material 1 men har konstruerats om för att tillverkas i Material 2 istället har komponentens hållfasthet undersökts. Det är viktigt att mäta den hållfastheten i komponenten (komponenthållfastheten) i stället för i en provstav då dessa är tillverkade under olika förutsättningar.

Genom att utnyttja den ökade hållfastheten i Material 2 har den färdiga komponentvikten kunnat reduceras från 102 gram till 89 gram genom en produktionsoptimering. Detta gör att det kan vara möjligt att tillverka komponenten i ett mer kostsamt material men med bibehållen detaljkostnad. I fortsatt text kommer det tyngre ventilhuset att kallas för geometri A medan det lättare ventilhuset benämns geometri B.

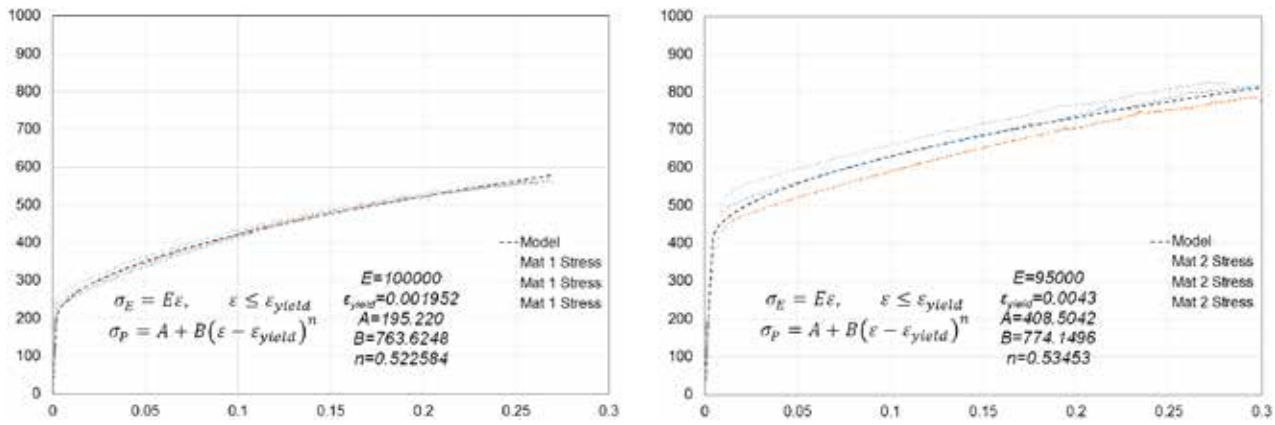
Figur 6.1: Ventil som använts vid numerisk och mekanisk provning.



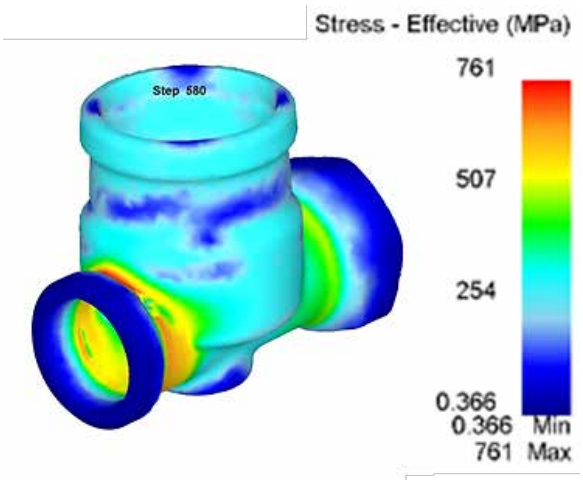
Figur 6.2: Belastningsfall för numerisk och mekanisk provning.

