



**LUND UNIVERSITY**  
Lund Institute of Technology

# Analys av blyfria legeringar för glidlagertillämpningar

Niklas Nyberg

2016

Industriell Produktion LTH

Lunds universitet

© Copyright Niklas Nyberg

Lunds Tekniska högskola Lunds universitet Box 118 221 00 Lund

LTH School of Engineering Lund University Box 118 SE-221 00 Lund

Sweden

Tryckt i Sverige Media-Tryck Biblioteksdirektionen Lunds universitet Lund  
2016

# Förord

Examensarbetet genomfördes på institutionen Industriell Produktion LTH, Lunds universitet. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och genomförs som avslutning på civilingenjörsutbildningen i Maskinteknik.

Examensarbetet är en del av ett forskningsprojekt mellan Lunds universitet och Sandvik SRP i Svedala. Forskningsprojektet är finansierat av Vinnova via SIO Produktion 2030.

Ett särskilt tack riktas till följande personer som har bistått med vägledning och bidragit med värdefulla kunskaper genom arbetets gång.

- TeknD. Per Svedensten, Manager Crushing Chambers and Materials Development, Sandvik SRP.
- Professor Jan-Eric Ståhl, Industriell Produktion LTH, Lunds universitet.
- TeknD. Fredrik Schultheiss, Industriell Produktion LTH, Lunds universitet.
- TeknD. Lanny Kirkhorn, Industriell Produktion LTH, Lunds universitet.
- Patrik Sjöberg, Development Engineer, Sandvik SRP.

Jag vill även tacka alla trevliga medarbetare på Sandvik SRP som har tagit sig tid och svarat på mina frågor och varit hjälpsamma.

Lund mars 2016,

Niklas Nyberg



# Sammanfattning

Examensarbetet utfördes åt Sandvik SRP i samarbete med institutionen Industriell Produktion vid LTH Lunds Universitet. Arbetet ingår i ett större forskningsprojekt med titeln ”Blyfria kopparlegeringar” finansierat av Vinnova inom ramen för SIO Produktion 2030. I arbetet undersöks blyfria legeringar som skall kunna användas för att ersätta dagens legering som innehåller 10 % bly. Legeringen används till glidlager i bland annat stenkrossar. Motivet för att göra sig av med bly i legeringen är för att bly är en giftig metall som ger negativa hälsoeffekter för de som exponeras för metallen.

Målet med det här projektet är att ge ett underlag för valet av ett nytt lagermaterial. Därmed genomfördes friktion- och slitagetester på fem stycken olika legeringar. Testerna genomfördes i en testmaskin som har utvecklats vid institutionen Industriell Produktion. Metodiken vid testerna beskrevs så utförligt att nya testerna skall kunna utföras om ett nytt intressant material hittas vid fortsatta studier på området.

Rapporten inleds med ett teorikapitel som beskriver friktion- och nötningsteori. Det ger en förståelse för ämnesområdet, samt så utgör det grunden för metodvalen vid laborationerna. Därefter beskrivs olika legeringar och olika glidlagermaterial, för att ge en bild av vad som finns på marknaden och vad som används i andra glidlagerkonstruktioner.

I arbetet analyseras glidlagerkonstruktionen för att det skall kunna ställas upp krav på lagermaterialet och för att dess funktion skall tydliggöras. Problem som kan uppstå för det nuvarande materialet beskrivs för att ge en bild av vad som är viktigt vid valet av ett nytt material. De viktigaste materialparametrar för ett nytt lagermaterial rangordnas därefter och förklaras.

Förslag till förbättringar av glidlagerkonstruktionen görs även i rapporten i med att konstruktionens utformning är avgörande för vilket material som kan användas. Det här är främst på grund av att om smörjningen förbättras behöver lagermaterialet inte ha lika bra torrfriktions egenskaper och då är det lättare att göra sig oberoende av blyet.

Resultatet av friktions- och slitagetesterna för kopparlegeringen innehållandes vismut visar på att legeringen är intressant gå vidare med och därmed är lämplig för att prova i en fullskalig prototyp under verkliga förhållanden.



# Abstract

The master thesis was carried out for Sandvik SRP in cooperation with the division of Production and Materials Engineering at the Faculty of Engineering at Lund University. This thesis is part of a larger research project with the title "Blyfria kopparlegeringar" funded by Vinnova within SIO Produktion 2030. Lead-free bearing-materials, which could be used to replace the current bearing-material containing 10 % lead, are studied in this thesis. The bearing-material is used as plain-bearings in stone crushers and other applications. The reason to get rid of lead in the bearing-material is because lead is a very toxic metal.

This project strives to form a foundation for the choice of a new bearing-material. Therefore friction- and wear tests were performed for five different alloys. The tests were performed in a machine, which has been developed by the division of Production and Materials Engineering. The test methodologies are described accurately so that new tests should be able to be performed if a new interesting material is found during further studies.

The friction- and wear chapter gives an understanding for the field and it is the foundation for the choice of methods during the laboratory work. Different alloys and bearing-materials are described to show what alternatives there are on the market and which materials that are used in plain-bearing constructions.

The bearing construction is analysed with the purpose of establishing requirements of the bearing-material, and to identify its function. Potential problems, which can occur with the current material, are described to give an understanding of what is important when a new material is going to be selected. The most important material parameters are also ranked and explained.

Proposals of improvements of the bearing construction are made, since the construction design is crucial for what materials that can be used. This is mainly because if the lubrication is improved, the bearing material does not need to have as good dry-friction properties, and then it is easier to get rid of the lead.

The result of the friction- and wear tests for the copper-based alloy containing bismuth indicates that the alloy is an option and is suitable for testing in a full-size prototype during real conditions.



## Innehållsförteckning

|                                                         |          |
|---------------------------------------------------------|----------|
| <b>1 INLEDNING .....</b>                                | <b>1</b> |
| 1.1 BAKGRUND.....                                       | 1        |
| 1.2 PROBLEMFORMULERING .....                            | 1        |
| 1.3 SYFTE .....                                         | 2        |
| 1.4 AVGRÄNSNINGAR .....                                 | 2        |
| 1.5 INTRODUKTION AV SANDVIK AB .....                    | 2        |
| 1.6 METOD.....                                          | 3        |
| 1.6.1 Arbetsgång .....                                  | 3        |
| 1.6.2 Metodik .....                                     | 3        |
| <b>2 TEORI .....</b>                                    | <b>5</b> |
| 2.1 GLIDLAGERS FUNKTION .....                           | 5        |
| 2.1.1 PV-värde .....                                    | 6        |
| 2.2 SMÖRJNING .....                                     | 6        |
| 2.2.1 Stribeck teori .....                              | 7        |
| 2.3 FRIKTION.....                                       | 8        |
| 2.3.1 Generella friktionslagar .....                    | 10       |
| 2.3.2 Ytfinhet och hårdhets inverkan på friktion.....   | 10       |
| 2.3.3 Friktionstest.....                                | 10       |
| 2.4 YTSKADOR.....                                       | 11       |
| 2.4.1 Nötning .....                                     | 12       |
| 2.4.1.1 Nötningens faser .....                          | 12       |
| 2.4.1.2 Beräkning av nötning .....                      | 13       |
| 2.4.1.3 Nötning i glidande kontakt.....                 | 14       |
| 2.4.2 Tribokemiska mekanismer .....                     | 14       |
| 2.4.2.1 Friktionsuppvärmning .....                      | 15       |
| 2.4.2.2 Direkt mekanisk stimulering av reaktioner ..... | 15       |
| 2.4.2.3 Materialtransformationer.....                   | 15       |
| 2.4.3 Utmattningsnötning .....                          | 15       |
| 2.4.3.1 Kontaktutmattningsnötning .....                 | 15       |
| 2.4.3.2 Termomekanisk utmattningsnötning .....          | 16       |
| 2.4.3.3 Delaminationsnötning.....                       | 16       |
| 2.4.3.4 Frettningsnötning.....                          | 16       |
| 2.4.4 Atomär nötning.....                               | 16       |
| 2.4.5 Abrasiv nötning.....                              | 17       |
| 2.4.6 Nötningens tidsfaser .....                        | 17       |
| 2.4.7 Nötningstest av stål mot mässing.....             | 18       |
| 2.5 LEGERINGAR OCH LEGERINGSÄMNEN.....                  | 19       |
| 2.5.1 Giftiga metaller som används i legeringar .....   | 20       |
| 2.5.2 Självsmörjande lager .....                        | 21       |
| 2.5.3 Ytskikt, Teflon, PTFE.....                        | 21       |
| 2.5.4 Vismut i legeringar .....                         | 21       |
| 2.5.5 Material inom forskning ZAS35.....                | 23       |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6 GJUTNING .....                                      | 24        |
| 2.6.1 Sandgjutning .....                                | 24        |
| 2.6.2 Stränggjutning .....                              | 24        |
| 2.6.3 Gjutdefekter .....                                | 24        |
| <b>3. NULÄGESANALYS .....</b>                           | <b>27</b> |
| 3.1 BESKRIVNING AV GLIDLAGRET .....                     | 27        |
| 3.2 TILLVERKNING AV LAGERDELARNA .....                  | 29        |
| 3.3 PROBLEMBESKRIVNING AV GLIDLAGRET .....              | 29        |
| 3.4 KRAV PÅ LAGERMATERIALET .....                       | 34        |
| 3.5 BLYHANTERING HOS SANDVIK .....                      | 36        |
| <b>4 EXPERIMENTELLA STUDIER .....</b>                   | <b>37</b> |
| 4.1 BESKRIVNING AV LEGERINGAR SOM SKALL PROVAS .....    | 37        |
| 4.1.1 <i>Motgående material.</i> .....                  | 38        |
| 4.2 SYFTE MED TESTERNA .....                            | 38        |
| 4.3 BESKRIVNING AV TESTUTRUSTNING .....                 | 38        |
| 4.3.1 <i>Alicona</i> .....                              | 38        |
| 4.3.2 <i>Tribotester</i> .....                          | 39        |
| 4.4 BESKRIVNING OCH MOTIVERING AV TESTPARAMETRAR .....  | 40        |
| 4.4.1 <i>Friktion</i> .....                             | 40        |
| 4.4.2 <i>Nötning</i> .....                              | 42        |
| 4.5 KOMMENTARER ANGÅENDE METODIKEN VID TESTNING .....   | 42        |
| 4.5.1 <i>Friktion</i> .....                             | 42        |
| 4.5.2 <i>Nötning</i> .....                              | 42        |
| 4.5.3 <i>Felkällor</i> .....                            | 42        |
| <b>KAP 5. RESULTAT .....</b>                            | <b>45</b> |
| 5.1 FRIKTION .....                                      | 45        |
| 5.2 NÖTNING .....                                       | 49        |
| 5.2.1 <i>Provbitarnas ytor efter nötningstest</i> ..... | 50        |
| <b>6. ANALYS OCH DISKUSSION .....</b>                   | <b>51</b> |
| 6.1 ANALYS AV TESTRESULTATEN .....                      | 51        |
| 6.2 ANALYS AV KONSTRUKTIONEN .....                      | 53        |
| 6.3 ANALYS AV OLÄMPLIGA MATERIAL .....                  | 54        |
| 6.4 ÖVRIGT .....                                        | 55        |
| <b>KAP 7. SLUTSATS .....</b>                            | <b>57</b> |
| 7.1 REKOMMENDATION .....                                | 57        |
| 7.2 SLUTSATS .....                                      | 57        |
| 7.3 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE .....                  | 58        |
| <b>8 REFERENSER .....</b>                               | <b>61</b> |
| <b>9 BILAGOR .....</b>                                  | <b>63</b> |
| BILAGA A .....                                          | 63        |
| BILAGA B .....                                          | 67        |

# 1 Inledning

*I inledningen beskrivs bakgrunden till examensarbetet, dess syfte och avgränsningar i projektet. Därefter ges en kort beskrivning av företaget och metoden under examensarbetet beskrivs.*

## 1.1 Bakgrund

Det här projektet går ut på att undersöka blyfria legeringar som skall kunna användas i glidlager i svåra miljöer. Projektet är ett samarbete mellan Sandvik SRP och institutionen Industriell Produktion. Det är på grund av blyets skadliga hälsoeffekter och på grund av att restriktioner för användning av bly i lagermetaller kan komma att införas inom en snar framtid som det här projektet utförs. Personer som arbetar med bearbetning av material som innehåller bly får förhöjda blyhalter i blodet vilket kan resultera i hjärnskador.

I nuläget finns det EU-direktiv som begränsar mängden bly i de flesta olika material och konstruktioner. Lagermetaller är dock undantagna från de här direktiven vilket gör att blymängden i lagermetaller inte begränsas i nuläget. Undantagen för lagermetaller kan försvinna i framtiden och då kommer användning av bly att bli dyrare och mer begränsat.

Inom bilindustrin finns det restriktioner som begränsar blyanvändningen och det har bedrivits forskning och utveckling för att hitta blyfria lagermetaller till olika glidapplikationerna i bilar och motorer. Kraven på lagermetaller för bilar och kraven på lagermetaller för Sandviks applikation skiljer sig väldigt mycket åt. Det här gör att resultaten från den utvecklingen inte går att använda för den här tillämpningen.

Sandvik jobbar aktivt med miljö-, hälsa- och hållbarhetsfrågor både internt och extern vilket gör att de är intresserade av att undersöka om det går att göra sig oberoende av skadliga tungmetaller.

## 1.2 Problemformulering

För att kunna ta fram ett nytt lagermaterial så behöver kraven på det nuvarande materialet fastställas. Konstruktionen som lagret sitter i behöver även analyseras för att skapa en förståelse för vilka lagertyper som är möjliga att använda i konstruktionen. Glidlagret som studeras i det här projektet saknar fullfilmssmörjning vilket gör att lagermaterialet måste ha bra friktionsegenskaper för att lagret skall fungera. Friktion är en svårbestämd materialparameter i med att den beror på väldigt många olika faktorer. Det här gör att friktionskoefficienten för ett material varierar beroende på vilken miljö materialet befinner sig i. Därav uppkommer behovet av att fastställa friktionskoefficienten för intressanta blyfria material ge-

nom laborationer. Utan laborationer går det inte att jämföra materialen med varandra med avseende på friktion och slitagemotstånd.

### **1.3 Syfte**

Syfte med den här rapporten är att skapa ett underlag för valet av ett blyfritt lagermaterial.

### **1.4 Avgränsningar**

I rapporten görs följande avgränsningar:

- Valet av smörjmedel och smörjningens funktion studeras inte.
- Utformningen av tryckplattorna och dess inverkan på smörjningen studeras inte.
- Legeringar som innehåller en större mängd giftiga ämnen studeras inte.
- Lagermetaller som är betydligt dyrare än dagens material undersöks inte i laborationer utan nämns endast i rapporten.

### **1.5 Introduktion av Sandvik AB**

Sandvik grundades 1862 och har sin huvudfabrik i Sandviken men har sedan en tid tillbaka sitt huvudkontor i Stockholm. Sandvikkoncernen har cirka 47 000 anställda och omsätter cirka 89 miljarder sek. Sandvik AB är indelat i de fem olika affärsområden; Sandvik Mining, Sandvik Machining Solutions, Sandvik Materials Technology, Sandvik Construction och Sandvik Venture [1].

Det här examensarbetet utfördes för Sandvik SRP (Sandvik Rock Processing) AB i Svedala. I Sandvik SRP:s fabrik i Svedala tillverkas huvudsakligen stenkrossar och glidlagret som har studerats i rapporten sitter i en stenkross av typen konkross. Sandvik SRP i Svedala tillhör affärsområdet Sandvik Mining och affärsområdet Sandvik Construction. Sandvik Mining är en ledande leverantör av utrustning, verktyg och tjänster till gruvindustrin. Företaget erbjuder lösningar inom borrhning både under och ovanför marken, stenkrossning, skärning och hantering av sten, materialhanteringslösningar, utrustning för användning i gruvor som till exempel specialfordon för transporter under jord. Sandvik Construction är det affärsområde som har minst antal personer anställda. Sandvik Construction specialiserar sig på utrustningar, verktyg och tjänster inom brytning, borrhning och krossning i anläggningsindustrin. Utrustningen används till exempel vid tunnelbyggen, borrhning, brytning av sten, återvinning, rivning och olika byggnadsprojekt [2].

## 1.6 Metod

### 1.6.1 Arbetsgång

Projektet genomfördes i följande faser.

- Projektuppbyggnad
- Litteraturstudie
- Intervjuer
- Beställning av material
- Insamling av experimentell data
- Analys av experimentella resultat
- Slutsats och förslag till fortsatt arbete

### 1.6.2 Metodik

Projektet inleddes med diskussion med Professor Jan-Eric Ståhl om projektets mål. Därefter diskuterades genomförande av projektet med TeknD. Fredrik Schultheiss. Intervju och diskussion fördes med TeknD. Per Svedensten på Sandvik för att fastställa vilka mål Sandvik har med projektet och för att fastställa glidlagrets funktion. Därefter diskuterades laborationstester med TeknD. Lanny Kirkhorn. Diskussionerna följdes upp med en litteraturstudie där friktions och slitage teori studerades. Litteraturstudien genomfördes för att skapa ett underlag till problemförståelsen och för valet av provmaterial. Intervju med leverantör av glidlagret samt personal som har kunskap om lagret genomfördes löpande för att få fram information och för att besvara frågeställningar som väcks efter hand. De löpande intervjuerna var semistrukturerade intervjuer [3].

Då en intressant legering hittades undersöktes de ingående komponenter i legeringen för att ta reda på fall något av ämnena var toxiska. Innehåller legeringen toxiska legeringsämnen så finns det ingen anledning att gå vidare med undersökningen av materialen. Legeringar eller glidlagerkomponenter som har ett en hög kostnad per livstid har uteslutits från listan över material som var intressanta att beställa hem för att testas.

Ytfinheten för de material som testas undersöktes i ett ljusmikroskop av typen Alicona i verkstaden vid institutionen Industriell Produktion. Friktions och slitagetesterna utfördes i verkstaden vid institutionen Industriell Produktion. Testerna utfördes på maskinen Tribotester som är en egenutvecklad testmaskin. Vid laborationerna testades först legeringen som används i nuläget för att fastställa dess materialparametrar och för att ta fram referensvärden. Därefter testades 4 olika andra legeringar som kan anses vara lämpliga ersättningsmaterial och som gick att beställa till ett rimligt pris. Friktion- och slitagetesterna utformades för att vara så lik den verkliga miljön i stenkrossen som möjligt och testparametrarna valdes för att efterlikna den verkliga miljön. Metodiken vid laborationsmomenten beskrivs utförligt i kapitel 4.



## 2 Teori

*I det här kapitlet redovisas teori som fungerar som underlag för analysen och för utformning av testerna. Teorin har inhämtats från litteratur, forskningsartiklar, material som publicerats av tillverkare inom branschen. Kapitlet har som syfte att ge läsaren en förståelse för komplexiteten inom friktion- och nötningsområdet.*

### 2.1 Glidlagers funktion

Ett glidlager består av två delar som antingen är i kontakt eller separeras av en oljefilm eller en blandning av de två fallen. De två delarna har en hastighet mellan sig. Delarnas utformning varierar mycket och glidlager finns i flera olika utseenden och tillämpningar.

Glidlager kan delas in i fyra olika typer:

- Enkla osmorda glidlager
- Enkla smorda glidlager, ofta med blandfilmssmörjning
- Fullfilmssmorda glidlager
- Hydrostatiska glidlager

Smörjningen har en väldigt stor inverkan på valet av lagermaterial i ett glidlager. Vid en väl fungerande smörjning behöver inte hänsyn tas till friktionstalet för materialet som skall användas i lagret. Det ger stora valmöjligheter vid valet av material som då kan väljas efter någon annan materialparameter än friktionen. Glidhastigheten och trycket avgör vilken typ av smörjning som är möjlig att använda i glidlagret [4].

Glidlager har ersatts av rullager i många applikationer, men de två olika lagertyperna har för- och nackdelar som är viktiga att känna till vid valet av lagertyp.

Glidlagers fördelar mot rullningslager är [5]:

- Skadas ej av vibrationer utan har en dämpande inverkan på vibrationer
- Fungerar bra för pendelrörelser
- Korrosionsbeständiga
- God inbäddningsförmåga av främmande partiklar
- Låg kostnad
- Tål höga temperaturer

Glidlagers nackdelar mot rullningslager är [5]:

- Kräver oftast en bra smörjning, vilket kan vara svårt att uppnå
- Högre friktion
- Hög startfriktion

### 2.1.1 PV-värde

PV-värdet är glidhastigheten  $V$  multiplicerat med lagerbelastningen  $P$  och används som ett riktvärde vid konstruktion av glidlager. Legeringar har ett rekommenderat max PV-värde och värdet påverkar vilken legering som väljs till en konstruktion. PV-värdet fungerar endast som ett grovt riktvärde då legeringar fungerar olika bra vid hög last respektive hög hastighet, men PV-värdet tar inte hänsyn till fall det är hastigheten eller belastningen som är hög. Överstigs PV-värdet så slits materialet mycket, och materialet riskerar att haverera på grund av den höga nötningsstakten eller för att det mjuknar på grund av värmeutvecklingen [5].

## 2.2 Smörjning

Smörjning av glidlager kan uppnås på två olika sätt antingen hydrodynamiskt eller hydrostatiskt. Lager där tryckolja pumpas in för att skapa en bärande smörjfilm kallas hydrostatiskt lager och lager som smörjs genom att de roterar med hög hastighet kallas hydrodynamiskt smorda lager. Smörjning delas in i tre olika typfall, blandfilmssmörjning, gränsskiktssmörjning och fullfilmssmörjning.

