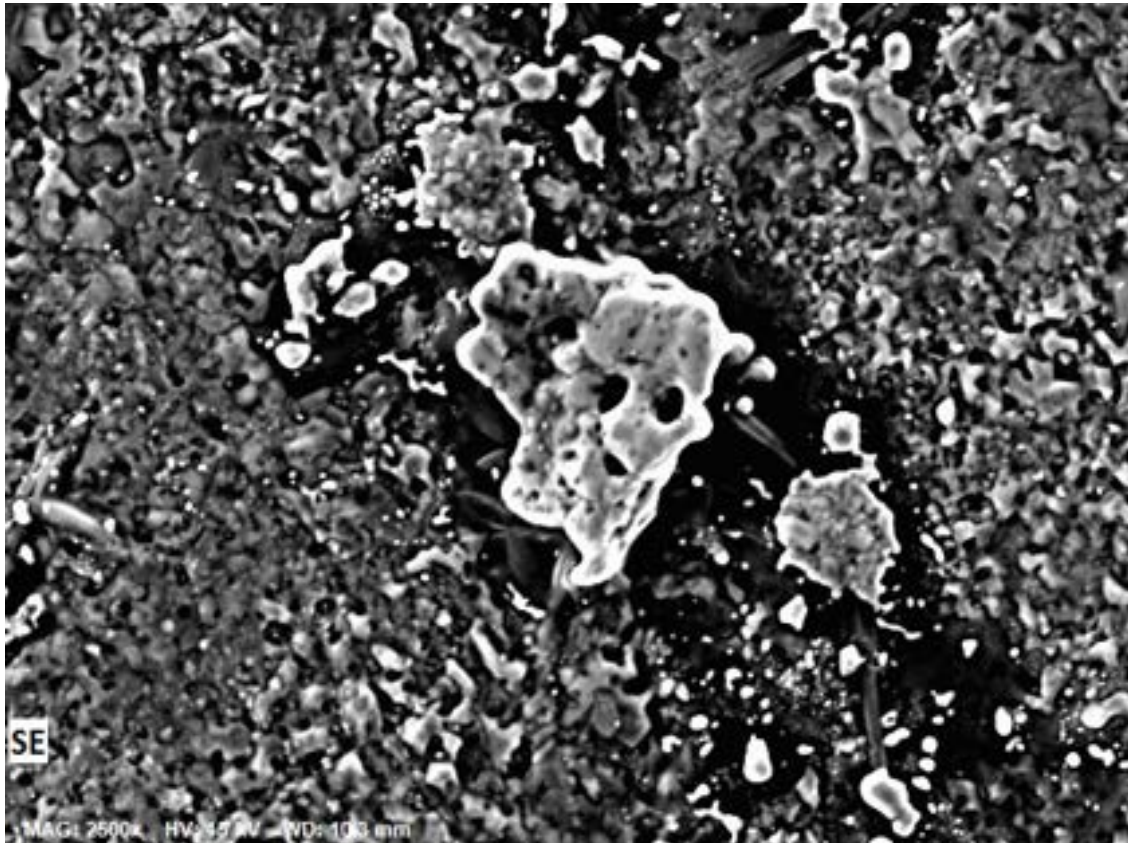




**CHALMERS**



# Chalmers examensarbete 15HP

Topografisk analys av sätthärdat stål

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

THEO FAJERSSON  
ISAK SVENSSON

**Institutionen Industri- och materialvetenskap**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2023  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

Topografisk analys av sätthärdat stål  
Theo Fajersson & Isak Svensson

© Theo Fajersson & Isak Svensson, 2023.

Handledare: Jonas Holmberg, RISE; Per-Ola Vallebrant, Parker Hannifin AB; Erik Spolander, Bodycote AB  
Examinator: Christer Persson, Institutionen industri- och materialvetenskap

Examensarbete 2023  
Institutionen industri- och materialvetenskap  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telephone +46 31 772 1000

Framsida: Bild tagen i mikroskop som visar ytstrukturen hos ett sätthärdat stål.

Skrivet i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Utskriven av institutionen industri- och materialvetenskap  
Göteborg, Sverige 2023

# Sammanfattning

Bakgrunden till projektet var att Parker Hannifin AB började studera ytstrukturen hos sätthärdat stål. Parker identifierade artefakter på ytan som liknade ”höghus” på grund av deras fyrkantiga och höga form, samt ”grantoppar” som var mindre spetsiga utväxter på ytan. Uppdraget var att identifiera vad ”höghusen” och ”grantopparna” bestod av samt hur de uppstod. Detta för att avgöra hur de påverkar ytans egenskaper och om man kan använda ytan som en funktions yta, därmed eliminera hårbearbetning. Projektet hade tillgång till utrustning på RISE (Möln dal), såsom ytstrukturmikroskop, SEM och provberedningslaboratorium.

Projektet inleddes med att slipa provbitar som tillhandahölls av Parker. De slipades till fem olika ytfinheter för att undersöka hur olika ytor beter sig vid sätthärdning. Provbitarna analyserades med ytstrukturmikroskop före och efter olika värmebehandlingsprocesser för att se om de artefakter som Parker hade observerat uppstod. Detta gjordes för att eliminera olika variabler i processen och ta reda på hur ”höghusen” och ”grantopparna” bildas. Samtliga provbitar analyserades också med svepelektronmikroskop (SEM) för att få en bättre bild av ytan i verkligheten. Provbitarna genomgick även en EDS-analys för att bestämma den kemiska sammansättningen av ”höghusen” och ”grantopparna”.

Resultaten visade att standardsätthärdning leder till bildandet av ”höghusen” och ”grantopparna”. ”Höghusen” tros bildas av härdolja när komponenten snabbt kyls efter att ha tagits ut ur ugnen. Detta beror på att EDS-analysen visade att ”höghusen” innehöll kol, svavel, kisel, och andra komponenter som finns i härdolja. ”Grantopparna” bestod av rent järn omgivet av oxider. Vid analys med SEM bildade granskogen ett Turing-mönster. Det innebär att granskogen kan simuleras med en enkel matematisk modell. Slutsatsen för ”granskogen” är att oxiderna som bildas på ytan i ugnen växer snabbare i volym än järnet. Järnet måste då tränga sig igenom oxiderna och fyller igen hål på ytan, vilket resulterar i bildandet av ”granskogen”.

Nyckelord: Sätthärdning, Stål, Svepelektronmikroskop (SEM), Ytstruktur, Slipning, EDS, Turing-mönster, Härdolja, Oxider.