6.1.
Numerisk simulering (FEM)

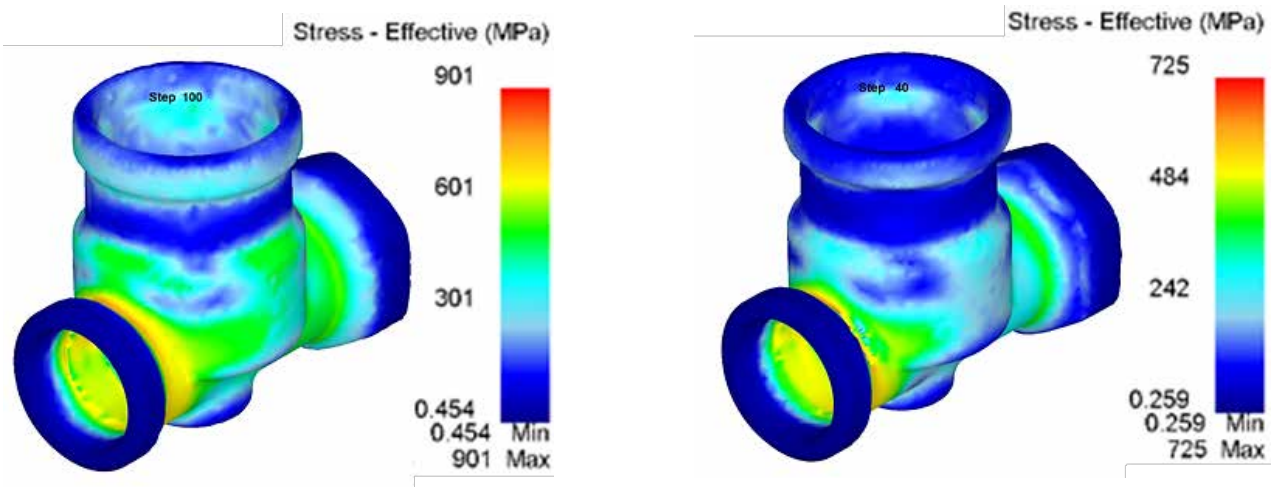
Det är svårt att förutse hur en produkts hållfasthet förändras vid en materialändring. Med hjälp av draghållfasthetsdata som presenteras i Figur 3.10 och temperaturdata från materialleverantörer har en Johnson-Cook materialmodell konstruerats för att utvärdera hållfastheten i geometri B anpassad för blyfritt material och jämföra den med den ursprungliga geometri A enligt Figur 6.3[36,37]. Simuleringarna har utförts i programvaran Deform och belastningsfallet som provats är vridning enligt Figur 6.2. Detta bedöms vara det värsta belastningsfallet som komponenten kommer att utsättas för under sin livstid och belastningen kommer att ske vid montering av komponenten. I simuleringen ansattes en konstant vridhastighet på 0.1 rad/s. Spänningsfälten i Figur 6.4 till Figur 6.5 visar var i komponenten spänningarna är som störst precis innan brott uppstår. Vid simuleringen har geometrin anpassats till mjukvaran, bland annat bortses från gängornas roll.



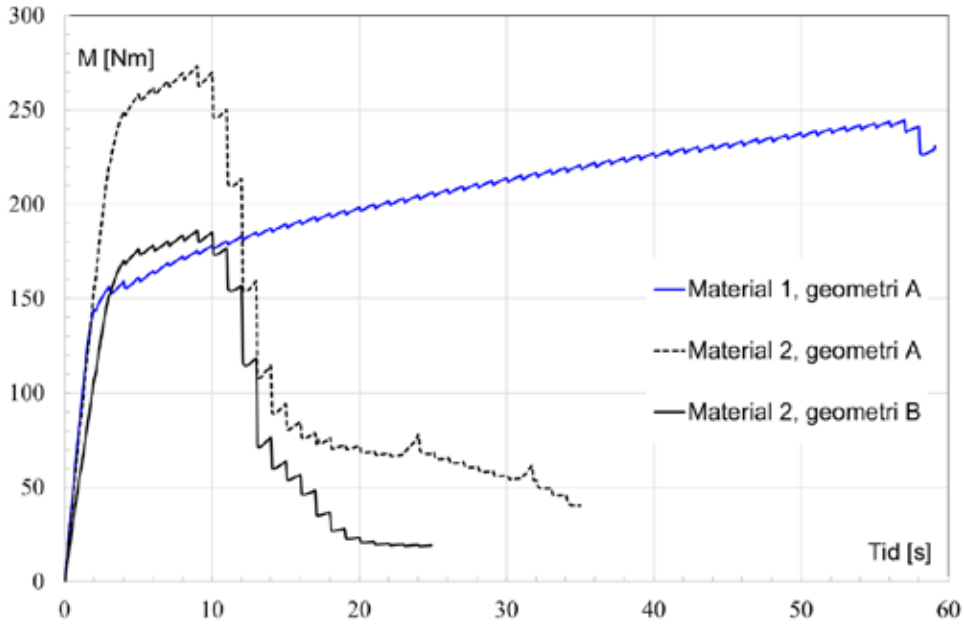
Figur 6.3: Parametrar för materialmodeller för material 1 (till vänster) och material 2 (till höger).