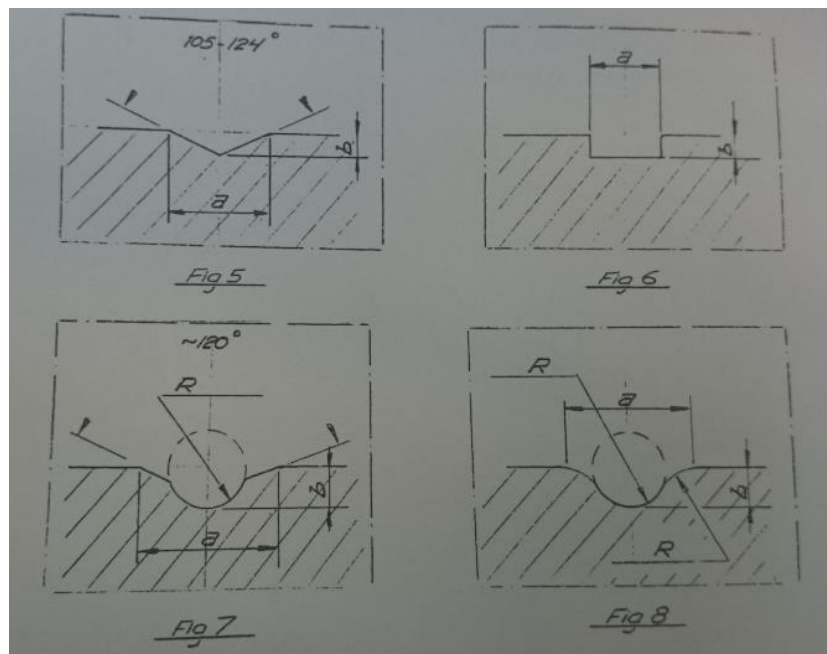
Blandfilmssmörjning definieras som att delar av lagerlasterna tas upp direkt av lagerytorna och resten av lagerlasten tas upp av trycket från oljefilmen. Blandfilmssmörjning innebär att de glidande ytorna har tillfällig metall mot metall kontakter, vilket resulterar i ett slitage av ytorna.

Gränsskiktssmörjning påminner om blandfilmssmörjning och gränsskiktssmörjningen är det de molekylära krafterna som skapar smörjningen genom att smörjmedelsmolekylerna fastnar i metallytorna och på så sätt skapar ett avstånd mellan de olika lagerytorna. Används en fet olja, eller till exempel en mineralolja uppstår fenomenet att vid temperaturer i oljefilmen under 150 grader så täcks metallytorna av molekyler som hålls kvar av elektrostatiske krafter. Molekylerna medför att metallytorna i lagret ej får direktkontakt med varandra.

Vid fullfilmssmörjning utvecklas ett sådant högt tryck i smörjfilmen att ytorna separeras helt och hållet och skiljs åt av en bärande oljefilm. De enda friktionskrafterna vid fullfilmssmörjning är de som uppkommer av de viskösa krafterna i smörjfilmen. Fullfilmssmörjning är svårt att uppnå vid höga tryck och låga glidhastigheter. I många fall tros det att smörjningen är fullfilmssmörjning när den i själva verket är blandfilmssmörjning. Det är särskilt vanligt vid start och stop av komponenter som smörjs hydrodynamiskt. Vid fullfilmssmörjning sker i princip inget slitage av metallytor [6].

En smörjolja viskositet, det vill säga hur trögflytande oljan är avgör oljans lastbärande förmåga. En högre viskositet medför en högre bärförmåga men även en högre friktion och en högre värmeutveckling. Glidhastigheten och temperaturen påverkar valet av olja, vid höga glidhastigheter förbättras oljefilmsuppbyggnaden och en tunnare olja kan väljas. Oljor blir generellt mer lättflytande vid höga temperaturer vilket leder till att bärigheten sjunker [7].

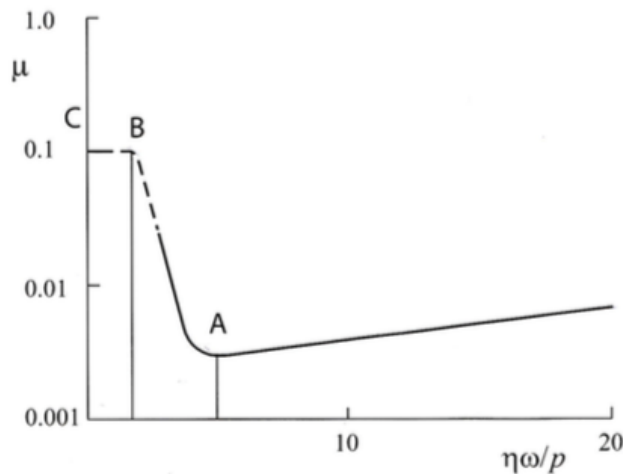
Smörjspåren har en stor betydelse för hur bra smörjningen blir. En av de viktigaste detaljerna med smörjspåren är gradningen vid övergången mellan glidytan och spåret. Saknas gradning eller om den är bristfällig så skadas smörjfilmen och tryckuppbyggnaden i smörjfilmen försvåras. En försämrad smörjfilm resulterar i att friktionen och slitaget ökar vilket förkortar livslängden på lagret [8]. I Figur 1 syns fyra förslag på hur gradning av smörjspåren kan se ut. Utförandet som benämns Fig 6 används som transportspår i lager eller lagerhus.



**Figur 1** - Skiss över smörjspår [8].

### 2.2.1 Stribeck teori.

Stribeck diagram används för att beskriva förhållandet mellan friktion och hastigheten med hänsyn till trycket. Diagrammet kan ritas upp på olika sätt men principen är densamma för de olika diagrammen. Figur 2 är ett exempel på ett Stribeck diagram. På y-axeln i diagrammet är friktionskoefficienten  $\mu$ . På x-axeln finns den dimensionslösa gruppen  $\eta\omega/p$ .  $\eta$  står för viskositeten,  $\omega$  står för rotationsvinkelhastigheten och  $p$  står för medeltrycket i lagret.



**Figur 2 - Stribeck diagram [6].**

Till höger om punkten A är smörjningen fullt hydrodynamisk. Friktionen ökar höger om punkten A i diagrammet och det beror på att skjuvspänningarna i oljan ökar då hastigheten ökar.

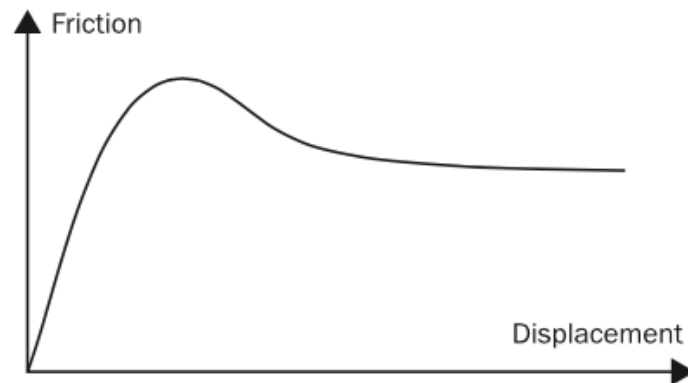
Mellan punkt B och A råder blandfilmssmörjning. Mellan punkten B och A så är den lägsta friktionen närmast A och den högsta friktionen närmast B. För att minska friktionen vid en blandfilmssmörjning det vill säga att fallet ligger mellan punkt B och A så kan vinkelhastigheten eller viskositeten ökas, eller lasten minskas.

Mellan punkten C och B tas all last upp av gränsskiktet eller metallkontaktarna. Enligt Stribeck diagrammen sänks friktionen om hastigheten ökas, fram till dess att fullfilmssmörjning är uppnådd [6].

## 2.3 Friktion

Friktionskoefficienten  $\mu$  är inte en materialparameter utan den är en systemparameter som beror på många olika parametrar. Det här gör att det inte går att ange ett generell friktionsvärde för ett material.

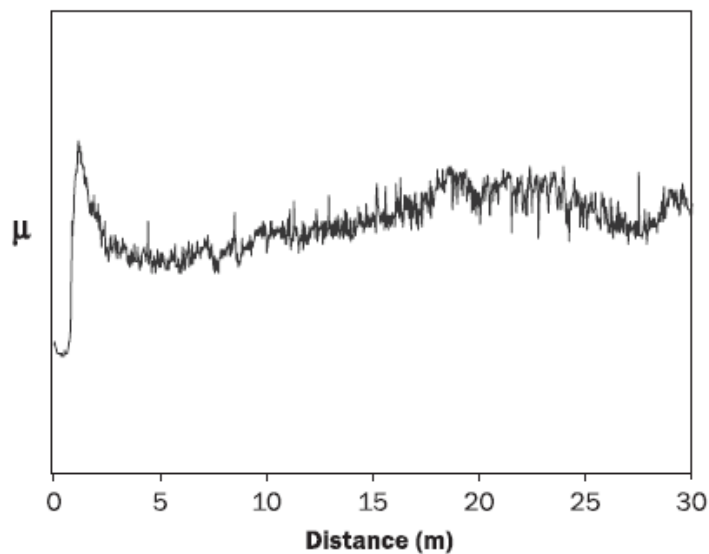
Friktion kan delas upp i vilofriktion  $\mu_v$  och glidfriktion  $\mu_g$ . Vilofriktionen avgör ifall glidning sker. Då friktionskraften  $F$  är mindre än vilofriktionen multiplicerat med normalkraften så sker ingen glidning.  $F < \mu_v \cdot N$  - ingen glidning. När glidning sker sjunker friktionstalet till ett lägre värde vilket kallas för glidfriktionstalet  $\mu_g$ . Formeln  $F = \mu_g \cdot N$  gäller under glidning. I Figur 3 syns ett exempel hur en friktionskurva kan se ut då ett material går från obelastad till att materialet rör sig. Då toppen i friktionskurvan passeras rör sig materialet vilket innebär att friktionen övergår från vilofriktion till glidfriktion [12].



**Figur 3** - Vilo- och glidfriktion [12].

Att vilofriktionen och glidfriktionen är olika ger upphov till fenomenet stick-slip. Stick-slip fenomenet är att när friktionstalet sjunker på grund av glidning så accelererar kroppen på grund av det kraftöverskottet som uppstår då friktionskraften sjunker. Stick-slip fenomenet ger upphov till oönskade vibrationer och oljud på grund av att materialet som är i kontakt med varandra växlar mellan att glida och att stå stilla. Drar man ett bord längs marken så märker man stick-slip fenomenet väldigt tydligt genom att benen skakar. I vissa musikinstrument utnyttjas fenomenet för att skapa toner [4].

Vid friktionsförsök fås oftast ojämna kurvor då de glidande ytor ofta uppvisar fenomenet Stick and slip. I Figur 4 syns en pendlande friktionskraft som beror på stick-slip fenomenet [12].



**Figur 4** - Friktionskurva med stick-slip beteende [12].

### 2.3.1 Generella friktionslagar

Inom friktionsteorin finns följande tre grundlagar.

Den första lagen lyder: Friktionskraften för en belastad yta är proportionell mot normalkraften. Det vill säga kraften ( $F$ ) att dra en belastad yta är proportionell mot tyngden av föremålet ( $N$ ).  $F = \mu \times N$  där  $\mu$  är friktionskoefficienten.

Den andra friktionslagen lyder: Friktionskraften är oberoende av kontaktytan.

Den tredje friktionslagen lyder: Kinetisk friktion är oberoende av glidhastigheten, vilket är en approximation.

Grundlagarna har visat sig vara förenklingar och stämmer ej i alla fall då friktion är ett väldigt komplext fenomen. Lagarna är utformade för friktionsfall då smörjmedel saknas [10]. De två första lagarna fungerar dock ganska bra för metaller men dåligt för polymerer. Den tredje lagen är den som stämmer sämst och det är för att den inte tar hänsyn till att vilofriktionen och glidfriktionen är olika [11].

### 2.3.2 Ytfinhet och hårdhets inverkan på friktion

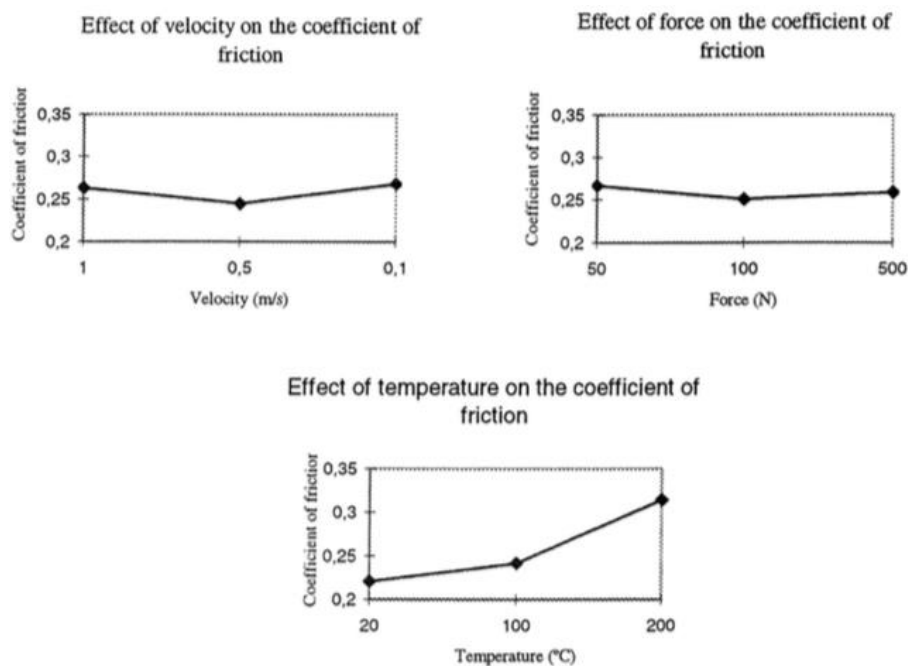
Det råder delade meningar om hur ytfinheten påverkar friktionen, en del rekommenderar en högre ytfinhet med andra rekommenderar en lägre ytfinhet. Att det råder delade mening om ytfinheten beror troligtvis på att dess påverkan varierar från fall till fall och det ej går säga något generellt för dess påverkan.

I en del fall minskar torrfriktionen med högre ytfinhet, på grund av att det är färre asperittoppar ju finare materialet är. Vid fullfilmssmörjning kan friktionen minska då ytfinhet blir högre på grund av att ojämnheter i ytan kan störa strömningen. Vid blandfilmssmörjning så motiveras valet av en lägre ytfinhet med att smörjoljan lättare stannar kvar på ytan då den fastar i ojämnheter.

Vid torrfriktion så sjunker friktionen ju lägre hårdhet som väljs för ett material. Dock ökar generellt friktionen om två mjuka material väljs. Vid fullfilmssmörjning påverkas inte friktionen av hårdheten på materialet [11].

### 2.3.3 Friktionstest

I artikeln "An experimental study of the tribological behavior of the brass and steel pair" genomförs friktionstester med mässing (70-30) och stål Ck-45-DIN. Testerna genomförs i en pin-on-disc maskin utan tillförsel av smörjmedel. De här testerna ger värden som är specifika för det här stålet och mässingen men resultaten ger en bild av hur temperatur, hastighet och last kan påverka friktionen. Slutsatserna som dras i artikeln är att hastighet och lasten har en påverkan på friktionskoefficienten och att temperaturen har en väldigt stor inverkan på friktionskoefficienten. Slutsatsen dras även i artikeln att friktion inte har ett lineärt beteende. I Figur 5 ses hur friktionskoefficienten påverkas av temperaturen, hastigheten och trycket under testerna [9].



**Figur 5** - Last, hastighet och temperaturens påverkan på friktionskoefficienten [9].

## 2.4 Ytskador

En ytskada klassas som att det har skett förändringar i, materialets form, i materialets ursprungliga mikrostruktur, i materialsammansättningen eller i yttopografien. Ytskador kan uppstå på många olika sätt men de kan delas in i tre huvudkategorier:

- Ytskador utan materialutbyte
- Ytskador med materialförlust
- Ytskador med materialvinst

Ytskador utan materialutbyte, kan orsakas genom mekanisk eller termisk påverkan som ger upphov till strukturförändringar i materialet. Plastisk deformation kan ge upphov till den här typen av ytskada och då finns det en kvarstående deformation av ytskiktet vilken även kan vara utbredd och vara visuellt synbar. Krackelering eller så kallade ytsprickor tillhör också den här kategorin av ytskador. Sprickorna kan orsakas av höga lokala kontaktpänningar eller av cykliskt varierande termomekaniska spänningar. Sprickorna är ofta täta parallella sprickor eller nätverksformade sprickor.

Nötning tillhör kategorin ytskador med materialförlust och innebär att det sker en materialförlust från en yta. Materialförlusten lämnar oftast märken eller spår efter sig.

Ytskador med materialvinst kan orsakas av mekanismer som fastkletning, inbäddning av lösa partiklar, överföring av partiklar från en yta till den andra. Materialvinst kan även uppnås genom tribokemiska reaktioner det vill säga att molekyler från omgivningen eller motsatt material reagerar med ytan. Oxidation är ett exempel på en vanlig tribokemisk reaktion [7].

### **2.4.1 Nötning**

Nötningsmekanismer är inte standardiserade med avseende på namn och uppfattningarna om vad som orsakar nötning skiljer sig åt. En anledning till att namngivning av nötningsmekanismer inte är standardiserad är för att olika branscher har gett egna namn på samma nötningsmekanism. Många mekanismer namngavs även innan vetenskapliga undersökningarna av nötningsfenomen påbörjades. Det har gjort att kategoriseringen av nötning påbörjades innan nötningsskador studerades i kraftig förstoring [7].

#### **2.4.1.1 Nötningens faser**

Nötning sker ofta genom en blandning av olika avverkningsmekanismer men själva nötningsförloppet kan delas in i de tre olika stadierna, nedbrytning, avverkning och transport. Ytskiktets nedbrytning och avtransporten av nötningspartiklar kan ha lika stor påverkan på nötningstakten som själva avverkningsmekanismen.

I nedbrytningsfasen kan materialen utsättas för ett antal olika ytskador utan att det sker ett materialutbyte. Mekanisk, kemisk eller termisk påverkan på materialet kan orsaka lokala defekter, mikrospricksystem, förändringar av den kemiska sammansättningen, fastransformationer, eller att materialet hårdnar eller mjuknar.

I avverkningsstadiet frigörs partiklar genom någon avverkningsmekanism.

När en partikel har frigjorts från ytan så måste den transporteras bort från ytan för att det ska kallas nötning. Partikeln kan transporteras genom att, den förs ut ur systemet, den fångas mellan de två motgående ytorna, den överförs till motytan och kletar fast där, eller genom att partikeln återförs till ursprungsytan. Transportmekanismen har en stor inverkan på nötningstakten. Då en tribologisk konstruktion består av olika material i de två ytorna, så medför transportmekanismen överföring till motytan att efter en tids nötning så kommer materialet glida mot sig själv. Det här beror på att ytan på det motgående materialet består enbart av bortnött material från det första materialet. Då det bortnötta materialet bildar ett heltäckande ytskikt på den motgående ytan så ändras friktionskoefficienten och nötningstakten i med att kontaktfallet är förändrat.

Skador på ytor i en tribologisk kontakt orsakas oftast av en kombination av olika skademekanismer. Skademekanismerna samverkar ofta på ett sätt som gör att en synergieffekt uppstår, det vill säga att effekten av de tillsammans blir större än om de hade adderats var för sig. Ett vanligt exempel på en sådan synergieffekt är när ett material samtidigt utsätts för både oxidation och nötning. Oxidfilmen är ofta mycket känsligare för en erosiv kontakt än grundmetallen och nötningen gör att ny metall kontinuerligt exponeras för oxidering, vilket medför att oxidationstakten

inte sjunker. Förhållandet mellan skademekanismer kan även vara det omvända det vill säga att två skademekanismer samverkar på ett sådant sätt att deras sammanlagda nedbrytning blir mindre än om man hade adderat de två mekanismerna. Ett exempel på det här är när ett oxidlager lyckas separera två metallytor och på så sätt minska friktionen och nötningen genom att risken för skjuvbrott blir mindre med den minskade friktionen.

Då en nött yta studeras är det lätt att överskatta den skademekanismen som har lämnat de största nötningsmärkena på ytan. Det är lätt att göra det felaktiga antagandet att de största skadorna är de som ger störst bidrag till nötningen. Då materialförlust är utslitningskriteriet för en tribologisk kontakt är det viktigast att fokusera på den mekanism som totalt har avverkat mest material. För att minimera nötningen när flera olika nötningsmekanismer är aktiva bör fokus vara på den nötningsmekanism som ger upphov till de nötningsmärken som täcker störst del av ytan och inte på den mekanism som ger de största nötningsmärkena [7].

#### 2.4.1.2 Beräkning av nötning

Med nötning menas den förlorade volymen från en fast yta i en kontakt som rör sig. Trots att nötning är ett väldigt viktigt fenomen så finns det ingen enkel och universell modell som fungerar bra för att beräkna nötningen. Huvudorsaken till frånvaron av en väl fungerande modell är att nötning beror på så många olika parametrar. Friktion och nötning påverkar varandra mycket och variationer i friktion eller nötning kan bero på faktorer som ytjämnhet, hårdhet, formbarhet, ytoxidation eller olika överföringsprocesser [12].