---

## Abstract

The background for this thesis project was that Parker Hannifin AB studied the surface structure of case-hardened steel. Parker identified different deformations on the surface, which they referred to as "höghus" (skyscrapers) and "grantoppar" (forest) due to their resemblance to these structures. Curious about the composition and formation of these deformations, Parker initiated this thesis project. The goal with this project is to determine how these deformations affect the surface structure of the steel and whether it is necessary to post-process the surface. To examine the surface structure, laboratory equipment such as a scanning electron microscope (SEM) and an optical 3D profiling microscope were utilized at RISE in Mölndal.

The project started with grinding the surfaces of material samples, which were provided by Parker. The samples were ground using five different grit numbers to study if different surface finishes affected the results. All samples were also studied under an optical 3D profiling microscope before and after they were heat treated to ensure that the deformations Parker found appeared. This was done to eliminate different variables from the heat treatment process and to find out how these "skyscrapers" and "forest" occur. All of the samples were also analyzed in SEM to get a better understanding of the surface. An EDS analysis was also conducted for all samples to determine the chemical structure of the "skyscrapers" and "forest".

The result of the study was that standard case-hardening leads to the formation of "skyscrapers" and "forest". The "skyscrapers" are most likely residual products from the quenching oil used in the case-hardening process. This conclusion comes from the EDS analysis, which shows that most "skyscrapers" consist of coal, sulfur, silicon, and several other substances that can be found in quenching oil. The "forest" consists of iron surrounded by different oxides. During analyses in SEM, a Turing pattern could be observed for the "forest". This means that the "forest" could be simulated using a mathematical model. The conclusion for the "forest" is that the oxides which form on the surface in the furnace grow faster than the iron. This means the iron must squeeze through the oxides, which creates the "forest" pattern.

Keywords: Case-hardening, Steel, Scanning electron microscope (SEM), Optical 3D profiling microscope, Grinding, EDS, Turing-pattern, Quenching oil, Oxides.



## Erkännanden

Vi vill uttrycka vår uppskattning för de tre företag som har varit våra samarbetspartners under detta examensarbete - RISE, Parker Hannifin AB och Bodycote. Vi har haft förmånen att arbeta tillsammans med er och det har varit en värdefull och lärorik erfarenhet. Vi vill särskilt tacka våra handledare på respektive företag, Jonas Holmberg (RISE), Per-Ola Vallebrant (Parker) och Erik Spolander (Bodycote), för deras ovärderliga engagemang och stöd genom hela projektet.

Vi vill också tacka Stefan Hällgren (Parker) och Arvin Ghorbani (Bodycote) för deras tid med att förbereda och fixa provbitarna, vilket har varit av avgörande betydelse för att vi skulle kunna fullföra vårt arbete på ett framgångsrikt sätt.

Vi är också tacksamma mot RISE för att de tillät oss att använda deras lokaler och utrustning för att genomföra projektet på bästa sätt. Parker och Bodycote har också varit till stor hjälp genom sin snabba hantering av provbitar och material, vilket har varit av avgörande betydelse för att vi skulle kunna fullföra arbetet inom den givna tidsramen.

Vi vill också tacka vår handledare och examinator på Chalmers, Christer Persson, för hans värdefulla feedback och tips som har hjälpt oss att genomföra examensarbetet på bästa sätt.

Till sist vill vi rikta ett stort tack till våra familjemedlemmar och vänner för deras stöd och uppmuntran under hela projektets gång. Er support har varit ovärderlig och har hjälpt oss att hålla oss motiverade och engagerade genom hela processen.

Theo Fajersson, Isak Svensson, Göteborg, Maj 2023



# Innehåll

<b>Figurer</b>	<b>xi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	2
1.1.1 RISE . . . . .	2
1.1.2 Parker Hannifin AB . . . . .	3
1.1.3 Bodycote AB . . . . .	3
1.2 Uppdragsbeskrivning . . . . .	4
1.3 Avgränsningar . . . . .	4
1.4 Precisering av frågeställningar . . . . .	5
<b>2 Teori</b>	<b>6</b>
2.1 Sätthårdning . . . . .	6
2.1.1 Gynnsamma egenskaper . . . . .	6
2.1.2 Stål SS2511 (16NiCrS4) . . . . .	7
2.1.3 Sätthårdningsprocessen . . . . .	7
2.1.3.1 LPC ugn . . . . .	7
2.1.4 Fasomvandling under sätthårdning . . . . .	7
2.1.4.1 Martensit . . . . .	9
2.1.4.2 Restspänningar . . . . .	10
2.2 Diffusion . . . . .	10
2.3 Charging . . . . .	11
2.4 Slipning . . . . .	11
2.5 Polering . . . . .	12
2.6 Ytstrukturmikroskop . . . . .	12
2.7 Mountainsmap . . . . .	13
2.7.1 $S_{dr}$ . . . . .	13
2.7.2 $S_a$ . . . . .	13
2.7.3 $S_{10z}$ . . . . .	13
2.8 SEM . . . . .	14
2.9 Avspänningsglödning . . . . .	14
2.10 Vickers . . . . .	15
2.11 Ultraljudstvätt . . . . .	15



---

<b>3</b>	<b>Hypoteser</b>	<b>16</b>
3.1	Hypotes 1: Grafit-bildning . . . . .	16
3.2	Hypotes 2: Oxidation . . . . .	16
3.3	Hypotes 3: Metal dusting . . . . .	16
3.4	Hypotes 4: Restspänningar . . . . .	17
3.5	Hypotes 5: Smuts eller restpartiklar från process . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>18</b>
4.1	Slipning av provbitar . . . . .	18
4.2	Kapning, gjutning och polering . . . . .	19
4.2.1	Kapning . . . . .	19
4.2.2	Gjutning . . . . .	19
4.2.3	Polering . . . . .	19
4.3	Mätning av ytfinheten . . . . .	20
4.4	Avspänningsglödning . . . . .	20
4.5	Sätthårdning . . . . .	21
4.6	SEM/EDS . . . . .	22
4.7	Ultraljudstvätt . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Resultat</b>	<b>23</b>
5.1	Slipning . . . . .	23
5.2	Mätningar av ytfinheten . . . . .	24
5.3	Avspänningsglödning . . . . .	24
5.4	Ytstruktur hos sätthärdade provbitar . . . . .	25
5.4.1	A1: LPC . . . . .	25
5.4.1.1	Ytfinheten . . . . .	25
5.4.1.2	Mätvärden . . . . .	26
5.4.2	A2: Standard sätthårdning . . . . .	27
5.4.2.1	Ytfinheten . . . . .	27
5.4.3	B1: Sätthårdning utan anlöpning . . . . .	29
5.4.3.1	Ytfinheten . . . . .	29
5.4.3.2	Mätvärden . . . . .	30
5.4.4	K2: Standard sätthårdning . . . . .	31
5.4.5	K2: Standard sätthårdning samt tvättad . . . . .	32
5.5	SEM/EDS . . . . .	33
5.5.1	A1: LPC . . . . .	33
5.5.2	A2: Standard sätthårdning . . . . .	34
5.5.3	B1: Sätthårdning utan anlöpning . . . . .	37
5.5.4	K2 kapad . . . . .	39
5.6	Ultraljudstvätt . . . . .	40
5.6.1	A2 Sätthärdad ultraljudstvätt . . . . .	40
5.6.2	K1 ultraljudstvätt . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>42</b>
6.1	Grantopparna . . . . .	42
6.1.1	Ultraljudstvätt . . . . .	44
6.1.2	Sammanfattning slutsatser av grantopparna. . . . .	44