Figur 6.4: Spänningsfält med effektivspänning enligt Von Mises för geometri A med material 1.



Figur 6.5: Spänningsfält med effektivspänning enligt Von Mises för geometri A (till vänster) och geometri B (till höger) med material 2.



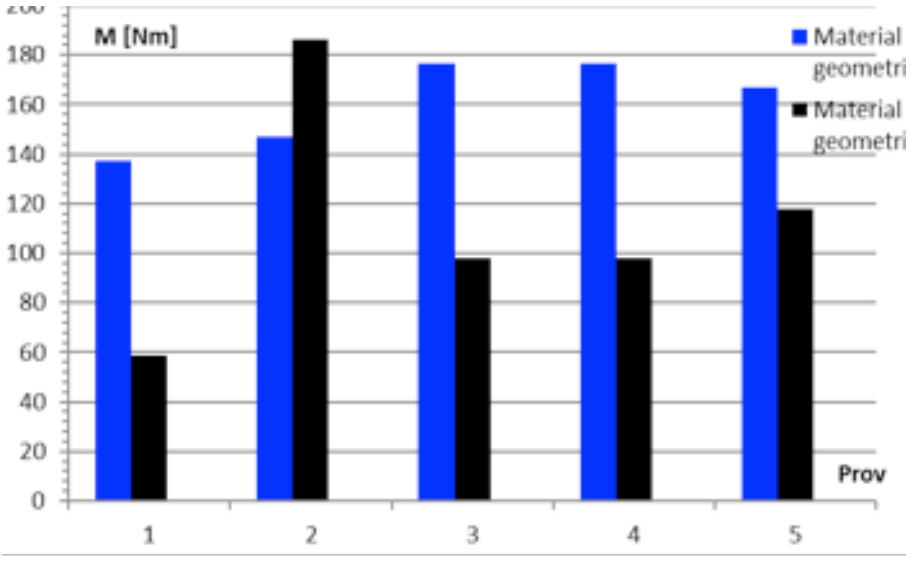
Figur 6.6: Resultat av simuleringar med material 1 och 2 för geometri A och 2.

Hade komponenten fortsatt tillverkas med bibehållen geometri i Material 2 hade resultatet blivit en komponent som är överkvalificerad för sitt ändamål, utan att öka sin funktionalitet enligt Figur 6.6.

Med geometri B klarar komponenten ungefär samma belastning innan plastisk deformation (linjära delen i kurvan) som den ursprungliga komponenten (geometri A tillverkad i material 1).

6.2. Mekanisk provning

Samma belastningsprov som för simuleringen har även utförts mekaniskt. Vid den mekaniska provningen gängades komponenten in i ett fast inspänt stycke och momentet applicerades på den hexagonala delen av ventilhuset. Det rekommenderade åtdragningsmomentet vid montage av komponenten är 40 Nm. Det moment som krävdes för brott i de olika komponenterna mättes och provet upprepades fem gånger för vartdera materialet enligt Figur 6.7.



Figur 6.7: Resultat från mekanisk provning av geometri A tillverkad i Material 1 respektive geometri B tillverkad i Material 2.

Vid provningen havererade nio av tio komponenter i gängorna och en gick av vid den hexagonala delen enligt Figur 6.8. Detta indikerar att gängförbandet är den svagaste delen av konstruktionen.

Figur 6.8: Olika haverier vid mekanisk provning, brott i det tunnaste tvärsnittet (till vänster) och havererade gängor (till höger).

Det är svårt att jämföra de absoluta värdena för haveri mellan den numeriska simuleringen och den mekaniska provningen eftersom gängorna inte fanns med i den numeriska simuleringen. Med vald mätmetod fanns det ingen möjlighet att mäta momentet kontinuerligt under belastningen för att undersöka vid vilket moment ventilhuset började deformeras plastiskt.

7
Hållbar produktion

Redan 1987 definierade FN hållbar utveckling som en utveckling som möter dagens behov utan att inverka på framtida generationers förmåga att uppfylla sina egna behov[38]. Hållbar produktion introducerades sedan 1992[39] och är idag en erkänt viktig faktor vid modern produktionsutveckling. Vanligtvis indelas hållbarhet i tre delar; miljö, ekonomi och samhälle[40]. Även moral och etik kan och bör absolut adderas till som en viktig faktor[41].