En förenklad formel som används för beräkna nötningen vid glidande kontakt är Archards nötningsekvation  $V = \frac{K \times N \times s}{H}$   
 $V$ =volymminskningen,  $K$ =nötningskoefficienten,  $N$ =normalkraften,  $s$ =slitagesträckan,  $H$ =hårdheten.

I ekvationen är volymminskningen proportionell mot normalkraften och omvänt proportionell mot hårdheten. Ytornas jämnhet påverkar slitagehastigheten väldigt mycket. För de flesta metaller uppstår troligtvis minst slitage vid en ytjämnhet på  $0.1-1 \mu$  mätt i  $R_a$ . Hos hårdmetaller har ett optimalt värde ej hittats. Formeln visar att hänsyn behöver tas till materials hårdhet och nötningskoefficient när ett nötningsbeständigt material skall väljas [6].

Volymen bortnött material per glidsträcka  $\frac{V}{s}$  brukar benämnas nötningstakten. Inversen av nötningstakten  $\frac{s}{V}$ , som anger glidsträckan för att nöta bort en viss volym, kallas nötningsmotståndet.

Ekvationen för den specifika nötningstakten med hänsyn till last, bör användas om olika material skall jämföras. Ekvationen är  $C = \frac{K}{H} = \frac{V}{N \times s}$  med enheten  $m^2/N$  eller  $mm^3/(Nm)$ . Det är viktigt att ej blanda ihop ekvationen för Archards nötnings-

ekvation med ekvationen för specifik nötningstakt. Det blir fel om man jämför ett material som har nötningen angiven i Archards konstant med ett material som har angivits med formeln för specifik nötningstakt. Ekvationen för specifik nötnings-takt är användbar då olika material, från olika undersökningar skall jämföras [6].

#### **2.4.1.3 Nötning i glidande kontakt**

Sambandet mellan friktion och nötning är komplicerat. Lägre friktion innebär inte nödvändigtvis lägre nötning utan kan ofta leda till en högre nötning, med undantaget då den lägre friktionen skapas av att smörjningen förbättras. Det är vanligt att förändringar som sänker nötningstakten ofta leder till att friktionen ökar. Det här kan bero på att det sker ett skifte av nötningsmekanism eller att temperaturen ökar.

Friktionen bestäms av medelvärdet på kraften som krävs för att skjuva kontaktbryggor. Nötning uppstår då ett skjuvbrott medför avverkning. Sannolikheten för att det skall bildas en nötningspartikel är väldigt liten, den ligger ofta mellan 0.1 % - 0.0001 %. Om kraften för att bryta loss en nötningspartikel skulle öka jämfört med kraften för att orsaka skjuvbrott så påverkas friktionen knappt då kraften för att bryta loss en nötningspartikel är så sällsynt jämfört kraften som orsakar skjuvbrott. Det vill säga ökar nötningsmotståndet, ökar knappt friktionskoefficienten. Det är det här som gör att kopplingen mellan friktion och nötning är så svag i glidande kontakter

Nötning påverkas av hastigheten i en glidande kontakt. Att nötningen påverkas av hastigheten beror bland annat på att temperaturen stiger vid ökad hastigheten, oxidtillväxthastigheten kan ökas, materialets hårdhet minskar då hastigheten ökar. Ofta påverkar hastigheten inte nötningen så mycket, men hastigheten kan i vissa fall leda till att en ny nötningsmekanism startar vilket kan leda till nötningshastigheten ökar kraftigt. För att begränsa nötningen bör fokus i många fall vara på att begränsa temperaturen. För vissa material leder dock en högre temperatur till att det skyddande oxidskiktet bildas snabbare, och på så sätt kan nötningen minskas när temperaturen stiger [7].

#### **2.4.2 Tribokemiska mekanismer**

En tribologisk kontakt ökar oftast ytors reaktionshastighet och gör ytorna mer kemiskt reaktionsbenägna. Tribokemiska reaktioner kan antingen höja eller sänka nötningstakten för ett material. Tribokemiska effekter kan spela stor roll vid olika ytskadefall, och kan även orsaka mindre självklara fenomen som materialvinst. Tribokemiska reaktionerna kan ofta förändra nötningsfallet på grund av att tribokemiska reaktionen skapar reaktionsprodukterna som har andra materialparametrar än själva ursprungsmaterialet. Tribokemisk nötning avverkar i stor utsträckning motgående yttoppar vilket leder till att topografin utjämnas och spänningskoncentrationerna minskas, till skillnad från mekanisk nötning som ofta skapar grova kontaktytor vilket leder till ökade spänningskoncentrationer [7].

#### **2.4.2.1 Friktionsuppvärmning**

Friktionsuppvärmning gör att ytemperaturen kan bli hög vid en tribologisk kontakt mellan två ytor. I den verkliga kontaktpunkten kan temperaturen bli väldigt hög och det kan skapas en så kallad temperaturlixt (flash temperature) när en adhesiv kontaktbrygga slits loss i kontaktpunkten. Temperaturlixten ligger ofta i närheten av materialets smältpunkt vilket leder till att det sker kemiska reaktioner i närheten av temperaturlixten och reaktionshastigheten för andra reaktioner i materialet ökas. De höga temperaturerna i kontaktpunkterna kan skapa reaktioner mellan smörjmedlet och ytskiktet. Genom att studera fastransformationer i materialet och reaktionsprodukternas sammansättning kan det avgöras hur hög temperaturen har varit. Metoden är inte helt tillförlitlig då det finns andra tribokemiska mekanismer som kan orsaka de här effekterna utan att det sker en temperaturhöjning [7].

#### **2.4.2.2 Direkt mekanisk stimulering av reaktioner**

Den här mekanismen uppstår när mekaniska krafter modifierar bindningsenergierna. Avståndet mellan två närliggande atomer är det enklaste exemplet. När avståndet mellan atomerna töjs ut ansträngs bindningen vilket medför att den bryts lättare och att atomen lättare binder eller reagerar med andra atomer. Det här fenomenet är endast märkbart vid extrema töjningar och kan ses i sprickspetsar i metaller, keramer, polymerer som utsätts för höga krafter. Det här fenomenet kan även ses i andra sammanhang än tribologiska och fenomenet orsakar till exempel spänningskorrosion.

#### **2.4.2.3 Materialtransformationer.**

I en tribologisk kontakt skapas kraftiga plastiska deformationer i ytskiktet. Keramer kan även deformeras plastiskt vid tribologisk belastning trots att de är spröda. Den plastiska deformationen genererar en kraftig mängd dislokationer vilka fungerar som diffusionsvägar i materialet. Diffusionsvägarna medför att tillväxthastigheten av oxider och andra reaktionsskikt ökar [7].

### **2.4.3 Utmattningsnötning**

#### **2.4.3.1 Kontaktutmatning**

Cykliskt upprepande belastningar ger upphov till kontaktutmatning i glidande, rullande och stötande kontakter. Glidande kontakter som verkar vara stabila och kontinuerliga med en glidriktning, utsätts i själva verket för lastfluktationer. Ojämnheter i topografin skapar lastfluktationerna genom att enskilda kontaktpunkter varierar mellan att vara obelastade till att ha väldigt hög punktlast beroende på när det motgående materialets yttoppar passerar förbi.

I en glidande kontakt med låg friktionskoefficient genereras de högsta spänningarna en bit under ytan. Det här gör att spricktillväxten och materialnedbrytningen startar under ytan. Glidande kontakter med en hög friktion orsakar skador i ytan och utmatningssprickorna generas i ytan [7].

#### **2.4.3.2 Termomekanisk utmattning**

Termomekanisk utmattning är ett vanligt problem för verktyg som används under korta belastningscyklar som till exempel verktyg för stansar och fräsar, men är även ett problem i andra konstruktioner som till exempel bromsskivor. De mekaniska spänningarna i de här applikationerna blir underordnade de varierande spänningar som orsakas av den varierande termiska expansionen. Temperaturväxlingarna genererar en tillväxt av ett nätverk av sprickor i kontaktytan. Spricknätverket försämrar hållfastheten och nötningsmotståndet kraftigt [7].

#### **2.4.3.3 Delaminationsnötning**

Delaminationsnötning är en relativt nyligen kategoriserad nötningsmekanism. Begreppet syftar på de utmattningsbrott vid glidande kontakter som gör att stora flagor lossnar från släta ytor. Fenomenet uppstår genom att kontaktytorna först jämnas ut genom plastisk deformation och att yttoppar utsätts för skjuvbrott. Därefter gör de fortgående kontaktcyklarna att den plastiska deformationen i ytskiktet fortsätter samt att det bildas utmattningssprickor en bit ner i materialet. Utmattningssprickorna växer sedan parallellt med ytan och växer samman efterhand som belastningscyklarna fortskrider. På grund av inhomogeniteter i materialet så sprider sprickorna sig slutligen upp till ytan och då lossar stora skivliknande fragment av partiklar. Fragmenten avverkas sedan från ytan vilket kallas att de delamineras. Delamination kan ske vid glidande kontakter som har en fram och återgående rörelse, enkelriktad rörelse eller cyklisk belastning. Det finns en ekvation som beskriver nötningskoefficienten för delaminationsnötning med de ingående parametrarna i ekvationen är inte kända för olika material vilket gör att ekvationen inte är särskilt användbar [7].

#### **2.4.3.4 Fretting**

Fretting används för att beskriva de olika ytskademekanismer inom tribologin som orsakas av att två ytor med högt yttryck har mikroskopiska rörelser framåt och tillbaka. Ytorna vibrerar alltså relativt varandra och glider mot varandra med glidsträckor i storleksordningen mikrometrar. Fenomenet fretting kan skapa en form av utmattningsnötning kallad fretting wear, en kraftig ökad korrosion kallad fretting corrosion, och även ytsprickor som kallas fretting fatigue.

De korta glidsträckorna och den låga glidhastighet som råder under fretting kan vara mer skadligt än en situation med normal glidning. Det är på grund av att belastningen ligger inom samma kontaktområde vilket leder till en stor risk för lokal utmattning. Vid normal glidning utsätts olika områden för punktlaster. Fretting är vanligt för nitade eller bultade förband som utsätts för vibrationer som till exempel hos maskiner som står stilla på vibrerande underlag [7].

#### **2.4.4 Atomär nötning**

Det finns tribologiska fall där nötningen är extremt liten. De här fallen är svårstuderade och nötningsmekanismen kan ej studeras experimentellt. Det antas att slitage sker på en atomär skala som innebär att materialet nöts genom att atom för

atom lossnar från ytan. Det här kan ske på följande fyra olika sätt enligt Jacobson och Hogmark:

- Ytatomerna löser sig i det motliggande materialet och borttransporteras
- Ytatomerna löser sig i eller reagerar med smörjmedlet och borttransporteras.
- Ytatomerna reagerar med absorberande molekyler på ytan för att sedan avverkas mekaniskt eller genom desorption.
- Ytatomerna förångas på grund av friktionsuppvärmning kallas ablation.

Atomär nötning är viktigt att förstå då det under vissa speciella omständigheter genererar ett snabbt och kraftigt slitage. Vid höga skärhastigheter kan skäreppor av hårdmetall utsättas för atomär nötning. Verktygen kan då slitas ut på så kort tid som 15 minuter på grund av att verktygsmaterialet reagerar med de varma spånorna som avverkas från arbetsstycket. Verktygsmaterialet kan lösa sig i spånorna och transporteras bort med dem. Exempel på det här att diamantskär där kolatomerna snabbt löser sig i arbetsstycket om det är järn. Verktygsskär av kiselnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$  går heller ej att använda för stål då kisel och kväve är lösliga i järn [7].

#### 2.4.5 Abrasiv nötning

Abrasiv nötning innebär att hårda yttoppar eller partiklar, skadar en yta. Abrasiv nötning är den dominerande nötningen i öppna system som transport av sten eller som en grävskopas kontakt med motgående material. Abrasiv nötning kan också ske i lager oönskade partiklar har kommit in i lagret. Partiklarna kan då göra en stor skada på det mjuka lagermaterialet. Abrasiv nötning kan orsaka repor, spånor och flagning i det mjukare materialet. För undvika abrasiv nötning, bör systemet byggas så slutet som möjligt och smörjoljan filtreras för få bort främmande partiklar [12].

#### 2.4.6 Nötningens tidsfaser

Nötning kan delas in tre faser då den studeras som en funktion av tiden.

Den första fasen är inkörningsfasen eller inslitningen. Under inkörningen är nötningshastigheten hög. Det beror på att ytorna är ojämna och yttoppar sticker upp kraftigt jämfört med resten av ytan. Den ojämna ytan medför att kontaktsvetsarna och nötningspartiklarna blir stora under inkörningsfasen. Under inkörningen slätas ytorna ut genom nötningen och plastisk deformation. Därmed sjunker nötningshastigheten och antar ett lägre och stabilare värde. Inkörningsfenomenet gäller för både smorda och osmorda ytor. I smorda ytor är inkörningsfasen kortare då det endast är de högsta yttopparna som bryter igenom smörjfilmen och slits ner för att ytorna skall bli inkörda. Vid torra kontakter med hög ytfinhet påverkar inkörningsfasen materialet genom att det sker materialförändringar i ytan. Hos material av metaller så sker oftast en hårdhetsökning av ytan på grund av att materialet deformations hårdnar och på grund av att kornstorleken minskar. Det här leder till ett ökat nötningsmotstånd hos materialet vilket gör att nötningsstakten avtar under

inslitningsfasen för osmorda kontakter. Om inkörningsfasen inte blir allt för våldsam utan sker kontrollerat så kan livslängden för den tribologiska kontakten ökas av inkörningen i med att nötningshastigheten blir lägre efter en lyckad inkörning.

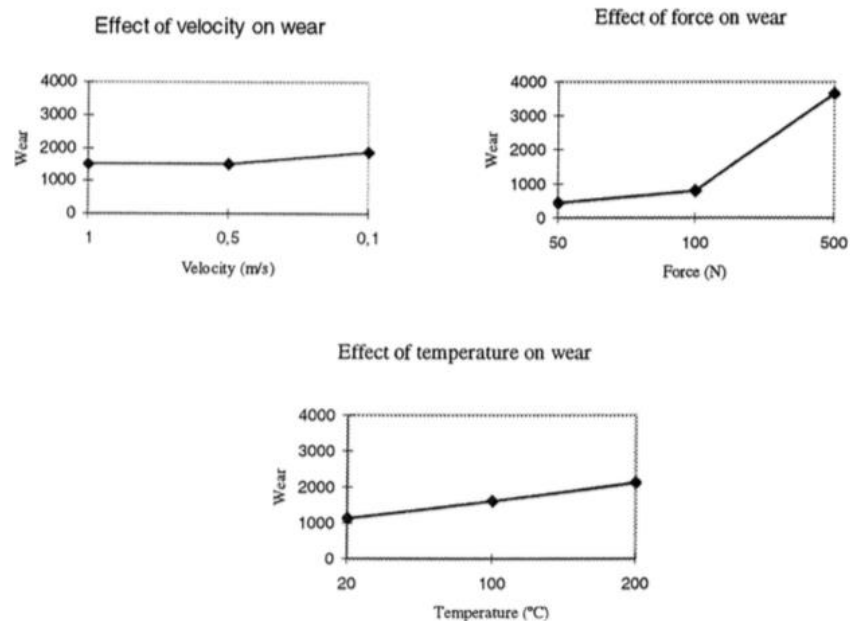
Den andra fasen är jämviktsfasen och i den här fasen så är nötningshastigheten konstant.

Den tredje fasen är haveri och övergången mellan jämviktsfasen och haverifasen sker ofta väldigt snabbt. I haverifasen accelererar slitaget kraftigt vilket snabbt leder till att ett haveri uppstår, vilket ofta kallas skärning. Med begreppet skärning menas främst haverifallet då två ytor svetsas ihop och fortsatt glidning blir helt omöjlig. I många tribologiska konstruktioner fås inte fenomenet med skärning. I konstruktioner som kugghjul och växlar går det ej att få skärning då ytorna tvingas isär av själva konstruktionen.

I tribologiska kontakter orsakas ofta skärning av att kontaktförhållandena är ojämna vilket leder till att den reella kontaktytan består av en eller ett fåtal punkter. Maskinvibrationer eller ojämn värmeutvidgning i en konstruktion kan orsaka de här ojämna kontaktförhållandena som leder till lokala överbelastningar. Skapas det en lokal friktionsuppvärmning kan det orsaka en lokal värmeutvidgning vilket ställer till problem. Det får ofta en accelererande effekt då utvidgningen leder till att trycket och kontaktarean ökas i punkten vilket leder till att temperaturen i den lokala kontaktpunkten höjs ytterligare. Det här blir en negativ cirkel som kan leda till att hela den reella kontaktarean kan samlas i en kontaktpunkt som växer med tiden. Till slut får kontaktsvetsen en så stor area att tangentialkraften i konstruktionen inte räcker för att skapa den kraft som behövs för att möjliggöra fortsatt glidning. När det har skett så har de två ytorna skurit ihop [7].

#### **2.4.7 Nötningstest av stål mot mässing**

I artikeln "An experimental study of the tribological behavior of the brass and steel pair" genomförs nötningstester med mässing (koppar 70 %, zink 30 %) och stål benämnt Ck-45-DIN. Med hjälp av en pin-on-disc maskin genomförs testerna utan tillförsel av smörjmedel. I Figur 6 syns temperaturen, lastens och hastighetens påverkan på nötningshastigheten under de här försöken.



**Figur 6 – Nötningstest [9].**

Resultatet i artikeln visar att nötningen påverkas väldigt mycket av lasten och i mindre utsträckning av temperaturen. Slutsatsen dras i artikeln att då den maximala lasten som ett material klarar överstigs så fås ett kraftigt ökat slitage och materialet riskerar att haverera. Slutsatsen dras även att nötningen ej har ett lineärt beteende. [9].

## 2.5 Legeringar och legeringsämnen

Kopparlegeringar delas ofta in de tre grupperna, rödmetaller, brons och mässing.

Rödmetaller innehåller koppar, tenn, bly och zink. De tre sistnämnda utgör oftast mellan 5-8 procent av legeringen vardera. Det som särskiljer rödmetallerna är att tennhalten är lägre än i många andra bronser, det här gör rödmetaller billigare då tenn är den dyraste komponenten. Rödmetall har relativt bra glideegenskaper och har även bra skärbarhet som tillåter hög skärhastighet.

Bronser kan delas in i tre olika undergrupper tennbronser, blybronser och aluminiumbronser.

Tennbronserna består endast av koppar och tenn med en tennhalt på 10-14 procent. Tennbronser används då man har högre krav på bärighet och hårdhet. Hållfasthet för tennbronser är betydligt högre än i rödmetaller. Vid cirka 12 % tenn så får man den högsta hållfastheten för tennbrons. Ökas tennhalten ytterligare blir materialet hårdare men även sprött. Tennbronser ställer högre krav på smörjning jämfört med rödmetall och blybrons då tennbrons inte innehåller bly.

Brons som endast innehåller koppar och bly kallas blybrons. Blytennbronsen som innehåller koppar tenn och bly är vanligare än blybrons. Brons innehållandes bly är mjukare jämfört med rödmetsall och tennbrons och har sämre hållfasthetsvärden.

Bly har följande egenskaper i en bronslegering:

- Bly har en smörjande verkan och ger en legering mycket bra torrfriktions egenskaper.
- Bly ökar bearbetningshastigheten av legeringen då blyet påverkar spånbrytningen och skärbarheten positivt.
- Bly minskar värmeledningsförmågan i bronser.

Aluminiumbronser och mässing har liknande hållfasthetsegenskaper. De båda legeringarna ställer höga krav på det motgående materialet i form av ytfinhet och hårdhet om de används som lagermetall. Mässing består till huvuddel av koppar och zink men har tillsatser av järn, aluminium, mangan och nickel. De höga hållfasthetsvärdena för mässing och aluminiumbrons gör bearbetningen dyrare och mer tidskrävande då bearbetningen blir mer lik bearbetning av stål än av brons.

Vitmetall eller babbit som det ofta kallas har använts som lagermetall under en väldigt lång tid. Användandet av vitmetall i maskinlager har i stor utsträckning ersatts av bronser. Vitmetall används fortfarande i vissa applikationer med höga hastigheter och höga krav på vibrationsdämpande egenskaper. Vitmetall består av tenn som är huvudämnet, bly, antimon, och har även ibland små tillsatser av koppar. Vitmetall har en dålig bärformåga då hårdheten ligger på 20-30 HB och en hög värmeutvidgning. Vitmetall används mest som ytskikt över andra material, men det är komplicerat att få ytskiktet att fästa bra.

Gjutjärn används i vissa lagerkomponenter och det är grafithalten i gjutjärn som ger den smörjande egenskapen och den lägre friktionen. Gjutjärn har en hårdhet på 180 HB, max belastning på 6 N/mm<sup>2</sup> och max glidhastighet 3m/s. Gjutjärn skär lätt vid avsaknad av fullgod smörjning men är en relativt billig metall [13].

### **2.5.1 Giftiga metaller som används i legeringar**

Bly används väldigt mycket i legeringar på grund av dess glidegenskaper och spånbrytande egenskaper. Bly är mycket giftigt och skadar främst njurar och nervsystemet och påverkar hjärnans funktioner [14]. Bly är extra skadligt för foster och barn eftersom hjärnfunktionens utveckling påverkas. Hög blyexponering har visats ha ett samband med lägre IQ [15].

Beryllium används som legeringsämne i en hel del bronslegeringar. Beryllium är mycket giftig och inandning av dammpartiklar från beryllium är mycket farligt [16].

Antimon (Sb) används för öka styvhet och hårdhet i legeringar. Ofta är andelen Antimon ganska liten och i en hel del fall finns Antimon endast som oönskad slaggprodukt. Antimon och dess föreningar är giftiga [17].