6.2	Höghus . . . . .	45
6.2.1	Ultraljudstvätt . . . . .	46
6.2.2	Specialfall . . . . .	46
6.2.3	Sammanfattning slutsatser av Höghusen . . . . .	46
6.3	Utvärdering av hypoteser . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>48</b>
7.1	Metod . . . . .	48
7.1.1	Slipning . . . . .	48
7.1.2	Avspänningsglödningen . . . . .	49
7.1.3	Mätning av ytfinheten . . . . .	49
7.1.4	Sätthårdning . . . . .	50
7.1.5	SEM/EDS . . . . .	50
7.2	Resultat . . . . .	50
7.2.1	Ytstruktur på sätthårdning . . . . .	51
7.2.2	SEM/EDS . . . . .	51
7.3	Slutsatser . . . . .	51
7.4	Besvarande av frågeställningar . . . . .	52
7.4.1	Varför uppstår ”höghusen” och ”grantopparna”? . . . . .	52
7.4.2	Vad består de av? . . . . .	52
7.4.3	Hur påverkar de egenskaperna hos stålet? . . . . .	52
7.4.4	Beroende på dess påverkan på stålets egenskaper, går det att minimera hårbearbetning efter sätthårdning? . . . . .	53
7.5	Rekommendationer för framtida forskning . . . . .	54
<b>A</b>	<b>Bilagor</b>	<b>I</b>

# Figurer

1.1	Strukturen av en karburiserad stång. Kärnan (vita område) är 0,15% kol och skalet (mörkare området) är 0,8% kol (Higgins, 1998) . . . . .	1
1.2	Bild från Parker Hannifin som illustrerar ”höghus” och ”grantoppar” (Vallebrant, 2022). . . . .	2
1.3	Axial Piston Fixed Pumps - Series F1 (Parker Hannifin AB, u. å-a) . . . . .	3
2.1	Kristallstrukturer av järn. (a) body-centered cubic ( $\alpha$ )-järn. (b) face-centered cubic ( $\gamma$ )-järn (Averbach, 2019). . . . .	7
2.2	Järn-kol fasdiagram (Averbach, 2019). . . . .	8
2.3	Kristallstruktur av martensit (Averbach, 2019). . . . .	9
2.4	Schematiskt isotermisk transformationsdiagram för ett eutektoidstål (Averbach, 2019). . . . .	9
2.5	Tomma chargeringskorgar. . . . .	11
2.6	Bild som beskriver interferometri . . . . .	12
2.7	Ett exempel på ett svepelektronmikroskop (Hayes, 2021). . . . .	14
3.1	Krypningsdiagram (Holm m. fl., 2010). . . . .	17
4.1	Mountainsmap processteg. . . . .	20
5.1	De olika slipningsgraderna. . . . .	23
5.2	Jämförelse för A2 innan och efter sätthårdning. . . . .	24
5.3	P120 före och efter avspänningsglödning. . . . .	24
5.4	P500 före och efter avspänningsglödning. . . . .	25
5.5	A1 efter LPC, slipad av Parker. . . . .	25
5.6	A1 topografivärden jämförda. . . . .	26
5.7	Provbit A2 efter sätthårdning. . . . .	27
5.8	A1 topografivärden jämförda. . . . .	28
5.9	B1 efter sätthårdning utan anlöpning. . . . .	29
5.10	Objekt som tros var en smuts- eller restpartikel under ytstrukturmikroskop. . . . .	29
5.11	B1 topografivärden jämförda. . . . .	30
5.12	Komponent tillverkad av Parker under ytstrukturmikroskop. . . . .	31
5.13	Parker komponent under ytstrukturmikroskop efter tvätt med alkohol. . . . .	32
5.14	Granskogsmönster på ytan av en Parker komponent. . . . .	32
5.15	SEI och BEC bilder av A1. . . . .	33

5.16	Spektra av LPC biten under SEM. . . . .	33
5.17	A2 under stereomikroskop. . . . .	34
5.18	Provbit A2. . . . .	34
5.19	1500x inzoomning på ett höghus. De blåa områdena är svavel i hög koncentration. . . . .	35
5.20	EDS på provbit A2 på ett höghus. . . . .	36
5.21	EDS på provbit A2 på ytterligare ett höghus. . . . .	36
5.22	Granskog på A2. . . . .	37
5.23	SEM B1. . . . .	37
5.24	EDS B1 P1. . . . .	38
5.25	Aluminiumkorn. . . . .	38
5.26	K2 granskog tvärsnitt. . . . .	39
5.27	A2 sätthärdad efter olika lång ultraljudstvätt. . . . .	40
5.28	Ljus fläck under ytstrukturmikroskop. . . . .	41
5.29	K1 med ultraljudstvätt. . . . .	41
6.1	Simulerat Turing-mönster. . . . .	43
6.2	Jämförelse i SEM mellan A1 & A2. . . . .	44
6.3	SEM A1 & A2 jämförelse. . . . .	45
6.4	Jämförelse mellan ytstrukturen hos A2 P80 och A2 P500. . . . .	46
7.1	Provbit A2s storlek. Notera att alla provbitarna är ungefär denna storleken. . . . .	49
A.1	Slipmaskin . . . . .	I
A.2	Provbit A2 slipad . . . . .	II