Det är viktigt att hållbar utveckling går hand-i-hand med teknisk utveckling för att bli en integrerad del av produktionsprocessen. Det är i detta sammanhang viktigt att ha ett holistiskt synsätt över hela produktens livscykel för att erhålla långsiktigt hållbar utveckling, där hållbarhet utvärderas utöver de traditionella tekniska och ekonomiska faktorerna.

Figur 7.1: Ett komplett hållbarhetsbegrepp[41,42].

7.1.
Livscykel

Vid analys av en produkts hållbarhet är det viktigt att utvärdera hela produktens livscykel, det vill säga i huvudsak materialutvinning, tillverkning, användning och återvinning. Enbart genom att jämföra den samlade effekten av alla dessa delar erhålls en korrekt bild av produktens miljöpåverkan.

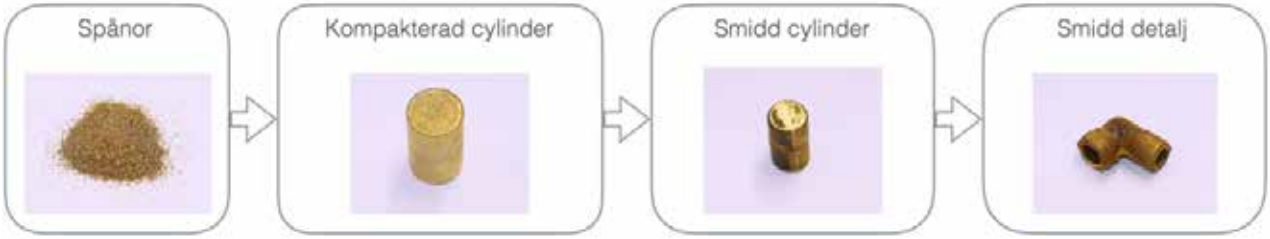
7.2.
Återvinning

Återvinningen av produkter kan indelas in i tre olika grundprinciper beroende på produktens beskaffenhet; återanvändning, materialåtervinning och energiåtervinning[42]. Återanvändning av produkter eller komponenter är känt sedan länge inom tillexempel fordonsbranschen. Genom att rengöra och kontrollera produkter eller komponenter erhålls en markant lägre miljöpåverkan än vid nyproduktion av motsvarande produkt. Som ett andra alternativ finns materialåtervinning. Materialåtervinning styrs idag i stor utsträckning av råvarupriserna, materialets tillgänglighet och övriga logistik- och återvinningskostnader. I detta sammanhang är sönderdelningsprocessen av uttjänta produkter av central betydelse då effektiv separering av ingående material krävs för en effektiv återvinningsprocess. Om ingen av dessa återvinningsmetoder är möjlig kan energiåtervinning vara en sista utväg.

7.3.
Spånsmide – en möjlighet

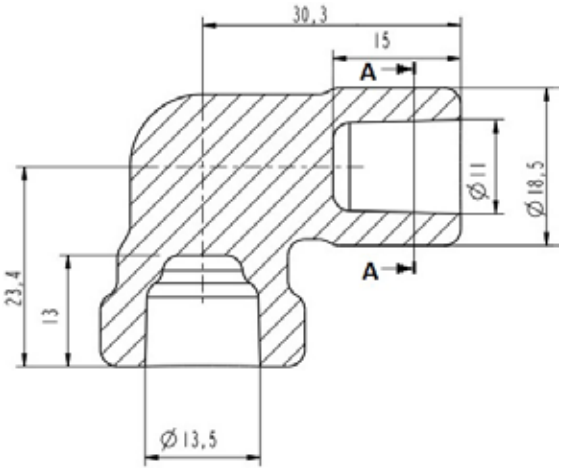
Många komponenter som tillverkas i kopparlegeringar, och speciellt mässing, är tunnväggiga och ihåliga konstruktioner som till exempel rörkopplingar. När dessa komponenter tillverkas är det inte ovanligt att majoriteten av utgångsmaterialet avverkas på något sätt under förädlingsprocessen. Eftersom mycket material avverkas under tillverkningen, ofta i form av spån, och sedan skickas tillbaka till materialleverantören för återvinning uppstår en loop där producerande företag och materialleverantörer skickar material fram och tillbaka.