### 2.5.2 Självsmörjande lager

Oljebronsleger är material som är sintrade av tennbrons och därav är materialet poröst. Håligheterna i det porösa materialet fylls ut av olja och den totala volymen olja utgör cirka 25 %. När temperaturen höjs i lagret under driften tränger oljan ut och smörjer ytan, och när rörelsen avstannar sjunker oljan in igen. Den här typen av lager används vid en jämn rotationshastighet och den bör minst vara 0.2 m/s för att smörjningen skall fungera. Lager av den här typen klarar en belastning på 10 N/mm<sup>2</sup> vid glidhastigheter på 0.2 m/s men när hastigheten ökar minskar belastbarheten. Oljebronsleger bör ej användas vid temperaturer över 100 °C utan då bör istället grafitbronsleger användas.

Skillnaden mellan oljebronsleger och grafitbronsleger är att i grafitbronsleger är håligheterna fyllda av grafit som är fast lagrat i materialet. Vissa grafitbronslagren kan ej belastas över 2.5 N/mm<sup>2</sup> och har en max glidhastighet på 0.25 m/s. Den porösa strukturen medför sämre hållfasthetsegenskaper än hos ett kompakt material. Sintrade lager klarar inte av att utsättas för stötlaster. Efterbearbetning bör helst undvikas för sintrade lager och sintrade lager får ej bearbetas genom slipning då slipmedlet täpper igen porerna [11].

D&E glidlager specialisten tillverkar ett bronslager med fast inlagrat grafit som benämns BWG. Legeringen skall klara laster upp till 150 N/mm<sup>2</sup> vilket är flertalet högre än rena bronslegeringar trots att BWG:s yta består av 25-30 % grafit. Materialet klarar även temperaturer upp till 300 °C, men klarar endast hastigheter under 0.2 m/s osmord och hastigheter under 1 m/s oljesmord [18].

### 2.5.3 Ytskikt, Teflon, PTFE

Det finns ett antal olika ytbeläggningar som ger en låg friktion och är slitstarka. Dock är bärkapaciteten för teflon, PTFE och liknande material låg. Materialen klarar heller inte höga glidhastigheter vilket gör de olämpliga för många konstruktioner. Tjockleken på ytskiktet är ofta i mikrometer men PTFE komposit kan ha en högre tjocklek på upp till 0.2 mm [19].

### 2.5.4 Vismut i legeringar

I artikeln "Development of a lead-free bearing material for aerospace applications" utförs tester på de tre olika legeringar:

- Legering 1 Cu-balans Bi 5 % Sn 10 %
- Legering 2 Cu-balans Bi 10 % Sn 10 %
- Legering 3 Cu-balans Pb 10 % Sn 10 %

Bronslegeringen med 5 % vismut har liknande mekaniska egenskaper som brons innehållandes 10 % bly. Vid temperaturer över 125 °C har vismutlegeringen lite lägre drag-hållfasthet medan sträckgränsen fortfarande är likvärdig. Bronslegering innehållande 10 % vismut har sämre draghållfasthet och lägre sträckgräns än de två andra legeringarna. Dock har legeringen med 10 % vismut betydligt mindre förlängning än de två andra legeringarna. Vid 100 °C ligger förlängningen på 15 % medan de andra legeringarna har en förlängning på mellan 25-30 %. Legeringen innehållande bly hade högst utmattningsgräns som var 28 % bättre jämfört med vismutlegeringen. I artikeln dras slutsatsen att tenn behövs i vismutlegeringar för att motverka en mikrostrukturegenskap hos vismut som kan orsaka sprödhet.

Nötningstesterna i artikeln gjordes utan smörjmedel och med ett okänt material som motgående material. Nötningstesterna visade att vismutlegeringarna slets dubbelt så mycket som blylegeringen och vismutlegeringarna visade sig vara mjukare.

Friktionstesterna i artikeln visade på en skillnad där blylegeringen hade lägre friktion, men vismutlegeringen med 10 % vismut hade endast 10 % högre friktion än blylegeringen. Vismutlegeringarna hade mindre variationer i friktionstalet under friktionstesterna än blylegeringen. Temperaturutvecklingen i legeringarna under testerna var liknande för de tre legeringarna [20].

European Copper Institute publicerade 2007 en artikel där de avråder från användning av vismut. European Copper Institute är en intresseorganisation som arbetar för att vara ledande inom industrin avseende:

- Hälsofrågor och miljövetenskap.
- Standarder och koder för koppar på europeisk och nationell nivå.
- Rådgivning om koppar avseende effektiv hantering och tillverkning.

Organisationen representerar flera av de stora tillverkarna av koppar och industrier som bearbetar kopparen. Publikationer av organisationen kan inte förväntas att vara opartiska.

Artikeln argumenterar för att vismut försvårar tillverkningen av kopparlegeringar genom smidning och att vismut orsakar problem genom att det blir höga restspänningar i legeringar som orsakas av att vismutpartiklarna expanderar under stelningen. Legeringar av vismut skall därmed bli känsligare för spänningskorrosion. Vismut skall även öka korngränssprödheten och öka risken för utmattningsprickor. Vismut har en negativ påverkan på en del metaller och bör därmed ha en egen separat återvinningskrets så det inte blandas med andra metaller. En separat process bör även användas för gjutning av vismut. I artikeln skrivs det även att återvinning av vismut inte är tekniskt eller organisatoriskt genomförbart.

Vismut fås som en biprodukt vid utvinning och bearbetning av blymalmer men även vid framställning av andra grundämnen. I artikeln argumenteras det för att det inte finns tillräckligt med vismut för att ersätta allt bly som används i mässing och brons. Därmed påstås det även att en ökad efterfråga av vismut kräver att blyproduktionen ökas för att vismuten skall fås fram [21].

I artikeln "Bismuth- The new ecologically green metal for modern lubrication engineering" beskrivs användningsområden för vismut för att visa på dess ofarliga effekter. Vismut används bland annat i läppglans, smink, nagellack, men även i medicinska applikationer som till exempel blandas vismut in i plastimplantat så de ska bli synliga på röntgen. Vismut finns i malmer blandat med bly, koppar, zink och volfram. Fyndigheter av vismut finns i länderna Bolivia, Peru, Mexico Japan, Kina, Korea, USA Tyskland och Spanien [22].

### **2.5.5 Material inom forskning ZAS35**

På Shandong University i Kina har det genomförts experiment med en värmebehandlad legering kallad ZAS35 som till huvuddelen består av zink, men som även innehåller 35 % aluminium och 2.2 % koppar. Testerna genomförs för att fastställa hur värmebehandling och smältteknik påverkar friktion- och slitageegenskaperna för legeringen.

Legeringen ZAS35 testas i tre olika utförande med avseende på värmebehandling och TRT behandling. TRT tekniken går till på så sätt att legeringen värms upp till en viss temperatur och hålls sedan vid den temperaturen under en viss tid. Därefter kyls legeringen snabbt. De olika värmebehandlade legeringarna av ZAS35 testas mot en bronslegering kallad SAE660 som innehåller 7 % bly och 7 % tenn.

De tre olika ZAS35 legeringarna har en något lägre friktion än bronslegeringen i friktionstestet som genomförs torrt. TRT-behandlingen gör att hårdheten och slagsegheten ökar och ger även legeringen lägst friktion. Testerna genomfördes med glidhastigheten 0.42 m/s och glidhastigheten 0.84 m/s. Trycket som materialet utsätts för under testerna är ej känt.

Syftet med undersökningen i artikeln är att hitta ett lagermaterial som ej innehåller koppar då koppar är dyrt och kan bli en bristvara. Legeringar innehållande zink och aluminium används enligt artikeln som substitut till kopparlegeringar på grund av dess fördelaktiga draghållfasthets samt dess låga pris.

Vid slitagetestet av bronsen SAE660 noterades att vid en belastning på 500 N steg slitagehastigheten väldigt kraftigt och ett överbelastningsfenomen uppstod enligt artikeln. I slitagetesterna fick den värmebehandlade ZAS35 en slitagehastighet som var en tiondel av slitagehastigheten av bronslegeringen vid höga belastningar på grund av att bronslegeringen överbelastas vid den lasten. Vid lägre belastning var slitaget större för bronslegeringen än ZAS35 legeringarna. TRT tekniken ger en negativ inverkan på slitagehastigheten under tyngre belastningar men legeringen som är behandlad med TRT har ändå bättre slitage motstånd än bronslegeringen.

Zinklegeringarna klarar högre laster än bronslegeringen men det medför även att legeringarna är hårdare.

Slutsatserna i artikeln är att efter värmebehandlingen förbättras slitagemotståndet och friktionskoefficienten och TRT-tekniken gör att friktionskoefficienten sjunker ytterligare [23].

## **2.6 Gjutning**

### **2.6.1 Sandgjutning**

Sandgjutning är en av de äldsta gjutmetoderna och fungerar genom att en form av sand och bindemedel byggs runt en prototyp. Därefter tas prototypen ut och flytande metall hälls i formen. Formerna kan tillverkas maskinellt eller för hand och de förbrukas efter en gjutning. Maskinformade formar får bättre hårdhet och högre måttnoggrannhet. Fördelen med sandgjutning är att komplexa former och detaljer kan gjas. Detaljerna är även i sin slutgiltiga form efter gjutningen, bortsett från att rensning behöver göras och eventuellt slipning. Initialkostnad är låg vid sandgjutning vilket gör gjutmetoden lämplig för små serier [24].

Vid sandgjutning finns det inga begränsningar i storlek utan väldigt stora profiler kan gjas med metoden. Materialkvaliteten varierar för sandgjutet gods då det beror på detaljens godstjocklek. I grova tvärsnitt kan problem med sämre metalltätthet uppstå på grund av att smältan krymper vid stelning. Sämre metalltätthet skall inte påverka glidegenskaperna i en legering enligt Johnson metall AB men det försämrar lagermetallens bärighet. Tätzonens djup vid sandgjutning är 1-3 mm. Sandformsgjutning är lönsamt då färre än 20 000 detaljer skall tillverkas [13].

### **2.6.2 Stränggjutning**

Stränggjutning är en effektiv gjutmetod där gjutprocessen är nästan kontinuerlig. Vid stränggjutning tillverkas stänger av olika profiler. Stränggjutning är en billig och kostnadseffektiv gjutmetod och ger även bättre kvalitet på gjutgodset än vad sandgjutning gör. Vid stränggjutning kan gjutgodset kylas kontrollerat till skillnad från vid sandgjutning. Tätzonens djup vid stränggjutning är 6-20 mm [13].

Hårdheten kan alltså skilja mellan ca 15-25 Hb beroende på om materialet är sandgjutet eller stränggjutet. Det sandgjutna godset har lägre hårdhet. För brons av typen JM5 är den här skillnaden ungefär 33 % [11].

### **2.6.3 Gjutdefekter**

Då metallsmälta stelnar bildas kärnor och kristaller som stelnar oberoende av varandra. De här växer i storlek och skapar olika strukturer i materialet. Strukturerna avgör till en stor del materialets mekaniska egenskaper. Metaller får ofta olika skikt med olika kristallstrukturer beroende på att en metallklump kyles olika snabbt beroende på avståndet från ytan. Ytterst i en gjuten komponent finns en struktur som benämns ytkristallzonen.

När en legering steltnar kan en ojämn fördelning av legeringsämnena skapas. Det här beror på att legeringselementen omfördelas mellan den fasta och smälta fasen under själva steltningsfasen. Det här fenomenet uppstår på grund av att smältan oftast har en högre löslighet för legeringsämnen än den fasta fasen, och därför kan en anrikning av legeringsämnena ske i den smälta fasen. Resultatet blir högre koncentrationer av legeringsämnen ju längre från ytan som materialet är. Det här fenomenet kallas mikrosegtring.

När en metallsmälta steltnar minskar dess volym och krympningen som sker kan orsaka stora problem. Om volymminskningen orsakar för stora problem kan det behöva väljas en annan legering.

Vanliga defekter i gjutgods är [24]:

- Sjunkningar som orsakas av att ytskiktet sjunker in i början av stelningen
- Mindre håligheter inne i godset så kallade mikroporositet
- Större håligheter inne i godset som kallas sugningar eller pipebildningar
- Gasblåsor
- Dimensionsfel
- Sprickor
- Restspänningar
- Förskjutningsfel
- Ytfel
- Strukturfel
- Rensningsfel

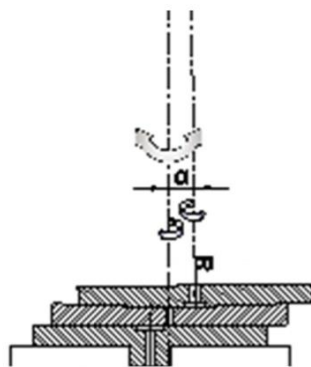


## 3. Nulägesanalys

*I det här kapitlet beskrivs glidlagrets konstruktion och hur det tillverkas. Syftet med det här är att ge ett underlag för förståelsen till varför vissa legeringar inte är lämpliga för konstruktionen. I kapitlet beskrivs även problem men det nuvarande lagret samt krav och önskade egenskaper för lagermaterialet i konstruktionen.*

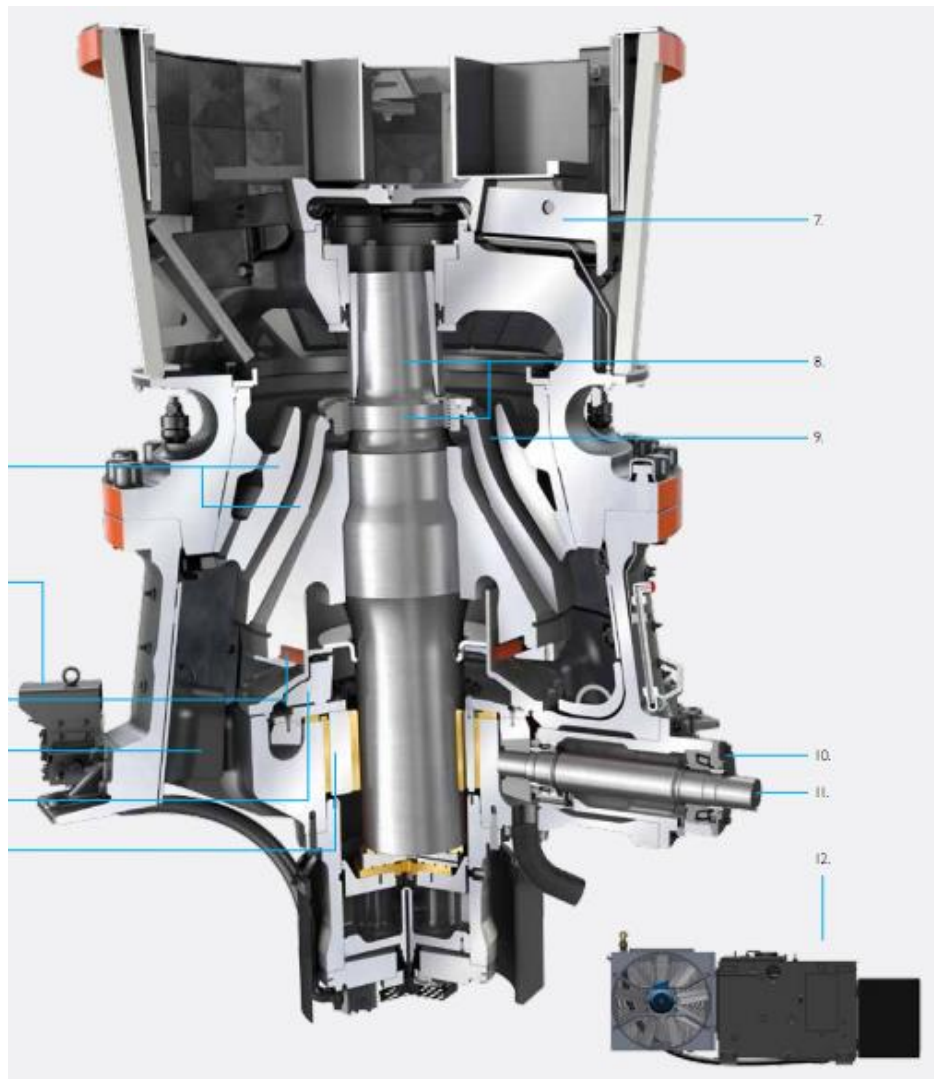
### 3.1 Beskrivning av glidlagret

Glidlagret i stenkrossen består av tre delar och har därmed två stycken glidtor. Lagret bär upp en vertikal axel som roterar runt sin egen axel samt rör sig excentriskt, vilket illustreras i Figur 7.



**Figur 7** - Skiss över glidlagret [25].

Glidlagrets funktion är att bära upp axeln och samt att minska dess rotationshastighet så lite som möjligt. Lagrets funktion är även att ta upp sidokrafter, stötar och vibrationer från axeln. I Figur 8 syns stenkrossen i genomskärning och det kopparfärgade glidlagret syns under den vertikala axeln.



**Figur 8** – Glidlagrets placering i stenkrossen [32].

De tre delarna i glidlagret är, en bronstryckplatta längst ner, en stålplatta ovanför och en bronstryckplatta överst. De två bronstryckplattorna är fast lagrade i den ena sidan, och den andra sidan glider mot stålskivan. Stålskivan är inte fast lagrad utan roterar fritt. Glidlagret består av tre delar för att halva glidhastigheten skall vara mellan översta bronsskivan och stålskivan och halva glidhastigheten skall tas upp mellan nedre bronsskivan och stålskivan. Fördelningen av hastigheten mellan de två glidytorna styrs inte på något sätt. Då friktionen och smörjningen är den samma i de båda kontakterna antas det att hastigheten blir ungefär samma i de två glidytorna.

Stålskivans övre yta har en radie och är svagt skålformad och den övre bronsskivan skall ha exakt samma radie som stålskivan. Glidlagerplattorna har smörjkanaler

som leder smörjoljan från mitten av lagret ut till kanten. I med att smörjningen leds upp i mitten av glidlagret så bör trycket i smörjoljan vara högst i mitten vilket gör att smörjning bör vara mer effektiv där. Smörjoljans temperatur är även lägst i närheten av mitten då temperatur på oljan ökar då den går från mitten och utåt. Det är på grund av att smörjoljan tar upp värme på vägen då den rör sig från centrum och ut. Alltså bör smörjningen och kyleffekten vara bäst i närheten av centrum på lagret.

### **3.2 Tillverkning av lagerdelarna**

Bronsplattorna tillverkas genom sandgjutning. Efter gjutningen bearbetas ytan genom att smörjkanalerna fräses ut och ytan bearbetas för att förbättra ytfinheten.

De tre lagerdelarna slipas in tillsammans innan de börjar användas. Det här görs för att formerna på lagerna ska bli lika varandra så att kontaktytan blir så stor som möjligt och för att det är för dyrt och svårt att tillverka lagerdelarna med så höga toleranser att de passar ihop perfekt. Problemet är främst mellan den övre och den mellanliggande lagerdelen och problemet orsakas av att delarna inte har en slät yta utan att de har en radie. Om de två radierna skiljer sig lite åt, så är endast en liten del av ytorna i kontakt med varandra innan inslipningen.

Då de tre lagerdelarna har slitits ner cirka 15 mm tillsammans så anses de vara utslitna. När utslitningskriteriet har uppfyllts så byts alla tre delarna samtidigt trots att det endast är bronsdelarna som har slitits så mycket att de behöver bytas. Det här görs på grund av att lagerdelarna slits in tillsammans.

Inslipningen sker genom att de olika lagerdelarna körs med slipsand mellan kontaktytorna tills dess att 95 % av ytan har blivit slipad. När lagerdelarna slits in så ökar kontaktytan i med att de punkter som står för kontakten slits ner. När kontaktytan ökar fördelas trycket över en större yta och blir lägre. Ytjämnheten efter inslipning mäts inte upp och ett värde för vad ytfinheten ligger på efter inslipning saknas.

Inslipningen gör att material med högre hårdhet och större slitagemotstånd tar längre tid att bearbeta. Inslipningen medför även att eventuella ytskikt måste läggas på efter inslipningen för att de inte skall slitas bort och bli förstörda. En eventuell ytbeläggning bör även göras i Sandviks fabrik i med att det är där inslipningen sker.

### **3.3 Problembeskrivning av glidlagret**

Krafter som lagret utsätts för och temperaturerna som skapas i lagret är inte uppmätta. Krafterna och temperaturerna uppskattas genom simuleringar och beräkningar men noggrannheten för beräkningarna är inte kända. Därför är det svårt att fastställa specifika krav på lagermetallen till konstruktionen.

Vid bristande smörjning riskerar lagren att haverera och torrfriktionen för lagermaterialet är avgörande för om lagret skär. Lagermetallens arbetstemperatur påverkar även om lagret skär eller inte. Det finns inga rapporter om att lager har havererat på grund av bristande hållfasthet med avseende på mekaniska aspekter. I de flesta fallen är det endast det ena bronslagret som havererar eller blir grovt skadat, medan det andra bronslagret är opåverkat av skador. Generellt verkar det övre lagret skadas oftare än det undre lagret. Fördelningen av skadefallet är ej känt men förhållandet uppskattas till att vid cirka 90 % av haverierna är det övre lagret det som är skadat.

En undersökning [26] av ett skadat lager i standarlegeringen JM5 av modellen CH 865 har genomförts. Färgändringar av lagret kan ses i Figur 9 och Figur 10. Vid överhettning av brons mörknar ytan först och vid ytterligare överhettning blir ytan lila och mörk.