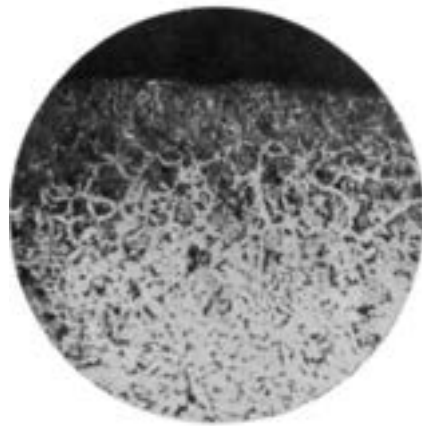
# Tabeller

2.1	16NiCrS4 kvalité och kemisk sammansättning ( <i>ISO683-3:2022</i> , 2022).	7
5.1	Spektrum tabell som visar % av olika ämnen i fyra olika områden från <i>figur 5.18b</i> .	35
5.2	Spektrum tabell som visar % av olika ämnen i de olika områden från <i>figur. 5.19</i>	35

# 1

## Inledning

Principen av att sätthärda har använts i flera århundrade då man skapade stål av smidesjärn genom "cementering". Både sätthårdning och "cementering" utnyttjar en egenskap hos (FCC)  $\gamma$  järn som tillåter att kol diffunderar ner i kristallstrukturen (Higgins, 1998). Under en förutsatt tid hettas låglegerade stål (ofta mindre än 0,25% kol) upp till omvandlingstemperatur i en högkolhaltig miljö, där tiden bestämmer diffunderings djupet. Därefter kyls stålet i olja eller saltbad. Detta gör att kärnan förblir mjuk och seg samt ytan hård och nötningsbeständig (Bodycote, u. å-b). Se *figur 1.1* för ett tvärsnitt på en karburiserad komponent.



**Figur 1.1:** Strukturen av en karburiserad stång. Kärnan (vita område) är 0,15% kol och skalet (mörkare området) är 0,8% kol (Higgins, 1998)

Företag som Parker Hannifin AB mjukbearbetar ytorna på deras komponenter som sedan skickas till Bodycote AB för att sätthärdas. Efter sätthärdningsprocessen hårdbearbetas komponenten igen. Hårdbearbetning är dock konstigt med hänsyn till tid, pengar och miljö. Genom att studera ytorna på råa sätthärdade komponenter kan hårdbearbetningssteget optimeras eller elimineras för att spara tid, pengar samt på miljön.

### 1.1 Bakgrund

RISE har format detta examensarbete i samarbete med Parker Hannifin samt Bolydote för att undersöka ytstrukturen hos stål efter sätthårdning. Bakgrunden till examensarbetet är att Parker Hannifin införskaffat sig ett nytt mikroskop där de analyserat ståls ytstruktur efter sätthårdning. Under denna analys upptäckte Parker ojämnheter i ytstrukturen som de inte tidigare hade sett. Dessa nya ojämnheter kallar Parker för "höghus" samt "grantoppar" och de illustreras i *figur 1.2* nedan. Eftersom detta är något nytt för företaget finns ingen kunskap om "höghusen" samt "grantopparna", och det är här examensarbetet kommer in i bilden. Problemet som examensarbetet ska besvara är varför dessa "höghus" samt "grantoppar" bildas, vad de består av samt huruvida de påverkar komponentens egenskaper. Beroende på topparnas påverkan på komponenten, är det även möjligt att minimera hårdbearbetningen som sker efter sätthårdning för att spara tid, pengar samt miljön?



**Figur 1.2:** Bild från Parker Hannifin som illustrerar "höghus" och "grantoppar" (Vallebrant, 2022).

#### 1.1.1 RISE

RISE, eller Research Institutes of Sweden, är ett statligt forskningsinstitut som forskar inom flera olika ämnen. RISE har rötter enda från 1960-talet då flera olika forskningsinstitut växte fram, men det var dock inte för än 2007 som företaget blev helägt av svenska staten. Vad som då hette IRECO Holding bytte sedan namn till RISE 2009 (RISE, u. å).

Det är på RISE kontor i Mölndal, Göteborg, som examensarbetet kommer att genomföras. Med hjälp av deras resurser, så som mikroskop och laboratorie, kommer olika tester genomföras för att försöka svara på frågorna som ställdes i bakgrunden.

### 1.1.2 Parker Hannifin AB

Parker Hannifin är ett stort företag med cirka 60 000 medarbetare i världen. Parker har varit verksamma i Sverige i ca 40 år och tillverkar komponenter. Anläggningen i Trollhättan utvecklar och tillverkar hydraulpumpar för applikationer inom transport, skogsbruk med mera (Parker Hannifin AB, u. å-b). Ett exempel på en hydraulpump från Parker är Axial Piston Fixed Pumps - Series F1, se *figur 1.3*.



**Figur 1.3:** Axial Piston Fixed Pumps - Series F1 (Parker Hannifin AB, u. å-a)

En del komponenter i hydraulpumpen är sätthärdade eftersom de kräver en högre nötningsbeständighet samt kan ha behov av förbättrade utmattningsegenskaper och slagtlighet.

### 1.1.3 Bodycote AB

Bodycote AB är ett globalt företag som arbetar med värmebehandling av metaller, vilket de är världsledande inom. Företaget grundades i början av 1900-talet och har sedan dess utvecklats till att bli den världsledaren de är idag, med över 5000 anställda utspridda globalt över 180 anläggningar (Bodycote, u. å-a).

För examensarbetet bidrar Bodycote med stor kunskap inom värmebehandling och de är även experter inom sätthärdning. Värmebehandlingen av komponenterna som kommer undersökas i examensarbetet genomförs även av Bodycote.



### 1.2 Uppdragsbeskrivning

Syftet med projektet är att ta reda på hur ytstrukturen ser ut efter sätthårdning, vad den kemiska sammansättning är samt ta reda på om ytan så som den ser ut i *figur 1.2* har någon inverkan på själva funktionen av ytan.

Målet med projektet är att utöka kunskapen kring vilka faktorer som påverkar ytstrukturen, alltså vad som får ”höghusen” och ”grantopparna” att växa fram. Med hjälp av detta kan Bodycote styra ytans utseendet utifrån kundens behov. Projektet kommer också bidra med kunskap kring ”grantoppar” och ”höghus” samt hur man kan utnyttja de egenskaperna ytojämnheter medför för att tillverka en så optimerad produkt som möjligt.

### 1.3 Avgränsningar

För att hinna med alla undersökning som behöver genomföras samt även komma fram till en slutsats kring problemet har en del avgränsningar gjorts. En av de största och mest uppenbara avgränsningarna är tiden. Projektet är avgränsat tidsmässigt till fyra månader, vilket betyder att tiden inte kommer räcka till för att undersöka alla teorier kring problemet. Alltså kan endast de teorier som avgörs vara mest intressanta undersökas på djupet. Tidsbegränsningen har även medfört att tiden inte räckt till för att använda avancerade maskiner då de har en längre inlärningskurva. Detta betyder att enklare verktyg och metoder använts istället, som till exempel slipning för hand.