För att öka materialutnyttjandet och minska mängden transporter mellan materialleverantör och producerande företag har möjligheten att använda skärspån i en in-house återvinningsprocess med hjälp av varmsmide undersökts, här benämnd som spånsmide. Liknande tekniker provades under 1970-talet, då med lyckade resultat och en reduktion av tillverkningskostnaden med 26 %[43], dock är det oklart om det idag finns implementerade processer av samma slag. Sintring av zinkinnehållande legeringar är svårt och kräver noggrann kontroll av sintringsatmosfär, temperatur och tid eftersom zink lätt förångas och lämnar legeringen i gasform[44] eller oxideras om det finns syre i atmosfären. För att minska problematiken med avzinkning vid höga temperaturer används varmsmide där spånen tvingas ihop till ett homogent material genom en hög deformationsgrad med hög temperatur under en kort tid istället för sintring där materialet utsätts för en hög temperatur under en lång tid.



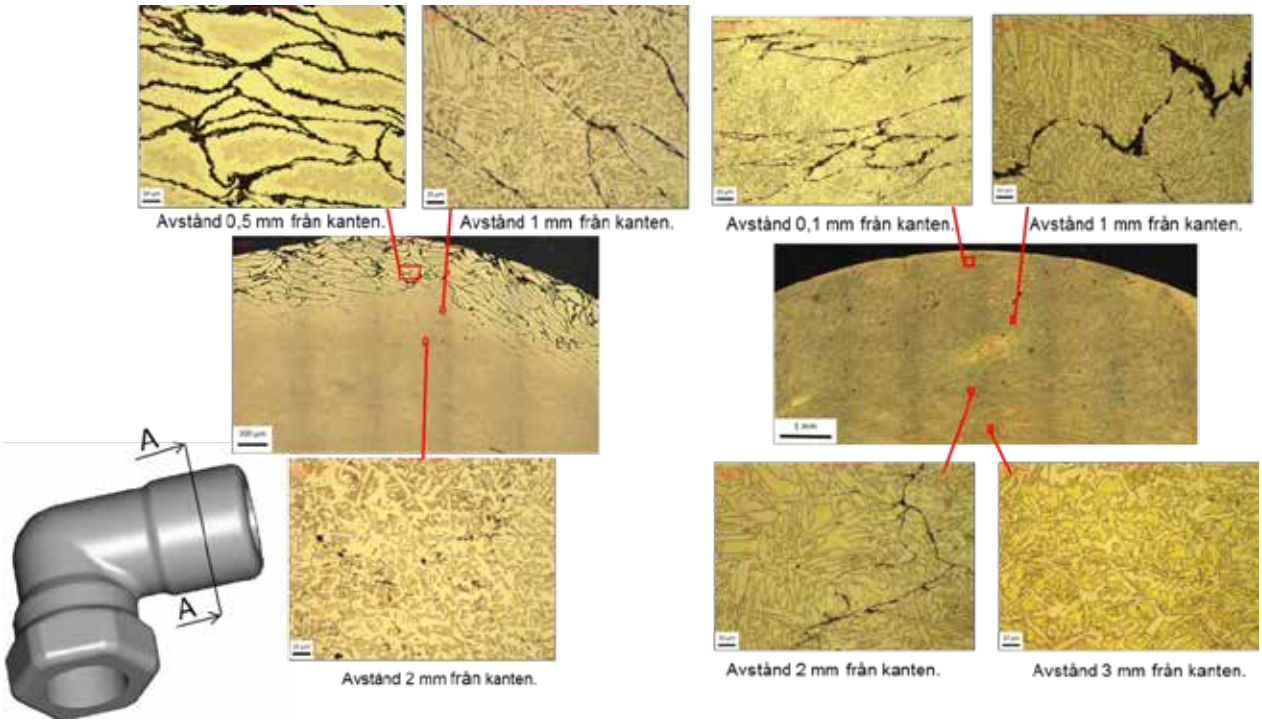
Figur 7.2: Generella processteg för spånsmide.

För att undersöka vilka processparametrar som har betydelse för spånsmidet och om det går att implementera industriellt har en metod provats där skärspån kompakteras till en cylinder med ett tryck av 800 MPa till en grönkropp. Grönkroppen smids i två steg, först till en något mindre cylinder än grönkroppen och sedan till formen av ett utgångsämne för vidare bearbetning, Figur 7.2. Spånorna som används för kompaktering kan inte vara för långa och sammanhängande, så för mer långspånande material kan krossning av spånorna vara nödvändig. Smidestemperaturen vid försöken var 750°C och geometrin som smiddes är en utgångsämnet för en 90° rörböj, Figur 7.3. Geometrin som användes för smidningen är optimerad för att minimera materialåtgång men är det möjligt att återanvända avverkat material är det möjligt att optimering av smidesgeometrin kan ske efter andra kriterier än materialminimering.