**Figur 9** - Skadad bronslagerdel [26].



**Figur 10** - Skadad bronslagerdel med synliga färgändringar [26].

Plastisk deformation på den skadade bronslagerdelen kan observeras. I Figur 11 syns den plastiska deformationen tydligt, det har blivit ett överhäng av material i smörjspåren vilket försämrar smörjningen.

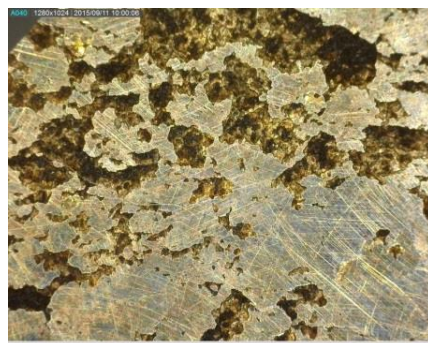


**Figur 11** - Plastisk deformation i ytan på skadat bronslager [26].

I Figur 12, Figur 13 och Figur 14 syns det att material har blivit bortnött i ett nätverksmönster. De här bilderna är tagna närmare lagrets ytterkant där lagret inte har ändrat färg och är relativt oskadat.



**Figur 12** - Bortnött material i ytterkanten [26].



**Figur 13** - Bortnött material i nätverksmönster [26].



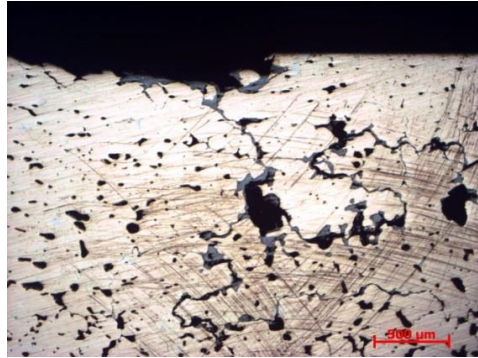
**Figur 14** - Bortnött material i nätverksmönster [26].

Ytterkanten av glidlagret är ganska opåverkat vilket tyder på att antingen är lasten betydligt mindre där, eller är det på grund av att den excentriska rörelsen gör att ytterkanten inte alltid är i kontakt med stålmellandelen och därmed inte utsätts för lika höga temperaturer.

Figur 15 och Figur 16 är tagna nära ytan på materialet och visar ej sprickor utan korngränser som har angripits av korrosion. I rapporten lyfts korrosionsattackerna i korngränserna som den troliga orsaken till att material nöts bort i nätverksmönster.

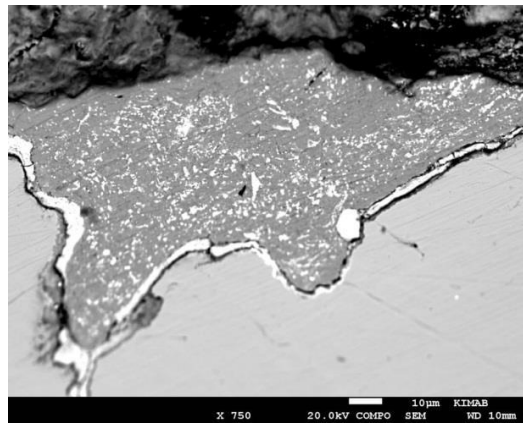


**Figur 15** - Korrosion i korngräns [26].



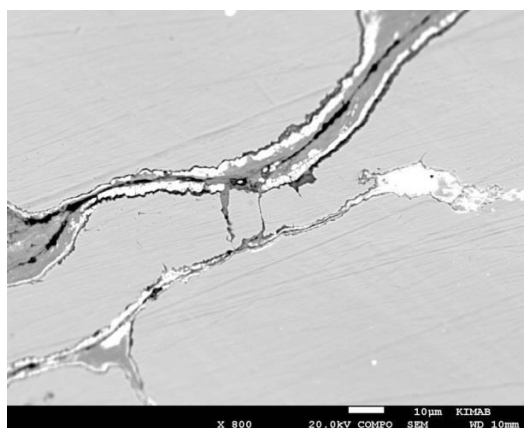
**Figur 16 - Korrosion i korngräns [26].**

Korrosionsattacken undersöktes även med elektron mikroskop (SEM). I Figur 17 syns korrosion vid ytan som till huvuddelen består av metallsulfider men även oxider.



**Figur 17 - Korrosion på ytan [26].**

I Figur 18 syns korrosionsattack mellan korngränserna som är cirka 0-3 mm från ytan.



**Figur 18 - Korrosion mellan korngränserna [26].**

Ytanalyser utförda med SEM visar på att det huvudsakligen är olja och en del korrosion som är utsmetade över ytan på det skadade glidlagret. Om smörjoljan blir för varm blir den reaktiv och reagerar med materialet och orsakar korrosionsskador mellan korngränserna.

Slutsatsen som dras i rapporten är att för höga temperaturer har orsakat skadorna på lagret. De höga temperaturerna har lett till att smörjoljan har kokat och brutits ner samt att korrosionsangrepp har skett. Det bör även vara en skillnad på smörjningen och friktionen mellan de två glidytorna i med att det ena bronslagret är oskadat medan det andra är skadat. Analysen av lagret visar även på att bly har fällts ut från ytskiktet och vid mätning fås blyhalten till 2 % i ytskiktet medan blyhalten är 8-10 % i andra mätpunkter [26].

### 3.4 Krav på lagermaterialet

De olika materialparametrarna påverkar varandra vilket gör att kravet på en materialparameter kan behöva anpassas beroende på värdet på en annan parameter. Det här gör det svårt att ställa upp krav på enskilda materialparametrar. En del av materialparametrarna är dessutom inte kända för legeringar utan måste tas fram genom laborativa experiment. Nedanför listas de materialparametrar som det finns ett krav på för materialet för att det skall fungera i konstruktionen. De viktigaste kraven först kommer först.

Giftighet - Lagermaterialet skall inte ha över 0.5 % av någon giftig komponent.

Pris - Material som är mer än 50 % dyrare än dagens material med hänsyn till livslängd antas vara för dyra för att de skall vara ett alternativ.

Slitagemotstånd - Slitagemotståndet påverkar livslängden för lagret och är därmed sammankopplat med priset. Ett dyrare lagermaterial bör ha högre slitagemotstånd så att livslängden ökar. Slitagemotståndet får inte vara alltför lågt i med att stillståndstiderna ökar om lagerdelarna bytas oftare. Slitagemotståndet för dagens material är ej känt utan kommer undersökas i laborationer.

Friktion - Legeringen bör inte ha högre friktion än den nuvarande. Höjd friktion leder till högre temperatur i lagret och ökad energiförbrukning. Hur många procent högre friktionen som är acceptabelt går inte att säga utan att provköra ett material som fullskalig prototyp i stenkrossen. Dagens torrfriktion är ej fastställd, man friktionen är beräknad till cirka 1 % vid den blandfilmssmörjning som råder i konstruktionen.

Arbetstemperatur för materialet – Arbetstemperaturen för dagens material är 230-260 °C och ett nytt material får inte underskrida det här värdet. Det finns en stor risk att ett alternativt material har en högre friktion och då ökar värmeutvecklingen vilket leder till att materialet måste klara en högre temperatur. Det är osäkert hur

hög temperaturen är i konstruktion men i en del fall blir temperaturen högre än vad dagens material klarar av.

Tryck - Kontakttrycket är beräknat till  $16 \text{ MPA} = 16 \text{ N/mm}^2$  för en av konkrossmodellerna. Trycket för de övriga modellerna är inte känt men kan antas vara i närheten av  $16 \text{ MPA}$ . Det nuvarande materialet klarar trycket  $28 \text{ MPA}$  och ett nytt material bör också klara tryck på  $28 \text{ MPA}$ .

Hårdheten - Materialet bör vara relativt mjukt så att stötar och vibrationer tas upp och så materialet kan bädda in hårda partiklar. Materialet får inte vara för mjukt i med att bärförmågan då försämrats. Dagens material har en hårdhet på  $60 \text{ HB}$  och det den mellanliggande stäldelen har en hårdhet på  $275\text{--}310 \text{ HB}$ . Lagerleverantören Johnson Metall AB rekommenderar en skillnad på minst  $100 \text{ HB}$  mellan två olika lagermaterialen.

Hastighet - Glidhastigheten är beräknad för en del av modellerna och ligger på  $0.4\text{--}0.9 \text{ m/s}$ . Hastigheten är en beräknad för mitten av lagrets radie, vilket gör att hastigheten i ytterkanten är högre. Materialet bör därmed klara hastigheter på  $2 \text{ m/s}$ . Hastigheten ett material klarar av hör ihop med hårdheten och bärligheten för materialet.

Hållfasthet krav - Det finns inga kända haverier som har orsakats av bristande hållfasthet. Materialet får inte vara sprött då det utsätts för stötar. Det nuvarande materialets brottgräns är  $240 \text{ MPA}$ .

Värmeledningsförmågan - Det är viktigt att materialet har en bra värmeledningsförmåga. Fenomenet skärning som beskrivs i kapitlet 2.4.6 orsakas av förhöjda temperaturer i kontaktpunkter i lager och därför är det viktigt att värmeöverskottet fördelas och leds bort.

Korrosionsbeständig - Materialet skall vara korrosionsbeständigt så att det inte är reaktionsbenägenhet med smörjoljan.

God oljebindningsförmåga - Kopparlegeringar har en god oljebindningsförmåga.

De materialparametrarna som är intressanta att optimera och få så bra som möjligt vid valet av ett nytt material är:

- Friktion
- Pris / slitagemotstånd
- Arbetstemperatur
- Korrosionsbeständighet

### 3.5 Blyhantering hos Sandvik

Inom en framtid kan användningen och hanteringen av blyprodukter att begränsas i branscher som inte har så snäva restriktioner i nuläget. I nuläget betalas inga avgifter i Sverige för att använda bly. I framtiden kan det krävas tillstånd för att tillverka och använda blykomponenter och det kan vara förenat med kostnader. Det kan även införas restriktioner som begränsar användningen. I nuläget så finns det många regler och förordningar angående personal som utsätts för blyexponering och hur avfall som innehåller bly skall hanteras.

I Sandviks fabrik slipas endast bronslagerna då de tillverkas hos en leverantör. I samband med slipningen fås spillvatten som innehåller bly och på grund av att det innehåller bly uppstår en kostnad på cirka 50 000 kr per år för att avfallet skall tas hand om. Det här görs externt då interna reningsprocesser ej kan användas för att separera blyet.

I fabriken jobbar fyra personer med slipningen och de behöver genomföra regelbundna hälsokontroller för att kontrollera blyhalten i blodet. Kontrollerna kan ej genomföras av den egna företagssjukvården utan görs externt och kostar cirka 10 000 kr per år för de personerna. Det går även åt en del arbetstid för att genomföra de här kontrollerna.

Sandviks goodwill påverkas positivt om mängden bly kan minskas, då det är något som kunder i Sverige är intresserade av. Kunder i Sverige får en renare tillverkning om de inte har lika mycket tungmetaller i sin utrustning.

Återvinning av materialet som innehåller bly är dyrare på grund av restriktioner i Sverige och EU hur blyavfall skall hanteras. Det är inte säkert att kostnader ökar för återvinning av glidlager innehållandes bly för kunder utanför EU i med att avfallshanteringen inte är reglerad i vissa länder [27].

## 4 Experimentella studier

*I kapitel 4 beskrivs legeringarna som använts i testerna. Utrustningen och laborationsmetodiken beskrivs även i det här kapitlet.*

### 4.1 Beskrivning av legeringar som skall provas

Legering 1 - Heter JM5 och tillverkas av Johnson metall AB, Sverige.

Huvudämnena i legeringen är koppar 80 %, bly 10 % och tenn 10 %. Denna legering används i den nuvarande konstruktionen. Legeringen testas för att få referensvärden som kan jämföras med de andra legeringarna. Provbiten är sandgjuten då den är utskuren från ett glidlager [28].

Legering 2 - Heter C89325 och tillverkas av The Federal Metal Company, USA.

Huvudämnena i legeringen är koppar 85.5 %, tenn 9.8 % och vismut 2.7 %. Legeringen består av vismut istället för bly, och är framtagen för att motsvara en bronslegering med sammansättningen koppar 80 %, bly 10 % och tenn 10 % [29]. Legeringen C89325 kostar cirka 3.3 \$ per kg mer än vad en legering som motsvarar JM5 kostar.

Legering 3 - Heter JM1 tillverkas av Johnson metall AB, Sverige.

Huvudämnena i legeringen är koppar 85 %, bly 5 %, tenn 5 % och zink 5 %. Blymängden är halverad jämfört med nuvarande legering. Legeringen har använts på prov i en del av glidlager men underlaget är för lite för att avgöra hur bra legeringen fungerar. Provbiten är stränggjuten [28].

Legering 4 - Heter JM15 och tillverkas av Johnson metall AB, Sverige.

Huvudämnena i legeringen är koppar 60 %, zink 35 % och aluminium 1.5 %. Legeringen har en hög zinkandel. Provbiten är stränggjuten [28].

Legering 5 - Heter JM7 och tillverkas av Johnson metall AB, Sverige.

Huvudämnena i legeringen är koppar 80 %, aluminium 10 %, järn 5 % och nickel 6 %. Aluminiumbrons är känt för att vara slitstarkt. Provbiten är stränggjuten [28].

I Tabell 1 syns de olika legeringsämnena för legeringarna som skall testas.

**Tabell 1** - Legeringssammansättning för provmaterial.

| Nr | Cu   | Pb   | Sn  | Zn  | Al   | Fe   | Mn  | Ni  | P    | S   | Sb   | Si   | Bi  |
|----|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|------|------|-----|
| 1  | 80   | 10   | 10  | 2   | 0.01 | 0.25 | 0.2 | 2   | 0.1  | 0.1 | 0.5  | 0.01 | 0   |
| 2  | 85.5 | 0.02 | 9.8 | 0.8 | 0    | 0.03 | 0   | 1.1 | 0.26 | 0   | 0    | 0    | 2.7 |
| 3  | 85   | 5    | 5   | 5   | 0.01 | 0.3  | 0.1 | 2.0 | 0.1  | 0.1 | 0.25 | 0.01 | 0   |
| 4  | 60   | 0.5  | 1.0 | 35  | 1.5  | 1    | 1.5 | 1   | 0    | 0   | 0    | 0.1  | 0   |
| 5  | 80   | 0.05 | 0.2 | 0.5 | 10   | 5    | 2.5 | 5   | 0    | 0   | 0    | 0.1  | 0   |

Det bör noteras att vissa av provbitarna är tillverkade genom stränggjutning men i konstruktionen i stenkrossen behöver de tillverkas genom sandgjutning. Det här gör att vissa av materialen som använts i testerna kan ha en hårdhet som är upp till 30 % högre än vad de har då de tillverkas med sandgjutning. Anledning till att vissa är tillverkade med stränggjutning är för att de ej gick att få tag i sandgjutna, men enligt Johnsson metall skall det ej påverka glidegenskaperna. Skillnaden i hårdhet påverkar slitagehastigheten, enligt Archards nötningskvation som beskrivs i kapitel 2.4.1.2.

Provbitarna skars ut ur med trådnistning. Därefter finfrästes ytan och radien till ytan. Den bärande ytan på provbiten tillverkades till  $15 \times 15$  mm vilket gav en area på  $225 \text{ mm}^2$ . Radien vid kanten på ytan är 1.5. Provbitarnas kant till ytan slipades till lite lätt genom att provbitarna drogs för hand några drag mot ett slippapper. På provbitarnas ytor finns det repor från finfräsningen. Provbitarna kördes med reporna tvärs mot dragriktningen. Ytfinheten på provbitarna uppmättes till  $R_a$  0.1-0.3  $\mu\text{m}$ .

#### **4.1.1 Motgående material.**

Materialet som provbitarna dras mot skall motsvaras av den mellanliggande stål-skivan i glidlagret som tillverkad av stål SS2541 (34CrNiMo6). Sex stycken stålbitar med dimensionerna  $60 \times 40 \times 450$  mm i materialet 817M40 med närmast motsvarande standard SS2541 (34CrNiMo6) beställdes av B.B.S stål. Stålbitarna är varmvalsade och seghärdade [30]. Stålbitarna bearbetades sedan i en slipmaskin hos Sandvik för att ytfinheten  $R_a$  0.8 skulle fås.

## **4.2 Syfte med testerna**

Friktons- och slitage tester är ett billigt och effektivt sätt att undersöka ett flertal materials lämplighet. Alternativet är att bygga fullskaliga prototyper och testköra dessa vilket är betydligt mer kostsamt och tidskrävande. Det är även svårare att utvärdera resultatet då det inte fås precisa mätdata vid sådana tester. När ett material har funnits lämpligt i tester i en uppbyggd testmiljö är det nödvändigt att köra materialet i fullskalig prototyp för att verkligen kunna utvärdera om det kommer fungera eller inte. Leverantörer har inte information om hur friktionen och slitaget skiljer sig mellan deras olika legeringar vilket gör det väldigt värdefullt att köra en analys av materialen först innan det används till en fullskalig prototyp.

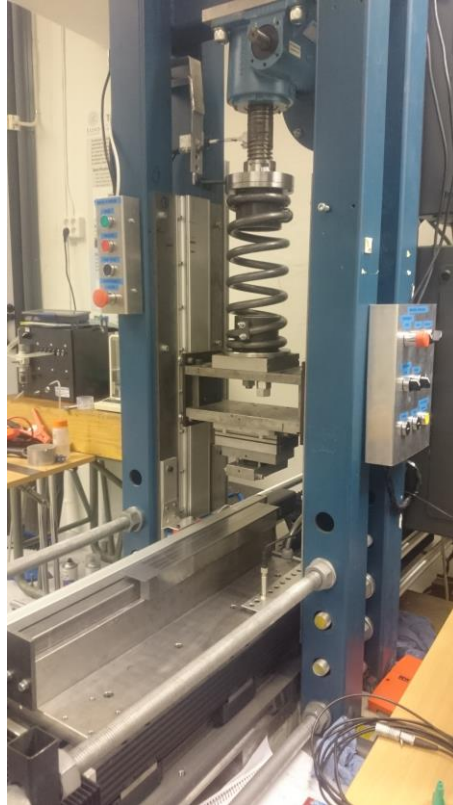
## **4.3 Beskrivning av testutrustning**

#### **4.3.1 Alicona**

Alicona är ett optiskt mikroskop som tar bilder i olika skikt och bygger upp en tredimensionell modell av ytan med hjälp av bilderna. Den här modellen används för att beräkna ytjämnhet och bärigheten för ytan. Begränsningarna vid användningen av Alicona liknar ett vanligt optiskt mikroskop, det vill säga att alltför små vinklar eller områden med väldigt hög eller väldigt låg reflektion kan inte observeras och därmed inte återskapas i den tredimensionella figuren. Det märks främst genom att vissa djupa hål i materialet ej går att undersöka.

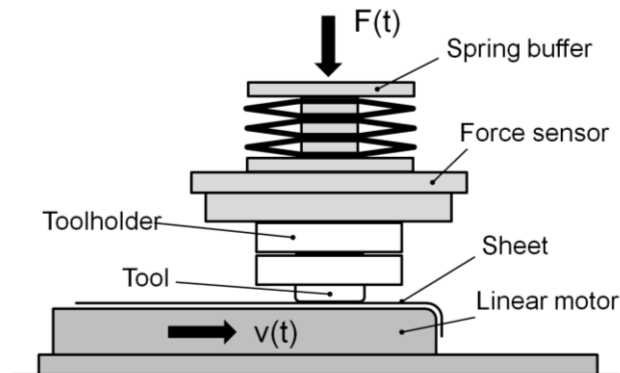
#### 4.3.2 Tribotester

Tribotester är en egenutvecklad testmaskin som är byggd för att mäta friktion eller nötning då en metallbit dras mot en annan metallbit med antingen ett statiskt eller dynamiskt tryck. I Figur 19 syns tribotestern snett framifrån.



**Figur 19** – Tribotestern [33].

Maxlasten i normalled som kan läggas på i maskinen är 10 kN. Det maximala trycket beror på verktygsgeometrin det vill säga arean av testmaterialet samt den inställda lasten. Verktygshållaren och lastmätningens anordning är designad för den maximala lasten vilket gör att verktygshållaren är utformad i en kraftig konstruktion som har en hög vikt. Lasten läggs på verktyget med hjälp av en fjäderkonstruktion. Konstruktionen har som syfte att minska inverkan av deformationer och ojämnheter. I Figur 20 syns tribotestens konstruktion.



**Figur 20** - Skiss över tribotestern [33].

Maskinen har en maximal dragsträcka på 600 mm och en maximal hastighet på 6m/s. Ju högre hastigheten är desto kortare blir mätsträckan, i med att en större del av sträckan används för att acceleration och inbromsning. Mätsträckan bör ej vara för kort eftersom det ger osäkra resultat.

Tribotestern har en maximal drag/framföringskraft på 6 kN och när den nås slås ett överspänningsskydd till och maskinen stannar. För att minska risken för skevhet det vill säga att belastningen är skev så finns det en sensorenhet som mäter skevheten. Det sitter en sensor framför verktyget och två sensorer bakom det i form av en tripod [31].

## 4.4 Beskrivning och motivering av testparametrar

### 4.4.1 Friktion

Friktionstesterna utfördes genom att provmaterialen testades under fyra olika tryck och fyra olika hastigheter. Testerna genomfördes som en 4\*4 matris så 16 olika förhållanden provades för varje material. I Tabell 2 syns de olika trycken och hastigheterna i testmatrisen. Lasten under testerna var statisk.