Ytterligare en avgränsning för projektet var att endast en typ av stål, 16NiCrS4 (SS2511), har undersökts. Detta medför att de slutsatser som dras i slutet av projektet inte med 100 procent säkerhet kan appliceras på andra typer utav stål. Däremot gäller att vissa slutsatser stämmer för andra typer av stål också.

Inom projektet finns även geografiska avgränsningar. När det kommer till värmebehandlingen sker det hos Bodycote i Angered, vilket gör att ledtiderna blir korta. Däremot har de även andra typer av ugnar i andra delar av Sverige som kan genomföra andra typer av behandlingar. Att skicka prover runt om i Sverige ökar dock ledtiderna mycket, vilket gör att dessa andra typer av ugnar inte kommer kunna användas frekvent under arbetets gång.

Dessutom kommer endast ytan hos materialet undersökas. Detta betyder att vad som händer i resten av materialet inte kommer undersökas. Formförändringar djupare i materialet påverkar också dess egenskaper och skulle även kunna ha något med ytstrukturen att göra. Alltså hade det varit bra att titta på hela materialet men resurserna räcker bara till att undersöka ytan.

## 1.4 Precisering av frågeställningar

De frågeställningar som kommer besvaras i rapporten listas nedan:

- Varför uppstår ”höghusen” och ”grantopparna”?
- Vad består de av?
- Hur påverkar de egenskaperna hos stålet?
- Beroende på dess påverkan på stålets egenskaper, går det att minimera hårdbearbetning efter sätthärdning?

# 2

## Teori

Teorikapitlet kommer att introducera flera principer och koncept som kommer att användas och tillämpas genom projektets gång. Dessa principer kan vara grundläggande för förståelsen av projektets mål och syfte, och kan också hjälpa till att förklara de tekniker och metoder som kommer att användas för att uppnå dessa mål. Exempel på sådana principer kan vara grundläggande begrepp värmebehandling eller specifika verktyg och tekniker som används inom projektet:

- Sätthårdning
- Diffundering
- Charging
- Slipning
- Polering
- Ytstrukturmikroskop
- SEM
- Avspänningsglödning
- Vickers
- Ultraljudsvätt

### 2.1 Sätthårdning

Sätthårdning innebär att en komponent behandlas under höga temperaturer (vanligtvis 850 - 950 °C) i en uppkolad miljö. Detta gör att komponenten får en högre kolhalt i ytskiktet. Det uppkolade skiktet är oftast 0,1 - 1,5 mm. Efter uppvärmning kyls komponenten snabbt ner så att stålets austenit omvandlas till martensit, vilket ger stålet sin hårdhet (Holm m. fl., 2010).

#### 2.1.1 Gynnsamma egenskaper

Genom att sätthärda ökar stålets utmattningshållfasthet eftersom tryckspänningar bildas i det uppkolade skiktet som trycker ihop ytan. Sätthårdning gör också att materialet blir hårdare ( $> 550HV$ ) vilket innebär att det även har en större motståndskraft mot nötning. Detta gör sätthårdning väldigt relevant för komponenter som riskerar utmattnings- och nötning, som till exempel kugghjul och axlar (Holm m. fl., 2010).

### 2.1.2 Stål SS2511 (16NiCrS4)

Stålet 16NiCrS4 är låglegerat och kommer användas i projektet. Förr hade stålet namnet SS2511 och det ersätter därför 16NiCrS4 i rapporten (*ISO683-3:2022*, 2022).

Stål	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Cu%
16NiCrS4	0,13-0,19	0,40	0,7-1	0,025	0,02-0,04	0,6-1	0,8-1,10	-	0,4

**Tabell 2.1:** 16NiCrS4 kvalitet och kemisk sammansättning (*ISO683-3:2022*, 2022).

### 2.1.3 Sätthärtningsprocessen

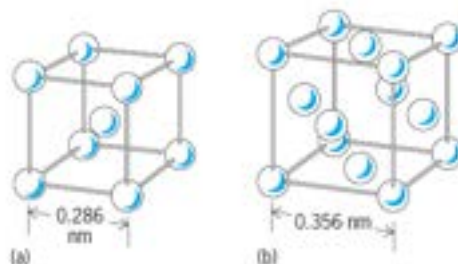
Först så chargerar komponenterna i en så kallad chargeringskorg, *se avsnitt 2.3*. Efter det så sker eventuell förtvätt med alkohol eller alkaliska medel. För sätthärkning är detta sällsynt. Chargeringskorgen åker in i en ugn där den värms upp under skyddsgas. När chargen har uppnått temperatur så spolas den med kolrik atmosfär. Kolet från atmosfären diffunderar ner i stålet och när det önskade uppkolningsdjupet uppnåtts så kyls chargen i vanligtvis härdolja eller gas. Sista steget är därefter eventuellt tvätt och anlöpning för att ta bort eventuella inre spänningar (Holm m. fl., 2010).

#### 2.1.3.1 LPC ugn

Vid sätthärkning av en komponent kan även LPC ugn användas. Detta fungerar på samma sätt som en vanlig sätthärtningsprocess förutom att i en LPC ugn används ingen skyddsgas utan man skapar ett vakuum i ugnen och skyddar på så sätt komponenten mot syre och oxidation.