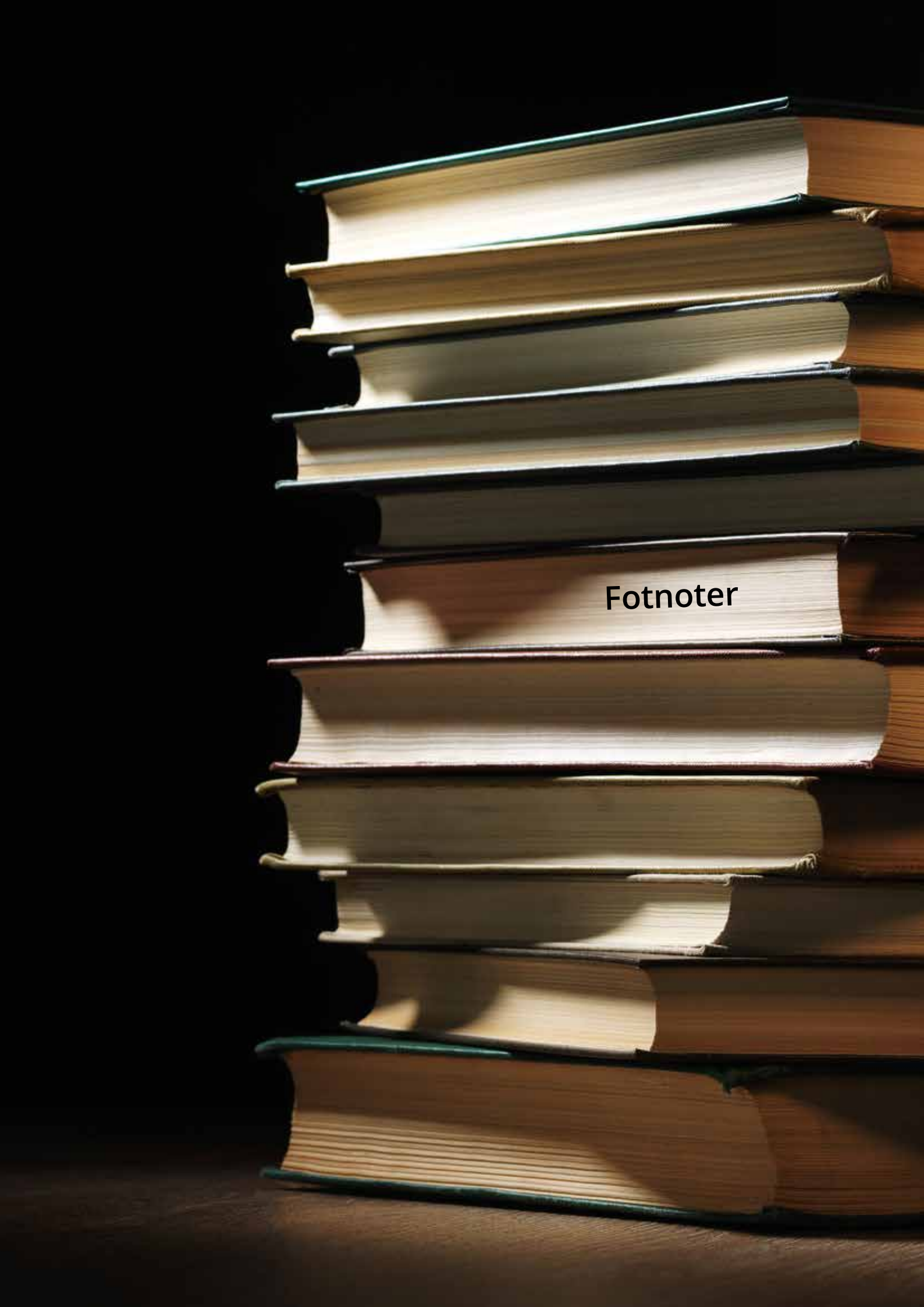
Figur 7.3: 90° rörböj som har smitts i försöken.