**Tabell 2** - Testmatris.

|          | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s |       |        |        |        |
| 0.2 m/s  |       |        |        |        |
| 0.4 m/s  |       |        |        |        |
| 0.8 m/s  |       |        |        |        |

Testerna i matrisen genomfördes från vänster till höger, uppifrån till ner för samtliga provmaterial. Draglängden var 100 mm för översta raden med hastigheten 0.05 m/s. För övriga rader var draglängden 390 mm.

I det verkliga glidlagret så har det beräknats och uppskattas för en av modellerna att trycket är 16 MPA och medelhastigheten är 0.8 m/s. Under testerna var syftet att skapa det här förhållandet när testparametrarna valdes. På grund av begränsningar i maskinen kunde inte högre hastigheter än 0.8 m/s testas med ett bra resultat. Hastigheten 0.8 m/s för glidlagret är hastigheten mitt på radien det vill säga hastigheten mitt mellan ytterkanten och centrum i glidlagret. Hastigheten i en roterande cirkulär skiva är olika beroende på var på radien hastigheten mäts upp. De lägre hastigheterna som används under testerna bör därmed finnas i lagret och är därmed intressanta.

Trycket som kan uppnås under testningen är beroende av ytan på provmaterialet. En mindre yta på provmaterialet får en del negativa konsekvenser och därav anpassades ytan så att trycket 25 MPA blev det högsta.

För varje plats i matrisen genomfördes fyra dragningar per provmaterial. Spridningen är relativt stor mellan olika friktionsdrag under samma förhållande och därmed behövs det genomföras mer än ett friktionsdrag per förhållande. För varje drag som genomförs ändras materialet i provbiten och stålbiten. Materialet slits, deformationshårdnar och ytfinheten ändras. Om det genomförs för många drag per ruta i matrisen så kommer materialförändringar bli större felkällor när de olika hastigheterna jämförs. För att minska spridningar och felkällor är det optimala att ha en stor mängd stålbitar och flera provbitar av varje material. Då kan en stor mängd tester köras för varje testfall. Med hänsyn till tid och kostnader kunde testerna inte genomföra på det sättet.

Testerna valdes att genomföras torra, då det intressanta är att se hur materialet uppträder under torrfriktion. Det är när smörjningen fallerar som materialet riskerar att skära och det är då det behöver ha en låg friktion. Nackdelarna med att genomföra friktionstester med smörjning är att resultatet som fås visar vad friktionen är för oljan och inte för materialet. Det här är på grund av att oljan har större inflytande på friktionen än friktionsparametern för materialet vid en smord kontakt vilket beskrivs i kapitel 2.2. Felkällorna ökar även kraftigt vid en smord friktionstestning, då oljan måste mätas upp noggrant och fördelas på ett noggrant sätt för att det ska bli likvärt för de olika fallen.

Testerna genomfördes med syftet att vara torra. Men för att få ett stabilare resultat så torkades ytorna med en lätt oljefuktad trasa inför varje dragning i en ny ruta i matrisen. Efter att ytan torkats med en oljefuktad trasa torkades ytan torr med en torr trasa. Ytan upplevs med ögat och handen som ren men den har i själva verket oljepartiklar på sig. Efter varje drag torkades ytan ren med en torr trasa för att avlägsna bortnötta partiklar. Att en oljefuktad trasa drogs över ytan var fjärde drag hjälpte även till att få bort mer av nötningspartiklarna. Under testerna där olika tryck och hastighetsfall jämförs bör friktionen påverkas så lite som möjligt av bortslitet material. Visuellt kan det ses på trasan som används för att torka provytorna att det har lossnat spånor och partiklar.

#### 4.4.2 Nötning

Provbitarna och stålbitarna var samma under nötningstesterna som under friktionstesterna. Provbitarnas ytor frästes av efter friktionstesterna så att de skulle återfå sin ursprungliga ytfinhet och materialsammansättning.

Nötningstesterna genomfördes helt torra, och samtliga ytor torkades av med en trasa fuktad med sprit före och efter dragningarna. Provbitarnas vikt uppmättes på en våg före och efter testerna.

Trycket under nötningstesterna var 13.3 MPA, draghastigheten var 0.3 m/s, draglängden var 300 mm och antalet drag var 103 stycken. Provbiten rörde sig fram och tillbaka mot stålytan 103 gånger i ett svep utan att lyftas upp i mellan dragen.

### 4.5 Kommentarer angående metodiken vid testning

#### 4.5.1 Friktion

En del av dragningarna gav ett väldigt instabilt resultat och kördes då om direkt. Generellt behövdes dragningarna ofta göras om de första 3-4 gångerna då ett provmaterial skulle testas. Det här på grund av att vid de första dragen så kunde friktionen ändras 20 % per drag och då gjordes omdragningar tills friktionen hade stabiliserat sig. Anledningen till att materialet beter sig på det här viset kan vara att under de första dragen slits asperittoppar av och materialet deformationshårdnar något. Beskrivning av det här fenomenet sker i avsnitt 2.4.6 Nötningens tidsfaser.

C89325-provbiten och JM15-provbiten fick inga resultat för sista rutan i matrisen, det vill säga när trycket var 25 MPA och hastigheten 0.8 m/s. Det här beror på att det blev toppar i friktionskraften som utlöste överspänningsskyddet.

#### 4.5.2 Nötning

Vid slitagetesterna av JM7 så uppkom så kraftiga vibrationer i Tribotestern att testningen av materialet avbröts efter 19 cykler. Det här gjordes för att maskinen inte skulle skadas. Därav valdes det att inte göra friktionstester med JM7 i med att materialet visade sig så olämpligt under slitagetesterna. Nötningresultatet för JM7 togs fram genom att mäta slitaget efter 19 cykler och multiplicera det med 5.4. Det vill säga att det gjordes ett antagande att nötningen är linjär.

#### 4.5.3 Felkällor

När provbitarna studerades sågs det att endast halva ytan var sliten på vissa av dem, vilket innebär att materialet dras något ojämnt och att ytan belastas ojämnt. Det här resulterar i att det verkliga trycket kan skilja sig från det önskade trycket.

Vid slitagetesterna av JM15 så sjönk friktionskoefficienten med tiden. Det fenomenet noterades även vid friktionstesterna av JM15. Det här fenomenet gör att friktionskoefficienten blir lägre än vad det borde vara. Det gör att ju längre ner i testmatrisen för JM15 man studerar desto mer felmarginal finns det. Alltså bör

friktionskoefficienten vara högre för de högre hastigheterna än vad den uppmättes till.

Beroende på tribotesternas uppbyggnad och nuvarande konfiguration krävs det en viss last i normalled för att reducera inverkan av små variationer vad gäller ytjämnheter och initial snedställning i kontakten mellan de testade materialen. Då endast en storlek på provkropparna användes vid testerna resulterade detta i att resultaten för 5 MPa och möjligtvis för 10 MPa normaltryck kan ha fått större spridning och vara mindre korrekta än övriga som testats vid högre normaltryck

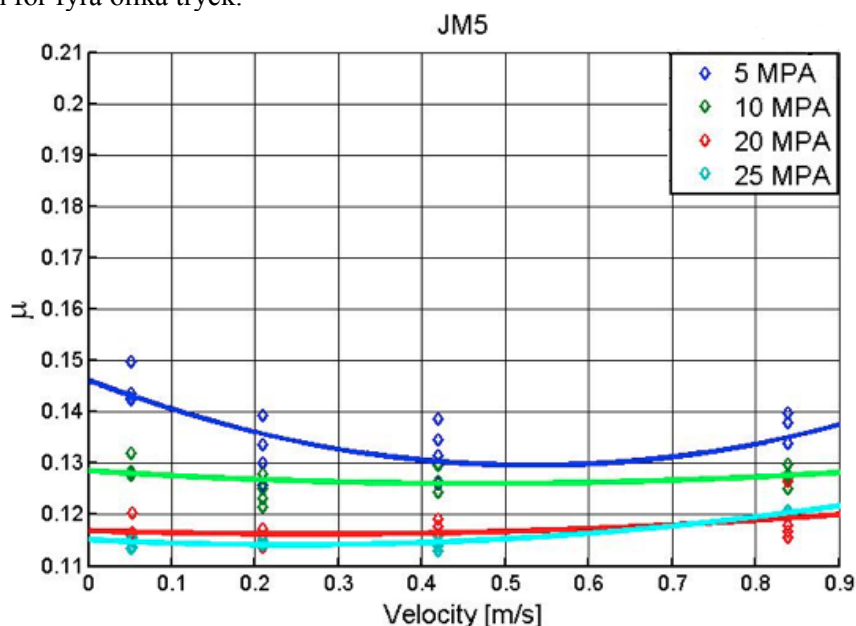


## Kap 5. Resultat

I kapitel fem presenteras resultaten från friktion- och slitagetesterna. Ett urval av friktionskurvorna presenteras i det här kapitlet medan resten redovisas i bilaga A.

### 5.1 Friktion

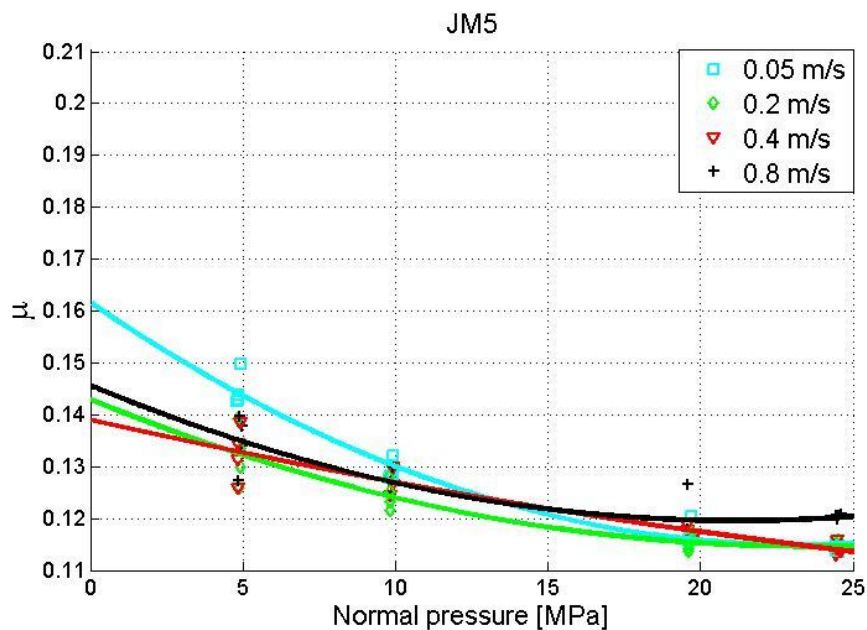
I Figur 21 syns det hur friktionskoefficienten för JM5 varierar beroende av hastigheten för fyra olika tryck.



**Figur 21** - Friktionskoefficienten för JM5 med hänsyn till hastigheten.

Att det är en spridning för mätpunkterna med samma tryck och hastighet beror på att mätutrustningen är väldigt känslig och har förmågan att mäta upp små skillnader i friktionskoefficienten. Friktionskoefficienten påverkas av minimala ändringar i ytfinhet, mängden oljepartiklar på ytan, om trycket är ojämnt fördelat, ytans hårdhet och andra faktorer. Det här gör att friktionskoefficienten inte är exakt samma för varje testdrag utan det blir en liten spridning i friktionskoefficienten.

I Figur 22 syns det hur friktionskoefficienten varierar beroende av trycket för fyra olika hastigheter. Resultatet av friktionstesterna för JM5 visar att friktionskoefficienten blir lägre då trycket ökar, samt att hastigheten har så liten påverkan att det inte går att dra några slutsatser. Graferna med friktionskoefficienterna för de övriga materialen finns i bilaga A.



**Figur 22** - Friktionskoefficienten för JM5 med hänsyn till trycket.

I tabell 3-6 visas medelvärdet av friktionskoefficienten för de fyra olika dragtesterna i varje plats i testmatrisen.

**Tabell 3** - Medelvärdet av friktionskoefficienten för JM5.

| JM5      | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 0,14  | 0,13   | 0,12   | 0,11   |
| 0.2 m/s  | 0,13  | 0,12   | 0,12   | 0,11   |
| 0.4 m/s  | 0,13  | 0,13   | 0,12   | 0,11   |
| 0.8 m/s  | 0,13  | 0,13   | 0,12   | 0,12   |
| Medel    | 0,14  | 0,13   | 0,12   | 0,12   |

**Tabell 4** - Medelvärdet av friktionskoefficienten för JM1.

| JM1      | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 0,18  | 0,18   | 0,16   | 0,16   |
| 0.2 m/s  | 0,18  | 0,17   | 0,16   | 0,15   |
| 0.4 m/s  | 0,17  | 0,17   | 0,16   | 0,15   |
| 0.8 m/s  | 0,17  | 0,17   | 0,15   | 0,15   |
| Medel    | 0,18  | 0,17   | 0,16   | 0,15   |

**Tabell 5** - Medelvärdet av friktionskoefficienten för C89325.

| C89325   | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 0,19  | 0,19   | 0,17   | 0,15   |
| 0.2 m/s  | 0,17  | 0,17   | 0,15   | 0,16   |
| 0.4 m/s  | 0,19  | 0,18   | 0,17   | 0,16   |
| 0.8 m/s  | 0,18  | 0,17   | 0,16   | -      |
| Medel    | 0,18  | 0,18   | 0,16   | 0,16   |

**Tabell 6** - Medelvärdet av friktionskoefficienten för JM15.

| JM15     | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 0,18  | 0,18   | 0,18   | 0,18   |
| 0.2 m/s  | 0,18  | 0,18   | 0,19   | 0,19   |
| 0.4 m/s  | 0,18  | 0,19   | 0,19   | 0,19   |
| 0.8 m/s  | 0,19  | 0,19   | 0,19   | -      |
| Medel    | 0,18  | 0,18   | 0,19   | 0,18   |

JM1, JM5 och C89325 har lägre friktionskoefficient för trycken 20 och 25 MPA jämfört med trycken 5 och 10 MPA. JM15:s friktionskoefficient påverkas inte märkbart av skillnaden i tryck. Hastigheten verkar ha en liten påverkan på friktionskoefficienten och det går inte att se ett mönster hur hastigheten påverkar friktionskoefficienten i det här testet.

I tabell 7-9 visas förhållandet mellan provmaterialens friktionskoefficient och den nuvarande legeringens friktionskoefficient.

**Tabell 7** - Medelvärdet av friktionskoefficienten för JM1 dividerat med JM5.

| JM1/JM5  | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 1,22  | 1,36   | 1,40   | 1,41   |
| 0.2 m/s  | 1,38  | 1,38   | 1,36   | 1,32   |
| 0.4 m/s  | 1,31  | 1,35   | 1,33   | 1,32   |
| 0.8 m/s  | 1,24  | 1,31   | 1,27   | 1,21   |
| Medel    | 1,29  | 1,35   | 1,34   | 1,31   |

**Tabell 8** - Medelvärde av friktionskoefficienten för C89325 dividerat med JM5.

| C89325/JM5 | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|------------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s   | 1,34  | 1,50   | 1,49   | 1,34   |
| 0.2 m/s    | 1,29  | 1,37   | 1,33   | 1,36   |
| 0.4 m/s    | 1,44  | 1,43   | 1,43   | 1,39   |
| 0.8 m/s    | 1,33  | 1,36   | 1,34   | -      |
| Medel      | 1,35  | 1,42   | 1,40   | 1,36   |

**Tabell 9** - Medelvärde av friktionskoefficienten för JM15 dividerat med JM5.

| JM15/JM5 | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s | 1,26  | 1,36   | 1,54   | 1,53   |
| 0.2 m/s  | 1,35  | 1,47   | 1,61   | 1,62   |
| 0.4 m/s  | 1,36  | 1,48   | 1,58   | 1,65   |
| 0.8 m/s  | 1,41  | 1,48   | 1,63   | -      |
| Medel    | 1,34  | 1,44   | 1,59   | 1,60   |

Samtliga legeringar har betydligt högre friktionskoefficient än den nuvarande legeringen. Provmaterialens friktionskoefficienter skiljer sig inte så mycket åt mellan varandra, om man jämför med hur mycket de skiljer sig mot standardlegeringen. JM15:s friktionskoefficient skiljer sig dock från de andra legeringarna vid trycken 20 MPA och 25 MPA.

I Tabell 10 jämförs friktionskoefficienten för C89325 och friktionskoefficient för JM1. C89325 har endast cirka 4 % högre torrfriction än JM1.

**Tabell 10** - Medelvärde av friktionskoefficienten för C89325 dividerat med JM1.

| C89325/JM1 | 5 MPA | 10 MPA | 20 MPA | 25 MPA |
|------------|-------|--------|--------|--------|
| 0.05 m/s   | 1,10  | 1,10   | 1,07   | 0,95   |
| 0.2 m/s    | 0,93  | 0,99   | 0,97   | 1,03   |
| 0.4 m/s    | 1,10  | 1,06   | 1,08   | 1,05   |
| 0.8 m/s    | 1,08  | 1,04   | 1,05   | -      |
| Medel      | 1,05  | 1,05   | 1,04   | 1,01   |

## 5.2 Nötning

Hårdheten mättes upp för provbitarna och resultatet visas i Tabell 11. I tabellen visas även riktvärdet för hårdheten som har angivits av tillverkaren.

**Tabell 11-** Hårdhet för provbitarna.

| Legering | Uppmätt hårdhet (HB) | Angiven hårdhet (HB) |
|----------|----------------------|----------------------|
| JM5      | 28                   | 60                   |
| C89325   | 48                   | -                    |
| JM1      | 32                   | 65                   |
| JM15     | 80                   | 120                  |
| JM7      | 86                   | 150                  |

Resultaten skiljer sig mycket från det förväntade resultatet. Därav kalibrerades mätutrustningen och provbitar med kända hårdheter kontrollmättes. Mätutrustningen visade inga felaktigheter, så resultaten för mätningen av provbitarna antas vara korrekt. Felmarginalen vid mätningen ligger på 2 %.

I Tabell 12 visas resultatet av slitagetestet.

**Tabell 12 –** Resultat av slitagetest.

| Legering | Densitet (kg/dm <sup>3</sup> ) | Hårdhet (HB) | Vikt före (g) | Vikt efter (g) | Material-förlust (mg) | Nötnings-motstånd |
|----------|--------------------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| JM5      | 8.9                            | 28           | 94.4367       | 94.4278        | 8.9                   | 2                 |
| C89325   | 8.9                            | 48           | 93.2676       | 93.2642        | 3.4                   | 1                 |
| JM1      | 8.8                            | 32           | 94.8394       | 94.8273        | 12                    | 3                 |
| JM15     | 8.3                            | 80           | 80.5532       | 80.5334        | 19.8                  | 4                 |
| JM7      | 7.6                            | 86           | 80.5958       | -              | 22.8                  | 5                 |

Vid slitagetesterna av JM5 och JM1 bildades det en hög med spånor och bortnött material. Det såg ut att vara mest bortnött material för JM5 och sedan JM1. Vid körningen av C89325 syntes även en del bortnött material men inte så mycket. Vid körningen av JM15 och JM7 syntes inget bortnött material alls. Istället noterades att stålbitens yta var förändrad i färg och ytfinitet. Det leder till tolkningen att det bortnötta materialet från JM15 och JM7 kletar fast på stålbiten och bildar en ytbeläggning.

Vid körning av JM15 sjönk friktionen med tiden. Det här beror troligtvis på att det bildas en ytbeläggning på stålbiten så att materialet JM15 dras mot förändras med tiden. Vid slitagetesterna av JM5, JM1, C89325 så steg friktionen med tiden.

Vid körning av JM15 uppstår det vibrationer i Tribotestern men de var inte lika kraftiga som vid körning av JM7. Vibrationerna noterades inte vid körning av JM5, JM1 och C89325.

### **5.2.1 Provbitarnas ytor efter nötningstest**

Provbitarnas ytor undersöktes i mikroskop efter nötningstesterna. För de mjukare legeringarna JM5, JM1 och C89325 så syntes spår i ytorna. Spåren hade karaktären att det ser ut som det att hårda partiklar har repat ytan och gett upphov i de här spåren eller fåror av bortslitet material. För de hårdare legeringarna JM15 och JM7 syntes inte det här utan de ytorna var med jämnt slitna.

Då provbitarnas ytor är väldigt blanka och reflekterar mycket ljus är det svårt att få till bra bilder på ytorna trots att de syns bra i mikroskopet. Bilderna på provbitarnas ytor efter nötningstesterna finns i Bilaga B.

## 6. Analys och diskussion

*I det här kapitlet analyseras testresultaten, konstruktionen och material som inte är lämpliga att använda.*

### 6.1 Analys av testresultaten

Legeringen JM1 som används i en del lager har betydligt högre friktion än standardlegeringen JM5, men legeringen verkar ändå fungera i konstruktionen. Legeringen med vismut har i genomsnitt 4 % högre friktion än JM1 vilket är lite i sammanhanget då JM1 har i genomsnitt 32 % högre friktion än legeringen JM5. Därav är det ytterst troligt att vismutlegeringen med 4 % högre friktion än JM1 borde fungera i konstruktionen men hänsyn till friktionsegenskaperna.