### 2.1.4 Fasomvandling under sätthärkning

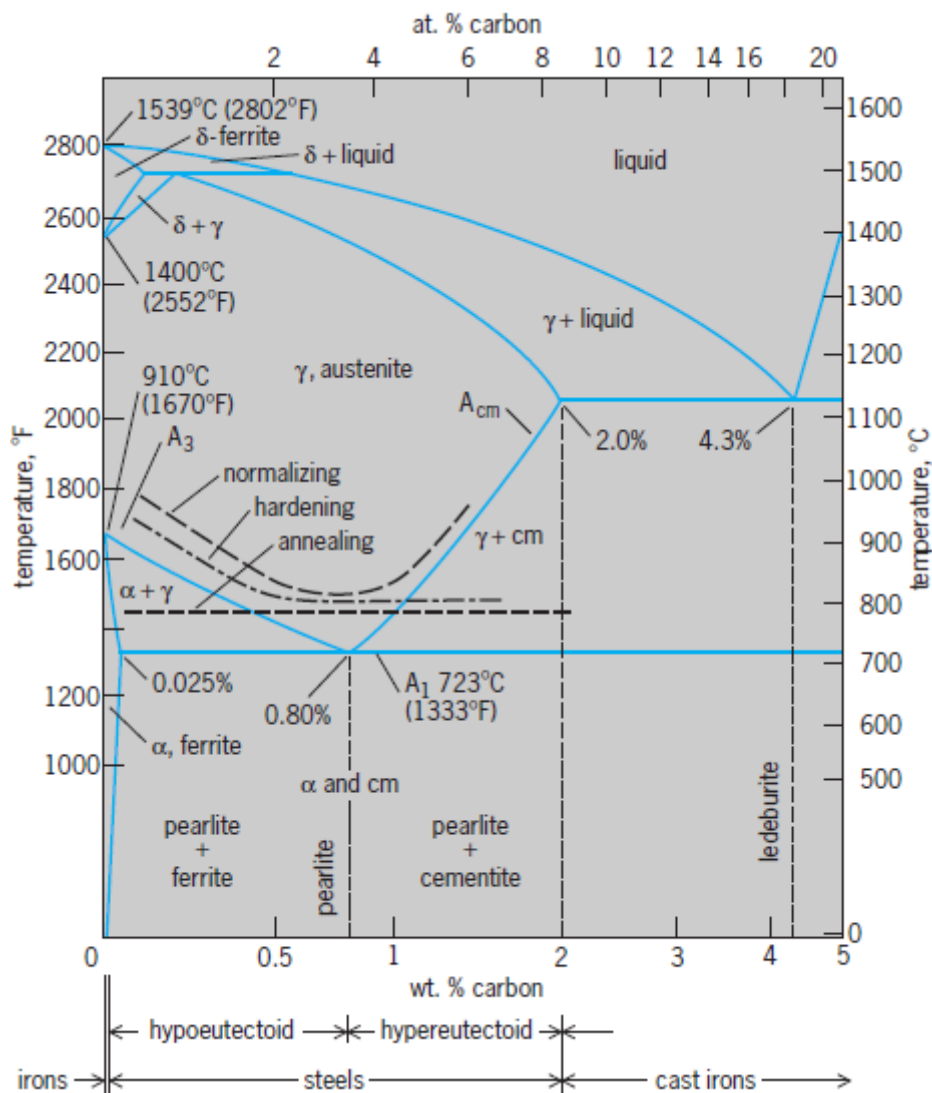
Vid sätthärkning utnyttjas stålets fasomvandlingar för att få uppnå de önskade egenskaperna. Det är därför viktigt att förstå stålets olika faser. Stål vid rumstemperatur som befinner sig i jämvikt ordnar sin kristallstruktur som BCC (body-centered cubic) kallat ferrit ( $\alpha$ )-järn. Vid 910°C omvandlas järn till FCC (face-centered cubic) kallat austenit ( $\gamma$ )-järn (*se figur 2.1*).



**Figur 2.1:** Kristallstrukturer av järn. (a) body-centered cubic ( $\alpha$ )-järn. (b) face-centered cubic ( $\gamma$ )-järn (Averbach, 2019).

## 2. Teori

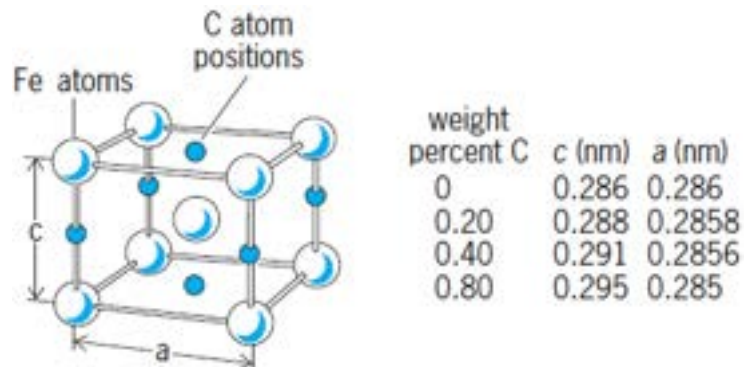
Principerna för värmebehandling av låglegerade stål kan förstås genom att titta på järn-kol fasdiagrammet (se figur 2.2). Diagrammet visar faserna järnet befinner sig i för en given kolhalt vid varje temperatur. Ferrit och austenit är två huvudfaser. Den tredje huvudfasen är  $Fe_3C$ , även kallat cementit, som är en metastabil järnkarbid vilket innebär att den inte är i sann jämvikt. Den mest stabila formen av kol i järn är grafit. Cementit vid långvarig uppvärmning går över till verklig jämvikt och det bildas grafit (Averbach, 2019). Genom att utnyttja diagrammet kan stålets fas bestämmas genom att variera på temperatur och kolhalt, för att bilda till exempel martensit.



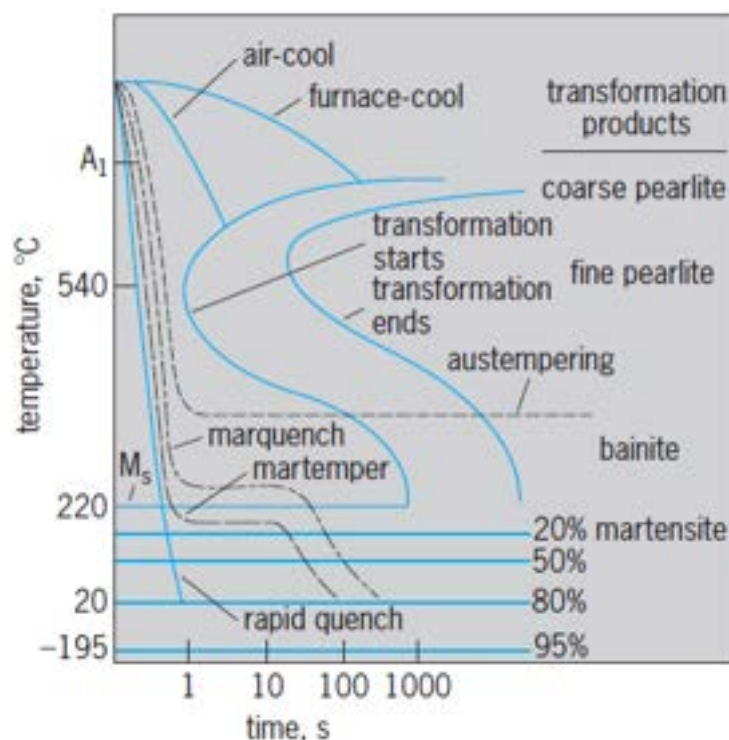
Figur 2.2: Järn-kol fasdiagram (Averbach, 2019).