Efter smidningen mättes de smidda detaljernas densitet och jämfördes med råmaterialets densitet. Undersökningen visade att de spånsmidda detaljerna hade en densitet runt 99 % av råmaterialets densitet, skillnaden i densitet beror på porer i det spånsmidda materialet. Bearbetning och funktionstest av de spånsmidda detaljerna genomfördes och 63 % av de testade komponenterna klarade testet. De detaljerna som inte klarade testet brast i de skurna gängorna där minst material avlägsnats i bearbetningen. Figur 7.4 visar hur materialet blir mer homogent längre in från detaljens yttervägg och därför blir gängorna som skärs in av sämre kvalitet än önskat. En lösning på detta problem kan vara att öka utgångsämnets dimension och därmed den avverkade materialvolymen vid bearbetning.



Figur 7.4: Resultat av spånsmide av material 1 (till höger) och material 3 (till vänster) tagna i snittet A-A indikerat i Figur 7.3.

Det finns en del utvecklingsarbete kvar att göra innan spånsmidesprocessen kan implementeras industriellt men det finns även stora potentiella vinster att göra om en lyckad process kan införas, både ekonomiska och miljömässiga. De ekonomiska vinsterna kommer från en minskad mängd inköpt material och de miljömässiga från minskad mängd transporter mellan materialleverantör och producerande företag och potentiellt mindre energiåtgång i återvinningen.


Fotnoter

[1] *Brennert, S., 1993. Karlebo Materiallära. Liber Utbildning AB.*

[2] *Gane, N., 1981. The Effect of Lead on the Friction and Machining of Brass. Philosophical Magazine A 43, 545-566.*

[3] *UNEP, 2010. Final review of scientific information on lead. United Nations Environment Programme, Chemicals Branch DTIE.*

[4] *Lytle, D.A., Schock, M.R., 1996. Stagnation time, composition, ph, and orthophosphate effects on metal leaching from brass. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.*

[5] *Trent, E.M., Wright, P.K., 2000. Metal Cutting, Fourth ed. Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA, USA.*

[6] *Trent, E.M., 1988. Metal cutting and the tribology of seizure: III temperatures in metal cutting. Wear 128, 65-81.*

[7] *V. Bushlya, D. Johansson, F. Lenrick, J.-E. Ståhl, F. Schultheiss Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass, 2017, Wear, In print.*

[8] *La Fontaine, A., Keast, V.J., 2006. Compositional distributions in classical and lead-free brasses. Materials Characterization 57, 424-429.*

[9] *Li, S.F., Kondoh, K., Imai, H., Atsumi, H., 2011. Fabrication and properties of lead-free machinable brass with Ti additive by powder metallurgy. Powder Technology 205, 242-249.*

[10] *Taha, M.A., E-Mahallawy, N.A., Mousa, T.M., Hamouda, R.M., Yousef, A.F.A.G., 2012. Microstructure and castability of lead-free silicon brass alloys. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 43, 699-704.*

[11] *Buzek, J., Györi, E., 2011. Directive 2011/65/EU on restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. The European Parliament and Council, Strasbourg.*

[12] *Juncker, J.-C., 2016. Commission Directive (EU) 2016/7747 on end-of-life vehicles. European Union, Official Journal of the European Union.*

[13] *Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH.*

[14] *Smiryagin, A.P., 1956. Industrial Non-ferrous Metals and Alloys, 2nd edition, Moscow, USSR.*

[15] *Svenska miljömål – precisering av miljökvalitetsmålen och en första uppsättning etappmål, Miljödepartementet, 2012. ISBN 978-91-38-23762-5.*

[16] *Olsson, M., Bushlya, V., Zhou, J., Ståhl, J-E., 2016. Effect of feed on sub-surface deformation and yield strength of oxygen-free pitch copper in machining, 3rd CIRP Conference on Surface Integrity.*

[17] *Callister, W.D., Rethwisch D.G., 2008. Fundamentals of Materials Science and Engineering, Third Ed. John Wiley & Sons.*

[18] *Trent, E., Wright, P., 2000. Metal Cutting, Fourth edition, Butterworth-Heineman.*

[19] *Copper as electrical conductive material with above-standard performance properties, European Copper Institute, http://www.conductivity-app.org/single-article/cu-overview*

[20] *Nobel, C., Klocke, F., Lung, D., Wolf, S., 2014. Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys, 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 95-100.*

[21] *Andersson, M. Ståhl, J-E., 2007. Polar Machinability Diagram – A model to Predict the Machinability of a Work Material, Swedish Production Symposium 2007.*