Den uppskattade friktionen med smörjning ligger på 1 % medan torrfriktionen för standardlegeringen ligger på 12 %. Med tanke på att det är en viss friktion när smörjningen fungerar så inser man att torrfriktionen är en mindre andel av den totala tiden, och skulle kunna uppskattas till 5-10 % av tiden. Det gör att en ökning på 4 % i torrfriktion gör att den totala friktionen ökar med mindre än 4 %. En ökning på 4 % bör inte ställa till problem för motorn som driver stenkrossen, samt bör det ge en så pass liten påverkan på temperaturgenereringen i lagret att kylsystemet bör klara av ökningen.

Det avgörande är om lagermaterialet klarar miljön i konstruktionen och det bör testas med en verklig prototyp. Då underlaget för användning av brons innehållandes vismut är begränsat så bör det genomföras tester med en fullskalig prototyp för att undersöka hur materialet fungerar i den verkliga konstruktionen och fall det uppkommer några problem med materialet.

Undersökningen av det skadade lagret visade på korrosionsattacker i korngränserna. Korrosionsattackerna misstänks i rapporten orsaka en förhöjd nötning. Vismut ökar korngränssprödheten men tennet i legeringen skall minska den här effekten. Det här motiverar ytterligare att vismutlegeringen bör testas i den verkliga miljön och att undersökningar av materialet efter användning bör genomföras.

Vismutlegeringen fick väldigt bra resultat i slitagetestet och var betydligt bättre än standardlegeringen. Det här resultatet behöver utvidgas med fler slitagetester under andra tryckförhållande och under längre tidsperioder för att det med säkerhet skall gå att säga att vismutlegeringen har bättre slitagemotstånd än standardlegeringen. Men resultatet av slitagetesterna motiverar ytterligare att det bör byggas en fullskalig prototyp av vismutlegeringen.

Legeringen JM7 gav upphov i så kraftiga vibrationer att testerna valdes att avbrytas. Anledningen till vibrationerna bör vara att legeringen har en högre hårdhet än de andra. JM15 har också en betydligt högre hårdhet vilket också gav upphov i

vibrationer i maskinen under nötningstesterna. Antagandet kan göras att det troligtvis kommer uppstå liknande vibrationer i stenkrossen om de här legeringarna används som lagermetall. Vibrationer i maskiner är något man vill undvika då det sliter kraftigt på maskinen och olika delar riskerar att gå sönder eller försvagas av utmattningsnötning.

Ju lägre hårdhet en legering har desto mjukare är den vilket gör att den tar upp vibrationer och deformeras istället för att ge upphov till vibrationer. Ett maxvärde för hårdheten på lagermaterialet går inte att avgöra med de här testerna. Slutsatsen kan dock dras att legeringar med en hårdhet på över 80 HB inte bör användas i konstruktioner som är känsliga för vibrationer.

Legeringen JM15 slets betydligt mer än standardlegeringen och gav även upphov till oönskade vibrationer. Det här gör att legeringen kan avfärdas som lagermaterial till den här konstruktionen.

JM15 reagerade med stålet under slitagetesterna och material överfördes från JM15 till stålytan istället för att nötas bort. Det här är anledningen till att friktionen sjunker under slitagetesterna av JM15. Friktionsfallet går från att vara JM15 mot stål till att vara friktionsfallet JM15 mot stål med ett ytskikt av JM15 eller någon reaktionsprodukt.

Avsaknandet av bortnött material för JM15 gör att det sker en annan nötningsmekanism vid nötningstestet av JM15 än JM1 och JM5. Att det sker en annan nötningsmekanism är troligtvis anledningen till att JM15 hade sämre slitagemotstånd än JM1 och JM5 trots att legeringen JM15 har en högre hårdhet. En högre hårdhet skall enligt Archards nötningsekvation ge en lägre nötningstakt. Det går inte att avgöra om JM15 kommer ha samma höga slitagehastighet i den verkliga konstruktionen i med att då är smörjolja närvarande och det kan påverka nötningsmekanismen.

Under slitagetesterna stiger friktionskoefficienten för JM5, JM1 och C89325 med tiden. Det kan antas att friktionskoefficienten även ökar med tiden i den verkliga konstruktionen, men antagligen inte lika snabbt.

Resultatet av slitagetesterna bör inte tolkas alltför exakt i med att det kan skilja sig mellan olika testmaskiner, det verkliga fallet och olika parametrar. Därmed kan man inte anta att en legering har dubbelt så högt slitagemotstånd om den slets hälften så mycket under de här testerna. Det som man kan ta med sig från slitagetesterna är den ordning som de olika materialen uppvisar när det gäller slitagemotstånd. Den ordningen bör stämma bra även i det verkliga fallet, men kan påverkas om något material är mer reaktionsbenäget med smörjoljan.

JM5:s hårdhet visade sig vara ungefär hälften av det som förväntades vid hårdhetsmätningen. Det går inte att dra några slutsatser om vad hårdheten är för brons-

lagerdelarna, men det är viktigt att utreda hårdheten på de bronslagerdelarna som levereras. Hårdheten är sammankopplat med slitagemotståndet och teoretiskt sätt så skall en halverad hårdhet leda till dubbelt så mycket slitage. Därav är det viktigt att veta den faktiska hårdheten för lagerdelarna i med att den påverkar livslängdskostnaden för lagerdelarna. Kan man säkerställa en högre hårdhet för sitt bronslagermaterial än vad konkurrenterna kan göra för samma material så får man en stor konkurrensfördel.

## 6.2 Analys av konstruktionen

Smörjspåren saknar avgradning mot bärytan vilket är rekommenderat att ha. Avgradningen av kanterna gör att smörjfilmen byggs upp lättare och saknandet av avgradning ger en skarp kant som kan ha en skärande effekt under körning. Att material slits bort vid smörjkanalernas kanter som sågs vid undersökningen av det skadade lagret motiverar att man borde avgrada smörjkanalernas kanter. Motivet för att inte ha avgradning är för att den bärande ytan blir mindre om en del av den används för avgradningen. För att inte tappa så mycket av den bärande ytan så skulle endast den sidan av smörjspåret kunna avgradas. Då bör den bakre kanten i glidriktningen väljas då oljan har lättast att tränga ut från den sidan då den får hjälp av centrifugalkraften. Samt så är det på den sidan som kanten har en skärande effekt. Fördelen med ett hårdare material med högre bärighet är att de klarar ett högre tryck vilket medför att en större andel av glidytan kan användas till smörjkanaler vilket förbättrar friktionen.

Smörjspåren är breda och har inte något stopp i slutet. Det gör att motståndet för oljan då den rör sig i spåren och ut från lagret är litet. Det här borde göra att oljan är mindre benägen att tränga upp ur spåren och skapa en bärande smörjfilm. Smörjspåren skulle kunna göras smalare eller smalna av mot slutet så att utloppet blir mindre. Görs smörjspåren smalare så kan de avgradas utan att den totala bärytan blir mindre.

Smörjningen bör vara bäst i mitten av lagret men ändå är skadorna på det skadade lagret störst i mitten. Det här kan bero av olika faktorer, en faktor som det kan bero på är att, själva kontaktytan bara är i centrum så att ytterkanten ej är i kontakt och därmed inte skadas. Lagerna slipas in kalla, så kontaktytan optimeras då lagerna är kalla. Hur passformen ändras då lagerna värms upp och når sin arbetstemperatur är inte känt. Kontaktytan skulle kunna minska då lagerna värms upp vilket skulle kunna orsaka skador på lagret på grund av att trycket blir högre. Det här problemet skulle då främst gälla för det översta lagret som inte har en plan yta utan en svagt rundad yta.

Det kan antas att smörjningen i stenkrossen är blandfilmssmörjning på grund av det kraftiga slitaget som förekommer. Alternativet skulle vara att det råder fullfilmssmörjning men att slitaget skulle bero på att de kraftiga vibrationerna och stötarna från stenarna skulle ge upphov i sådana kraftiga stötar att stålaxeln bryter igenom smörjfilmen och tillfälligt går torrt. Det här alternativet är mindre troligt.

Att det råder blandfilmssmörjning i konstruktionen innebär att fallet troligtvis ligger mellan punkt B och A i Stribeck diagrammet. Det generella för Stribeck diagram är att i blandfilmsregionen så minskar friktionen ju längre åt höger på x-axeln man befinner sig. Höjs vinkelhastigheten så sjunker friktionen på grund av att smörjningen förbättras. Därav hade det varit intressant att höja vinkelhastigheten för axeln och undersöka om smörjningen förbättras. Vid en högre vinkelhastighet fås effekter av en hydrodynamisk smörjning som adderas till den statiska smörjningen.

Det går inte med säkerhet säga att konstruktionen kommer förbättras genom att höja vinkelhastigheten. Man kan anta att konstruktörerna av glidlagren fokuserar på PV-värdet när de konstruerar och rekommenderar glidlager. Det som kan missas om man fokuserar på PV-värdet är att vid en relativt låg hastighet så förbättras smörjningen om hastigheten ökas. Vid fokus på PV-värde försöker man minska trycket eller hastigheten.

Friktionskoefficienten och slitaget ökar när temperaturen ökar. Vid höga temperaturer är friktionen mycket högre vilket leder till att temperaturen ökar ytterligare och risken för haveri ökar. Därför skulle man kunna lägga till en programvaran till styrningen av krossen med funktionen att när returoljan når upp till en viss temperatur så stoppas matningen av sten till krossen och den körs obelastad ett tag för att temperaturen i glidlagerna skall sjunka och risken för haveri minskas. Om man kan förhindra ett haveri genom att köra krossen obelastad 5 minuter så bör det vara ekonomiskt lönsamt i med och mot, stilleståndet bör bli mindre då än om lagerdelarna behöver bytas ut för att de har havererat. Dessutom sparas det pengar på lagerdelar då livslängden kan förlängas.

### **6.3 Analys av olämpliga material**

Kullager har låg friktion utan att innehålla bly men har en hög inköpskostnad. På grund av att lagret i stenkrossen utsätts för stötar och vibrationer i en stor utsträckning är konstruktionen inte lämplig för kullager.

Sintrade material kan avfärdas för Sandviks applikation då tillverkningsmetoden för sintrade material är mycket dyrare än gjutning. Dessutom är hållfastheten för sintrade material begränsad och för låg för att vara lämplig. En annan nackdel med sintrade lager som gör de olämpliga är att det är svårt att bearbeta godset och efterbearbetning helst skall undvikas.

Ytlegeringar är väldigt tunna och de flesta går inte att göra tjockare än 0.2 mm. I nuläget slits lagerdelarna ner totalt cirka 15 mm innan de byts ut. Om ett glidlager med ytbeläggning ligger prismässigt på samma nivå som det nuvarande materialet innebär det att de behöver vara cirka 40 gånger så slitstarkt för att det skall ha samma kostnad. Ett material med ytbeläggning blir troligtvis dyrare än det nuvarande materialet då processen att lägga på ett ytskikt blir ett extra moment som

kostar pengar, vilket gör att materialet behöver vara ännu slitstarkare för att kunna konkurrera med det nuvarande materialet. Det är inte troligt att materialen med ytbeläggning är så slitstarka som de måste vara för att vara ett alternativ ut kostnads synpunkt och dessutom har de flesta ytbeläggningar dålig bärförmåga. På grund av de här anledningarna avfärdas material med ytskikt som lämpliga till konstruktionen.

Det förväntas att zinklegeringen har högre friktion än bronslegeringen, därför känns det lite märkligt att ZAS35 legeringen skulle få lägre friktion än bronslegeringen med 7 % bly genom värmebehandlingen av legeringen ZAS35. Det gick inte att hitta någon information om den här legeringen någon annanstans vilket gör att resultaten i artikeln inte kan verifieras. Det är rimligt att materialtätheten och materialstrukturen har en inverkan på friktionsegenskaperna och att det förändras av värmebehandling. Men man bör ha i åtanke att resultaten kan ha överdrivits för att ge en mer fördelaktig bild av legeringen ZAS35.

Att en legering har bättre slitagemotstånd kommer på bekostnad av någonting annat, det kan till exempel vara att friktionsegenskaperna blir sämre eller att motgående material slits mer. Tillverkningsmetoden med värmebehandling är tidskrävande och medför ökade kostnader. Zinklegeringarna klarade högre laster än bronslegeringen men det medför även nackdelen att legeringar är hårdare vilket gör de sämre på att ta emot stötar och vibrationer.

## 6.4 Övrigt

Gjutmetoden påverkar hur djup det yttre tätare skiktet blir. När det tätare yttre skiktet har slitits ner kan slitagehastigheten ändras. Det hade varit intressant att studera skillnaden i slitagehastighet för det yttre tätare skiktet och materialet innanför skiktet. Lagret tillverkas med sandgjutning men vid stränggjutning blir gjutgodset tätare och det får en bättre mikrostruktur. Enligt leverantören av lagret skall gjutmetoden inte påverka glidegenskaperna, men det är troligtvis en förenkling av verkligheten. Materialets täthet och mikrostruktur bör påverka materialets glidegenskaper och slitagemotstånd. Om gjutmetoden ger en så liten påverkan att det är försumbart eller inte är svårt att avgöra utan att genomföra tester.

Brons innehållandes bly har väldigt bra skäregenskaper som tillåter höga skärhastigheter då blyet fungerar som spånbrytare och förbättrar skäregenskaperna. Väljs ett material utan bly kan bearbetningen försvåras, vilket ökar kostnaden och bearbetningstiden.

Om man blir av med blyet i glidlagret minskar en del kostnader vid tillverkning och återvinning. Dock kan det tillkomma kostnader för tillverkaren av glidlagret för att avskilja blyet ur legeringarna. Ett alternativt material kommer troligtvis vara dyrare än dagens då brons är en billig legering och tillverkas av sandgjutning vilket är en relativt billig tillverkningsmetod. Sandviks kostnader för blyhantering är inte

särskilt höga, så för Sandvik blir vinsten andra aspekter än ekonomiska då bly slutar att användas.

Det är blyet som ger den smörjande effekten i bronslegeringar och vismut skall motsvara blyet i vismutlegeringar. Det är därför logiskt att en legering innehållandes 2.7 % av en smörjande komponent inte kommer ha samma friktionsegenskaper som en legering som innehåller 5 % eller 10 % av en smörjande komponent. För att vismutlegeringen skall kunna ha lika bra friktionsegenskaper som bronslegeringar innehållandes bly så behöver vismuthalten höjas. Hållfastheten försämras troligtvis då vismuthalten höjs och det är därför legeringen innehållandes 2.7 % vismut rekommenderas som ersättare till brons innehållandes 10 % bly. Men det finns säkert möjligheten att höja vismuthalten en del och på så sätt förbättra friktionskoefficienten. Vismuthalten bör diskuteras med tillverkaren av legeringen, samt så bör det genomföras tester av legeringar med olika vismuthalt om man anser att det är intressant att gå vidare med materialet.

Lagerdelarnas ytfinhet mäts inte upp efter inslipningen och därmed vet man inte vad den är och hur mycket den varierar mellan olika lager. Hur ytfinheten påverkar friktionen vid torrfriktion och fullfilmsfriktion är dock inte helt klart, vilket gör att det har mindre betydelse att ytfinheten inte mäts upp. Dessutom förändras ytfinheten när lagerdelarna körs, och hur den förändras har inte heller studerats. Förändringen av ytfinheten för lagerdelarna under användning går inte att påverka vilket gör det mindre intressant att analysera hur det påverkar friktionen.

# Kap 7. Slutsats

*I det här kapitlet presenteras slutsatserna i arbetet och förslag till fortsatta studier.*

## 7.1 Rekommendation

Det går inte att avgöra om vismutlegeringen är lämplig att använda i stenkrossen utan att testa legeringen i den verkliga miljön och undersöka materialet efter användning. Vismutlegeringen har så bra slitagemotstånd samt så bra friktionskoefficient att det är ett lämpligt material med hänsyn till de aspekterna och därmed bör man gå vidare med legeringen. För att optimera vismuthalten kan tester med olika halter av vismut genomföras innan man väljer att testa legeringen i en stenkross.

Förbättras smörjningen i lagerkonstruktionen kan ett billigare blyfritt material väljas och livslängden förlängs mycket vid en förbättrad smörjning. Därav bör det undersökas om gradning skall återföras på smörjkanaler i lagret samt om kanalerna kan göras smalare.

Möjligheten att lägga in en programvara med syftet att begränsa temperaturen i glidlagerna bör undersökas.

Hårdheten på bronslagerdelarna bör undersökas. Visar det sig att hårdheten är lägre än förväntat bör man utreda fall det går att höja hårdheten genom ändringar av tillverkningsmetoden.

## 7.2 Slutsats

Bly sänker friktionskoefficienten mycket i bronslegeringar. Halveras blyhalten från 10 % till 5 % så ökar friktionskoefficienten med 30 %.

Lagermaterial och typer av glidlager som är olämpliga för konstruktionen är följande: kullager, material med ytskikt, sintrade material, material med en hårdhet över 80 HB och material med en fast inlagrad smörjande komponent.

Miljön som glidlagret i stenkrossen utsätts för gör att många lagermaterial är olämpliga för konstruktionen. Det gör det svårt att hitta något lämpligt material bland de material som finns på marknaden. Att brons innehållandes bly är ett billigt lagermaterial gör troligtvis att det har gjorts färre försök att ta fram ett ersättningsmaterial.

Friktion- och nötningstester är helt nödvändiga för att kunna avgöra om ett material kan vara lämpliga för en lagerkonstruktion. Utan friktionstester går det inte att jämföra material utan då får man förlita sig på tillverkares uppskattningar om fall materialet fungerar. Det går inte att jämföra olika tillverkares uppfattningar om deras material på ett bra sätt. Därmed har friktion- och nötningstesterna en viktig roll, då de ger faktiska värden på friktionen och nötningen. Då det inte går att

förutse exakt hur ett material beter sig i en viss miljö så friktion- och nötningstesterna måste kompletteras med tester av materialet i det verkliga fallet.

### 7.3 Förslag till fortsatt arbete

Det är problematiskt att beställa hem material för friktions- och slitage tester. De nya materialen som nämns i forskningsartiklar går inte att hitta någon leverantör till. Troligtvis beror det på att materialet inte har börjats användas kommersiellt och kanske inte kommer göra det.

Speciallegeringar som finns på marknaden lagerhålls sällan och de beställs med en låg frekvens av ofta en enda beställare. Problematiken i de fallen är att det inte går att beställa en mindre mängd för att användas i tester utan många gjuterier har en minimum beställningsgräns på 400 kg- 1000 kg. Till laborationer behövs inte mer än ett kg av materialet vilket gör det orimligt dyrt att beställa 1000 kg av ett material.

För att kringgå den här problematiken kan man gjuta intressanta legeringar själv i mindre skala. Det är dock svårt för speciallegeringar som värmebehandlas på ett speciellt sätt. Man kan även satsa på att samarbeta närmare med något universitet som bedriver projekt där liknande material studeras. Eller så kan man tillsammans med företag som har likande applikationer av glidlager finansiera ett forskningsprojekt för att undersöka blyfria glidlager.

Det hade varit intressant att mäta upp blykoncentrationen vid ytan för ett nytillverkat lager. På ett skadat lager har blyhalten mäts upp till ett betydligt lägre värde vid ytan av materialet än vid andra mätpunkter i materialet. Genom att mäta blykoncentrationen för ett oanvänt lager så kan man avgöra om den lägre blyhalten beror på att blyet fälls ut under körning eller om det är fenomenet mikrosegring som orsakar problem under tillverkningen och skapar en lägre blyhalt i ytan.

Vid fortsatta tester av material som kan vara lämpliga som lagermaterial, så hade det varit intressant att genomföra friktionstesterna med uppvärmda provbitar i med temperaturen påverkar friktionen mycket.

Det är även intressant att studera värmeutvecklingen under nötningstest och försöka koppla ihop den med nötningstakten. Det här kan man göra genom att mäta yttemperatur för provbitarna under testerna. Då materialens ytor är blanka går det inte att mäta med värmekamera. Istället kan temperaturmätningar genomföras genom att termoelement borras in i provmaterialet och placeras så nära provmaterialets yta som möjligt. Det här är endast intressant vid slitagetester. Vid friktionstesterna är det lång tid mellan dragen och så få drag att det inte upplevs vara någon temperaturskillnad på provbitarna om man tar på de för hand före och efter att testmatrisen har körts.

Friktion- och slitageegenskaper för ett materialpar som utsätts för nötning påverkas i stor grad av de ytdeformationer som uppkommer och de eventuella ytskikt som bildas i processen. Därmed är det intressant att studera deformationsdjupet i de olika provbitarna och se hur det skiljer sig åt mellan de olika materialen och hur deformationsdjupet påverkas av friktionskoefficienten och antalet testcykler.

Slitage förändrar ytors hårdhet och kan förändra den kemiska affinitet. De ingående komponenterna i de uppkomna reaktionsskikt som till exempel är oxidpartiklar, debris, smörjmedel kan förändra de tribologiska egenskaperna kraftigt beroende på vilken sammansättning de har. Ett stabilt skikt med rätt komponenter kan kraftigt förbättra friktion- och slitageegenskaperna för kontaktfallet medan en sammansättning av fel sort kan ge upphov till det motsatta.

Bildandet av tribologiska skikt är sammankopplat med de ingående materialen i processen där den kemiska sammansättningen av materialparen är av stor betydelse. För att öka kunskapen om de ingående beståndsdelarna i skikten och få en tydligare koppling mellan olika potentiella legeringar som kan användas i lagerapplikationer och dess friktions- och slitageegenskaper är det viktigt att de genererade tribologiska skikten studeras grundligt. Detta kan göras med till exempel elektronmikroskopering (SEM, TEM), EDX-analys eller micro/nano-hårdhetsmätning.