### 2.1.4.1 Martensit

Martensit har en body-centered tetragonal kristallstruktur där dimensionerna  $c$  och  $a$  beror på kolhalten (se *figur 2.3*). Genom att öka kolhalten i ytskiktet upp till 0,8% och sedan snabbt kyla stålet kan martensit bildas endast på ytan. Det är viktigt att kyla snabbt under  $M_s$  temperaturen annars bildas andra faser av stål (se *figur 2.4*). Detta lämnar en hård yta av martensit och mjuk kärna av ferrit (Averbach, 2019) (se *figur 2.4*). Det är på detta sättet sätthårdning sker och det är även därför det ger en så stark yta och mjuk kärna (Holm m. fl., 2010).



**Figur 2.3:** Kristallstruktur av martensit (Averbach, 2019).



**Figur 2.4:** Schematiskt isotermiskt transformationsdiagram för ett eutektoidstål (Averbach, 2019).

### 2.1.4.2 Restspänningar

Vid sätthårdning så diffunderar kol ner i ytskiktet, se *avsnitt 2.1*. Vid släckning bildas det martensit i ytskiktet. Eftersom koncentrationen kol som diffunderar ner är en parabolisk kurva, se *ekvation 2.3*, så kommer  $M_s$  temperaturen variera med djupet från ytan. Martensit har en större volym än austenit (se *figur 2.1 och 2.3*) och kommer därför ge en volymskillnad mellan ytan och kärnan. Ytan expanderar därför mer än kärnan och bidrar till tryckrestspänningar. Detta är fördelaktigt då det ökar hållfastheten. Dock är det viktigt att inte ha för mycket tryckspänningar då ytan kan bli skör.

## 2.2 Diffusion

Diffusion är i detta fallet då kolet från atmosfären tränger ner sig emellan järnatomerna i stålet. Diffusionen kan beräknas med hjälp av Fick's lag och lyder enligt *ekvation 2.1*.

$$J = D \cdot S \cdot \frac{\delta C}{\delta x} \quad (2.1)$$

- $J$  = Koncentrationen av kol som passerar över arean  $S$  normalt till  $x$ -planet.
- $\frac{\delta C}{\delta x}$  = Koncentrationsgradienten av kol varierande på djupet.
- $D$  = Diffusionskoefficienten av kol i ( $\gamma$ )-järn.

Diffusionskoefficienten är proportionellt beroende av temperaturen. För stål vid  $900^\circ\text{C}$  är  $D = 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Annars definieras den enligt *ekvation 2.2*.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} \quad (2.2)$$

Att lösa *ekvation 2.2* är svårt och görs oftast numeriskt. Dock så finns det en enkel härledning utvecklad av Einstein som kan appliceras i detta fall. Se *ekvation 2.3*.

$$x = \sqrt{2Dt} \quad (2.3)$$

- $D$  = Diffusionskoefficienten [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]
- $t$  = Diffusionstiden [s]

## 2.3 Chargering

Chargering är ett begrepp inom värmebehandling som innebär att de komponenter som ska värmebehandlas ordnas i så kallade chargeringskorgar (se *figur 2.5*). Denna ordning utgår från att alla komponenter ska exponeras för lika mycket värme från ugnen samt lika mycket kolrik atmosfär. Komponenterna får inte heller komma i kontakt med varandra. Chargering görs för att samma värmebehandling ska ge konsekventa resultat om och om igen samt att alla komponenter som värmebehandlas ihop ska få samma egenskaper.



**Figur 2.5:** Tomma chargeringskorgar.

## 2.4 Slipning

Efter sätthårdning hårbearbetas alltid komponenten, där den vanligaste hårbearbetningsmetoden är slipning. Vid slipning används en slipskiva. Det finns flera olika typer av slipskivor och de vanligaste är aluminiumoxidbaserade skivor. Varje skiva består utav tre komponenter: slipmedel, bindemedel och luftporer. Olika egenskaper kan fås hos slipskivorna genom att alternera förhållandet mellan komponenterna (Holm m. fl., 2010). Tyvärr kan dock slipning påverka materialet negativt genom:

- Slipbränningar, vilket är temperaturstegringar som ger anlöpning eller omhårdning.
- Sprickbildning
- Förändring av restspänningstillståndet, vilket kan leda till formförändringar.
- Omvandling av restaustenit till oanlöst martensit.



Med tanke på dessa negativa effekter slipning kan ha på materialet hade det varit fördelaktigt att minska mängden slipning som görs efter sätthårdning, eller kanske till och med eliminera slipningen helt.

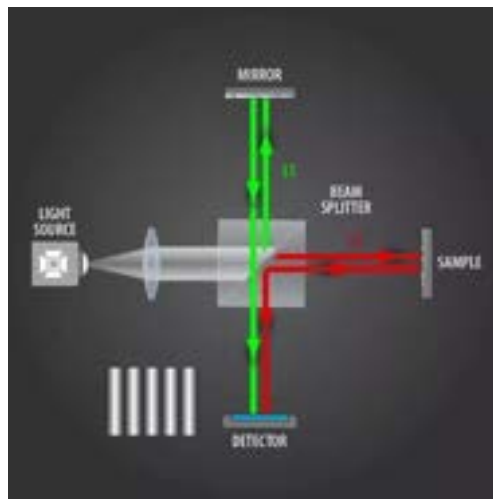
## 2.5 Polering

Polering är inte en precisionsprocess utan den avverkar ytstrukturen till det önskade yttillståndet. Detta genomförs med ett grit ofta blandat i en vätska, limmat eller impregnerat i ett mjukt polerhjul. Genom att agitera polermediumet mot ytan så börjar det avverka material från arbetsstycket vilket tillslut uppnår det yttillstånd önskat (Bralla, 2020).

## 2.6 Ytstrukturmikroskop

Ett ytstrukturmikroskop är enkelt förklarad ett vanligt mikroskop och en kamera i ett, som använder sig utav interferens för att mäta höjdskillnader hos objektet. Detta kan göras med interferometri och confocalprincipen.

Interferometri fungerar på så sätt att ljuset delas i två olika strålar som sedan tar två olika optiska vägar till objektet för att bilda interferens (se *figur 2.6* nedan) (Sensofar, u. å-b).



**Figur 2.6:** Bild som beskriver interferometri

Confocalprincipen mäter höjdskillnader i komponentens yta genom att omvandla vanliga bilder till optiska sektioner, där signalen bevaras för de områden i objektivets fokus. Detta ökar noggrannheten och den praktiska upplösningen i xy-planet (Sensofar, u. å-a).