[22] *Xu, L., Schultheiss F., Andersson M., Ståhl J-E., 2013. General conception of polar diagrams for the evaluation of the potential machinability of workpiece materials. International Journal of Machinability and Machinability of Materials 14, 24-44.*

[23] *Olovsjö S., Hammersberg P., Avdovic P., Ståhl J-E., Nyborg L., 2012. Methodology for evaluating effects of material characteristics on machinability—theory and statistics-based modelling applied on Alloy 718, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 59, 55-66.*

[24] *Wieland, 2017. Wieland-Z32/Z33 Machining Brass, Wieland-Werke AG, Ulm, Tyskland.*

[25] *Wieland, 2017. Wieland-SW1 CuZn21Si3P Lead-free special brass, Wieland-Werke AG, Ulm, Tyskland.*

[26] *Wieland, 2017. Wieland-M58 CuZn42 Lead-free brass, Wieland-Werke AG, Ulm, Tyskland.*

[27] *Hök, G., 1909. Om skärverktygens (svarf- och hyvelståls) rätta form, Verkstäderna, organ för Sveriges verkstadsförening, Stockholm.*

[28] *Ståhl, J.-E., Skäreggars Spontanhaverier, Doktorsavhandling vid Lunds Tekniska Högskola, Lund 1986.*

[29] *Woxén, R., 1932. Theory and an Equation for the Life of Lathe Tools, Ingenjörsvetenskapsakademin.*

[30] *Ståhl, J.-E., Schultheiss, F., Hägglund, S., 2011. Analytical and Experimental Determination of the Ra Surface Roughness during Turning, Procedia Engineering 19, 349-356.*

[31] *Schultheiss, F., Johansson, D., Bushlya, V., Zhou, J., Nilsson, K., Ståhl, J.-E., 2017. Comparative study on the machinability of lead-free brass. Journal of Cleaner Production 149, 366-377.*

[32] *Bushlya, V., Johansson, D., Lenrick, F., Ståhl, J.-E., Schultheiss, F., 2017. Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass, Wear.*

[33] *Gillespie, L., K., 1973. The Formation and Properties of Machining Burrs. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 4558, Utah State University.*

[34] *Gillespie, L., K., Blotter, P., T., 1976. The Formation and Properties of Machining Burrs, J. Eng. Ind. 98(1), 66-74.*

[35] *Ståhl J-E. Industriella tillverkningssystem del II – Länken mellan teknik och ekonomi, Lund 2016.*

[36] *Laakso, S.V.A., Hokka, M., Niemi, E., Kuokkala, V.-T., 2013. Investigation of the effect of different cutting parameters on chip formation of low-lead brass with experiments and simulations, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 227. doi:10.1177/0954405413492732*

[37] *Laakso, S.V.A., Niemi E., 2016. Modified Johnson-Cook flow stress model with thermal softening damping for finite element modeling of cutting, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 230. doi:10.1177/0954405415619873*

[38] *Brundtland, G.H., 1987. Our Common Future, World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford, UK.*

[39] *UNCED, 1992. Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development. United Nations, New York, USA.*

[40] *Jovane, F., Yoshikawa, H., Alting, L., Boer, C.R., Westkamper, E., Williams, D., Tseng, M., Seliger, G., Paci, A.M., 2008. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. Cirp. Ann-Manuf. Techn. 57, 641–659.*

[41] *Ståhl, J.-E., 2013. Development of Manufacturing Systems – The link between technology and economics, Division of Production and Materials Engineering, Lund University, Lund, Sweden.*

[42] *Ståhl, J.-E., 2017. Industriella Tillverkningssystem Del 1 – Material och tillverkningsmetoder, Avdelningen för Industriell Produktion, Lunds universitets.*

[43] *Nakagawa, T., Tanaka, T., Amano, T, 1978. Powder forging of high-strength brass and its applications to automotive parts, Journal of Mechanical Working Technology, 2, pp. 179-195.*

[44] *Philip, P., Basherkutty, B., 1991. Reclamation of metal cutting brass chips using powder metallurgy, Powder Metallurgy 34, 45-52.*

Plats för egna anteckningar

Blyfria kopparlegeringar i
komponenter och produkter.

Med stöd från:

VINNOVA

Energimyndigheten

FORMAS

STRATEGISKA INNOVATIONS-PROGRAM

PRODUKTION2030