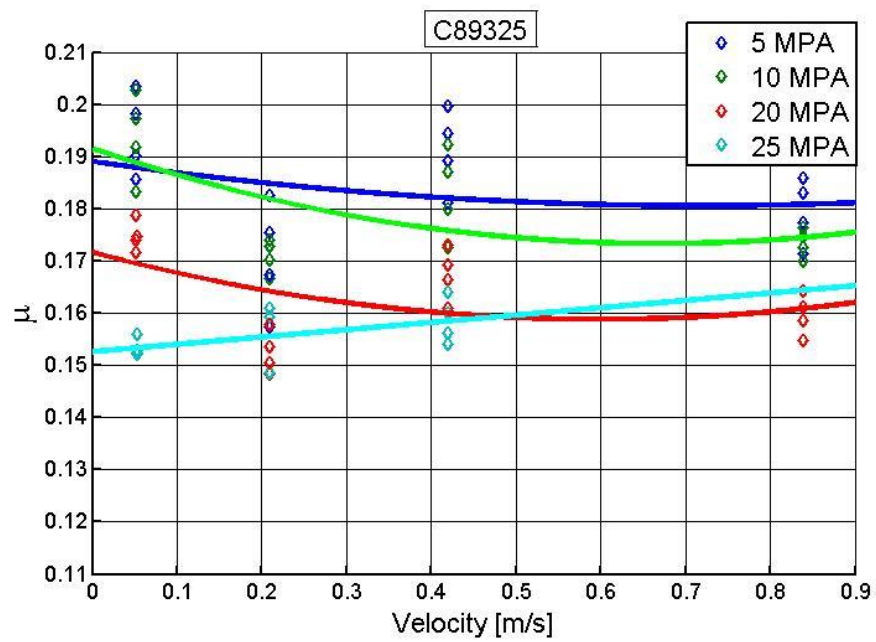
## 8 Referenser

- [1] "Företagsbeskrivning", hämtad från Sandvik AB 2015-11-05, <http://www.sandvik.com/sv/om-oss/vart-foretag/>
- [2] "Sandviks affärsområden", hämtad från Sandvik AB 2015-11-05, <http://www.sandvik.com/sv/om-oss/vart-foretag/affarsomraden/>.
- [3] Höst M., Regnell B. & Runesson P. Att genomföra examensarbete. Studentlitteratur, Lund 2006.
- [4] Olsson K. Maskinelement. Liber AB, Stockholm 2015.
- [5] Essinger I. Glidlager fettsmorda och självsmörjande. Johnson metall AB, Örebro 1989.
- [6] Vedmar L. & Jacobson B. Tribologi. KFS, Lund 2013.
- [7] Jacobson S. & Hogmark S. Tribologi friktion, smörjning och nötning. Liber Utbildning AB, Arlöv 1996.
- [8] Lindby S. Smörjspår i glidlager. Johnson metall AB, Örebro 1977.
- [9] Paulo Davim J. An experimental study of the tribological behavior of the brass/steel pair. Department of Mechanical Engineering Aveiro University, Aveiro Portugal 1999.
- [10] Hamrock B., Jacobson B. & Schmid S. Fundamentals of Machine Elements. McGraw-Hill Book Co, Singapore 1999.
- [11] Hagman L., Andersson S., Eriksson L., Folkesson A., Olofsson U., Söderberg L., Tisell C. & Wallentin L. Maskinelement Handbok. Institutionen för maskinkonstruktion Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm 2000.
- [12] Jiménez A.-E. A & Bermúdez M.-D. Friction and wear. Universidad Politécnica de Cartagena, Spain 2011.
- [13] Essinger I., Schäfer R. & Ahlenbäck T. Metaller för glidlager. Johnson metall AB, Örebro 1987.
- [14] "Fakta om bly", hämtad från nationalencyklopedin 2015-11-08, <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/bly>
- [15] "Fakta om blys skadliga effekter", hämtad från Läkartidningen 2016-01-15, <http://www.lakartidningen.se/Klinik-och-vetenskap/Klinisk-oversikt/2014/04/Tungmetaller-fortjanar-fortsatt-vaksamhet/>
- [16] "Fakta om beryllium", hämtad från nationalencyklopedin 2016-01-15, <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/beryllium>
- [17] "Fakta om antimon", hämtad från nationalencyklopedin 2016-01-15, <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/antimon>
- [18] "Fakta om glidlager BWG", hämtad från D&E glidlager specialisten 2016-02-22, <http://www.detrading.se/files/produkter/BWG-F/pdf/Produktblad-BWG.pdf>

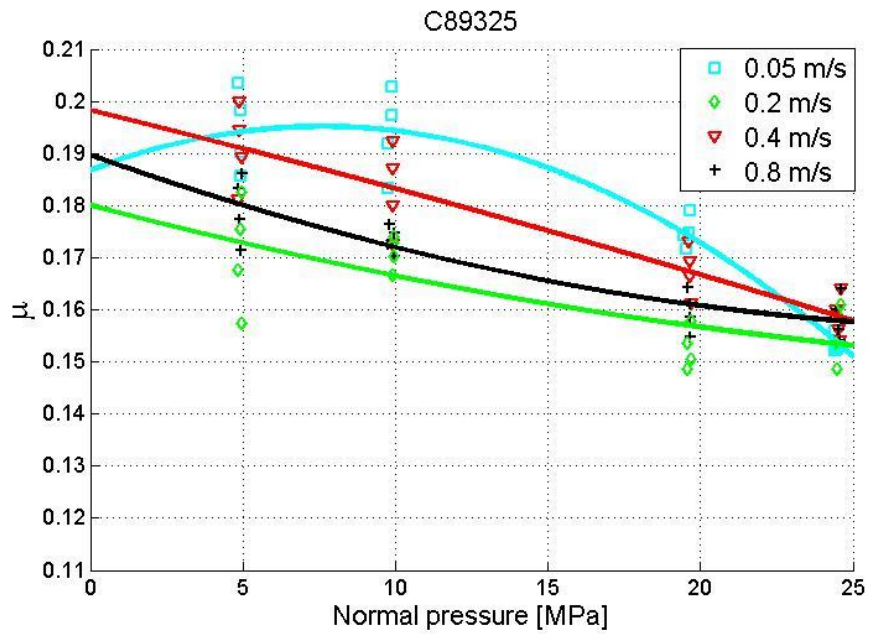
- [19] "Produktguide för lager med ytskikt", hämtad från SKF 016-02-02, <http://www.skf.com/binary/56-107917/SKF-composite-plain-bearings---11004-EN.pdf>
- [20] Thomson J., Zavadil R., Sahoo M., Dadouche A., Dmochowski W. & Conlon M. Development of a lead-free bearing material for aerospace applications. American foundry society, 2010.
- [21] "Artikel om vismut", hämtad från European Copper Institute 2015-11-18, <http://copperalliance.eu/resource-library?page=4>
- [22] Rohr O. Bismuth -the new ecologically green metal for modern lubricating engineering. Tribology, Vol. 54 Iss 4 pp. 153 – 164, 2002.
- [23] Haoran G., Xianfa T., Hongwei C., Chengdong L. & Peng Z. Antifriction and wear behaviour of ZAS35 zinc alloy: influence of heat treatment and melting technique. Shandong University, People's Republic of China, Augusti 2000.
- [24] Jarfors A., Carlsson T., Eliasson A., Keife H., Nicolescu C., Rundqvist B., Bejhem M. & Sandberg B. Tillverkningsteknologi. Studentlitteratur, Lund 2010.
- [25] Edberg M. "Kravställning på tryckplattor och lagerset." ÅF, Malmö 2014
- [26] Viklund P. "Failure investigation, bronze plate bearing, Sandvik Rock Processing". DEKRA Industrial AB, Svedala 2015.
- [27] Anders Åkesson, Sandvik SRP.
- [28] "Materialgudie", Johnson metall AB, Örebro 1989.
- [29] "Materialguide för vismutlegeringar", hämtad från The Federal Metal Company 2016-02-02, <http://www.federalmetal.com/bismuth-brass.htm>
- [30] "Produktbeskrivning av stål", hämtad från B.B.S stål & metaller 2016-02-02, <http://www.bbshalmstad.se/Page.asp?PageNumber=149>
- [31] Kirkhorn L. Instrumentation for tribological analysis of sheet metal forming operations. Division of Production and Materials Engineering, Lund 2015.
- [32] "Stenkrossbeskrivning", hämtad från Sandvik AB 2016-03-27, [http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Portals\\*5CProducts\\*5CCrushers\\*and\\*screens\\*2ACone\\*Crushers/\\$FILE/Cones.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Portals*5CProducts*5CCrushers*and*screens*2ACone*Crushers/$FILE/Cones.pdf) sida 19.
- [33] Bilder tagna av författaren i verkstan på intuitionen Industriell Produktion.

## 9 Bilagor

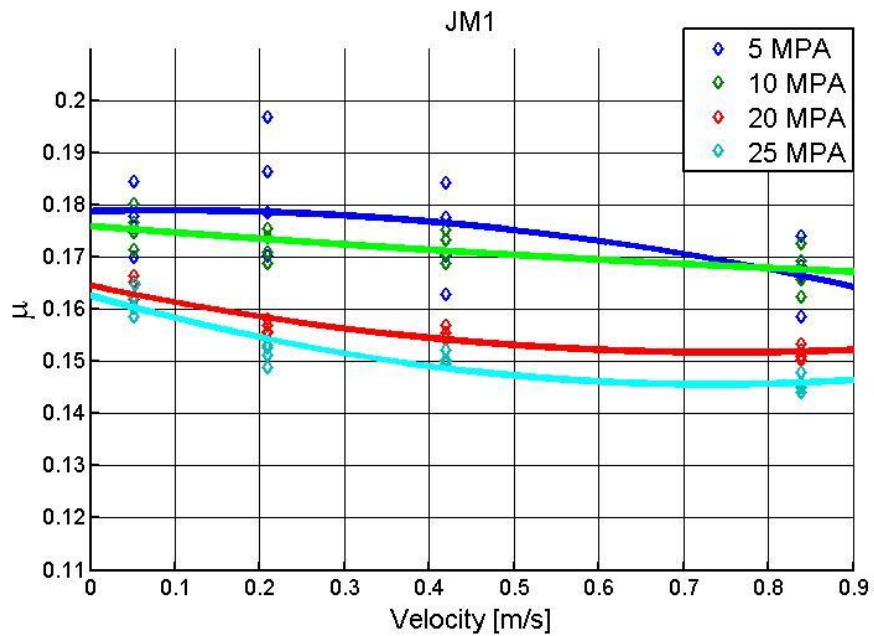
### Bilaga A



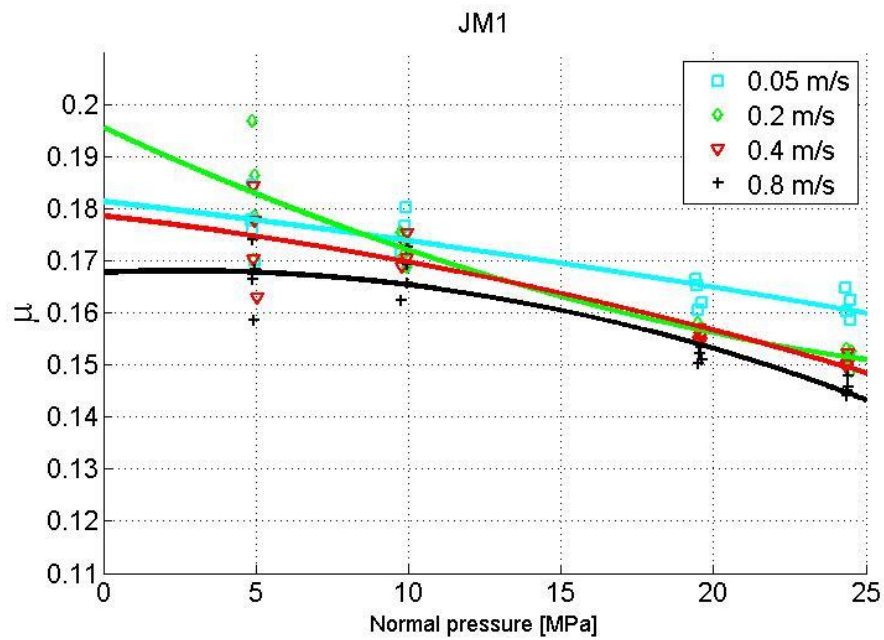
**Figur 23** - Graf över friktionskoefficienten för C89325 med hänsyn till hastigheten.



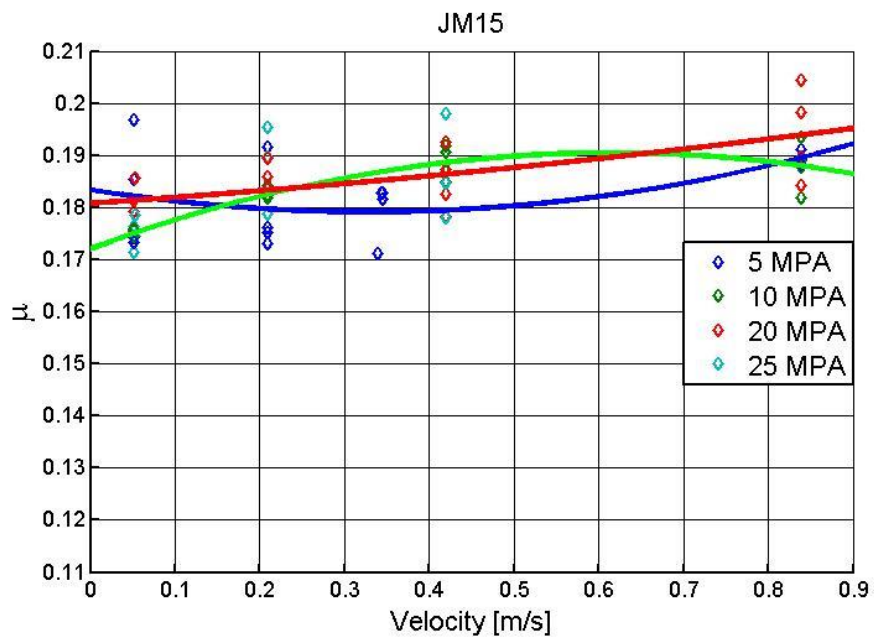
**Figur 24** - Graf över friktionskoefficienten för C89325 med hänsyn till trycket.



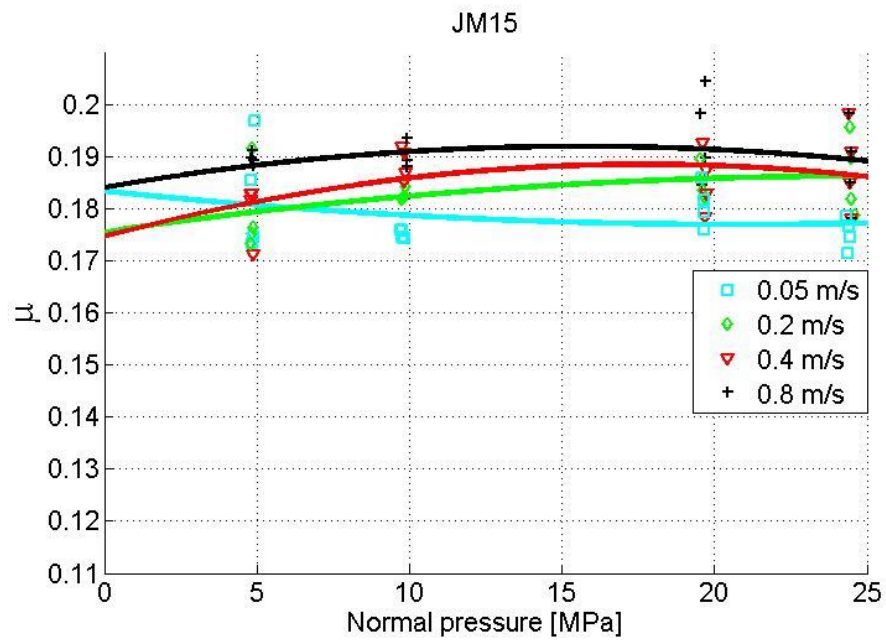
**Figur 25** - Graf över friktionskoefficienten för JM1 med hänsyn till hastigheten.



**Figur 26** - Graf över friktionskoefficienten för JM1 med hänsyn till trycket.



**Figur 27** - Graf över friktionskoefficienten för JM15 med hänsyn till hastigheten.



**Figur 28** - Graf över friktionskoefficienten för C89325 med hänsyn till trycket.

## Bilaga B



**Figur 29** – Ytan av JM1 efter nötningstest.



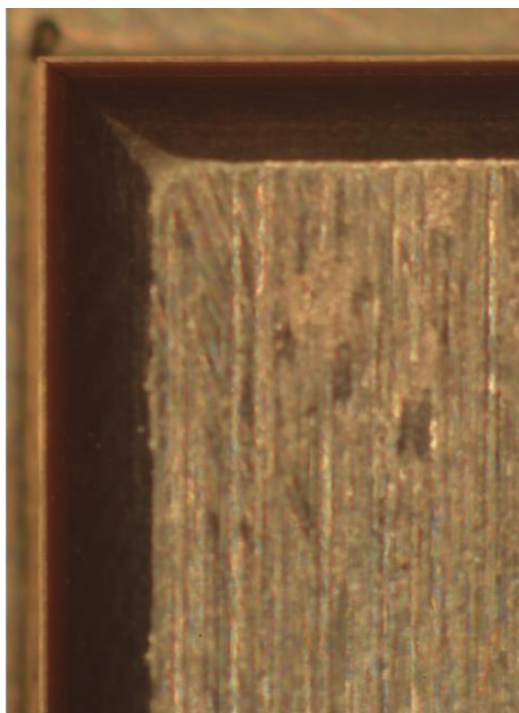
**Figur 30** - Ytan av JM1 efter nötningstest.



**Figur 31** – Ytan av JM5 efter nötningstest.



**Figur 32** – Ytan av JM5 efter nötningstest.



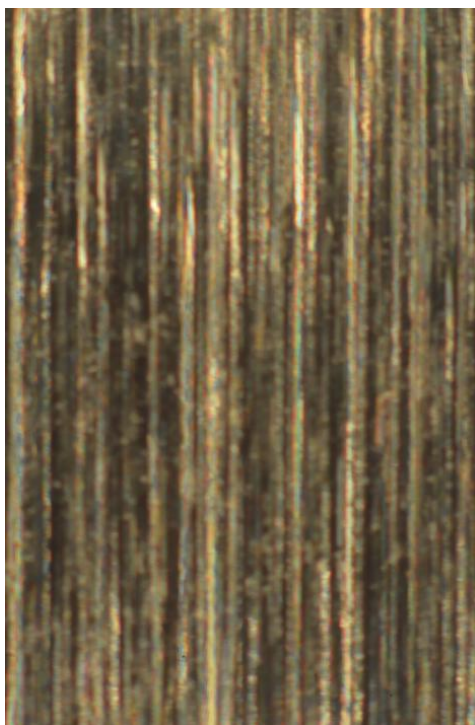
**Figur 33** – Ytan av C89325 efter nötningstest.



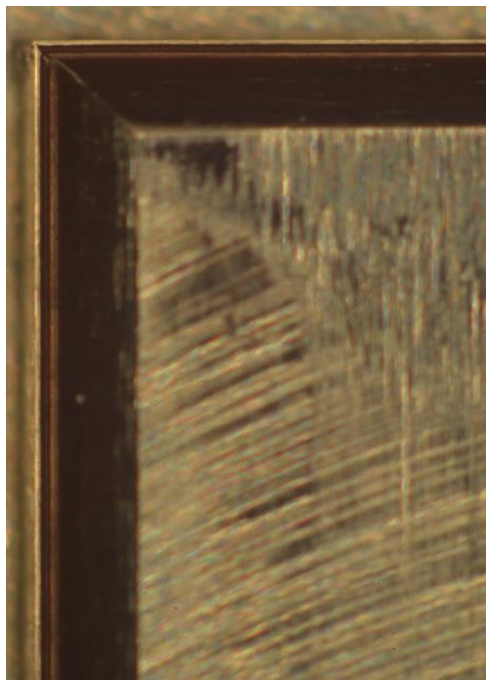
**Figur 34** – Ytan av C89325 efter nötningstest.



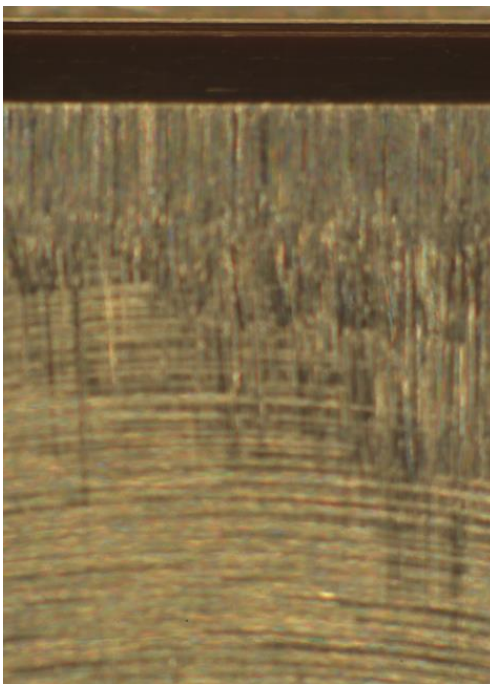
**Figur 35** - Ytan av JM15 efter nötningstest.



**Figur 36** - Ytan av JM15 efter nötningstest.



**Figur 37** - Ytan av JM7 efter nötningstest.



**Figur 38** - Ytan av JM7 efter nötningstest.