## 2.7 Mountainsmap

Mountainsmap är ett verktyg som används för att standardisera ytor tagna under ett ytstrukturmikroskop. Programmet gör ytan matematiskt platt samt fyller igen och fixar defekter från mikroskåpet. Därefter kan olika värden plockas fram för att jämföra och definera ytans egenskaper (Digitalsurf, u. å).

### 2.7.1 $S_{dr}$

$S_{dr}$ -parametern är förhållandet mellan arean av den ”riktiga” ytan och arean av ytan sett rakt ovanifrån. Förhållandet kallas för ytans ”komplexitet” och skillnaden mellan två olika ytor kan beskriva tillväxt (Digitalsurf, 2018). Ekvationen för att beskriva  $S_{dr}$  är ekvationen nedan, *ekvation 2.4 (SS-EN ISO 25178-2:2022, 2022)*.

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \int \int_A \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\delta z(x, y)}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta z(x, y)}{\delta y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \quad (2.4)$$

### 2.7.2 $S_a$

Den aritmetiska medelhöjdparametern  $S_a$  är skillnaden i höjd i varje punkt jämfört med ytans aritmetiska medelvärde, se *ekvation 2.5 (SS-EN ISO 25178-2:2022, 2022)*.

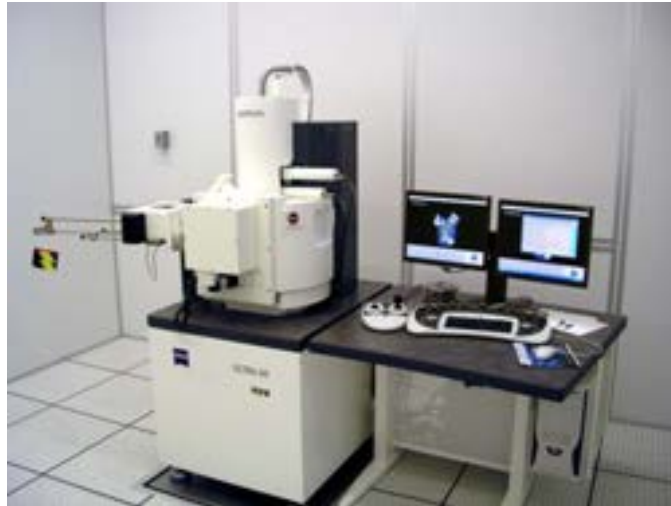
$$S_a = \frac{1}{A} \int \int_A |z(x, y) - \bar{z}| dx dy \quad (2.5)$$

### 2.7.3 $S_{10z}$

$S_{10z}$  är medelvärdet av skillnaden av de tio högsta topparna och de 10 lägsta dalarna. Detta värdet beskriver den maximala höjden av en yta (*SS-EN ISO 25178-2:2022, 2022*).

## 2.8 SEM

SEM, eller svepelektronmikroskop, är ett mikroskop som använder en fokuserad elektronstråle för att skanna av ytan av ett arbetsstycke. Sedan kan mikroskopet skapa bilder över hur ytan ser ut. När elektronstrålen sveper över materialet avger den olika mängd strålningar. Det avslöjar information om ytan så som dess ämnessammansättning och yttopografi (Hayes, 2021).



**Figur 2.7:** Ett exempel på ett svepelektronmikroskop (Hayes, 2021).

Två olika bilder kommer från SEM och det är SEI samt BEC, som är sekundär elektroner respektive backscatter elektroner. SEI visar mer hur ytan ser ut och BEC ger bilder lite längre ner i ytan.

## 2.9 Avspänningsglödning

Avspänningsglödning är en värmebehandlingsmetod som används efter att en detalj har bearbetats. Vid bearbetning kan restspänningar bildas i stålet som kan ge upphov till formförändringar senare i komponentens liv. Genom att avspänningsglödga komponenten släpper restspänningarna och på så sätt kan formförändringar på grund av restspänningar reduceras.

Vid avspänningsglödning värms först komponenten upp tillsammans med ugnen till 550-650 °C för att sedan hållas under 1-2 timmar i denna temperatur. Efter detta låter man komponenten svalna med ugnen till cirka 500 °C för att sedan ta ut den och låta den svalna i luften till rumstemperatur (Holm m. fl., 2010).

## 2.10 Vickers

Vickersprovning, som betecknas HV, är en typ av hårdhetsprovning där en pyramidformad diamant används. Diamanten trycks ned i testmaterialet och intryckets area mäts sedan upp. Vickershårdheten räknas sedan ut med hjälp av formeln:

$$HV = \textit{Konstant} \cdot \frac{\textit{Intryckskraft}}{\textit{Intryckets area}} \quad (2.6)$$

Konstanten används för omräkning från enheten kp (kilopond), vilket används vid vickersprovning, till newton.

Vid sätthårdning pratar man ofta om sätthårdningsdjup, vilket är det avstånd från ytan där hårdhetens brytpunkt är 550 HV (Holm m. fl., 2010).

## 2.11 Ultraljudstvätt

En ultraljudstvätt fungerar genom att använda högfrekventa ljudvågor för att skapa små, snabba vibrationer i vatten. När provbitarna ska rengöras placeras de i vätskan i ultraljudstvätten. Ultraljudsvågorna skapar små luftbubblor som imploderar snabbt. Denna process, som kallas kavitation, frigör små mängder energi som skapar små tryckvågor vilket avlägsnar smuts och föroreningar från objektets yta.

Ultraljudstvättar används ofta inom tillverkningsindustrin för att rengöra precisionselement och små detaljer som är svåra att rengöra för hand eller med andra rengöringsmetoder. Ultraljudstvättar kan också användas för att rengöra smycken, elektronik, medicinska instrument och andra känsliga objekt där en mer skonsam rengöring är nödvändig.

Ultraljudstvättar kan variera i storlek från små bänkmodeller som används i laboratorier eller hobbysyften till stora, industriella modeller som kan rengöra stora mängder objekt samtidigt. Valet av tvättvätska och andra faktorer som temperatur och tid kan också påverka hur effektivt en ultraljudstvätt fungerar för en viss typ av rengöring (Bass m. fl., 2020).

# 3

## Hypoteser

En sammanfattning av teori och uppgiftsbeskrivning som innehåller tankar och idéer, som tagits fram av projektgruppen, kring varför ytstrukturen förändras under sätthårdning.

### 3.1 Hypotes 1: Grafit-bildning

I *avsnitt 2.1.4* nämns det att cementit, som är en huvudfas av stål, inte är i sann jämvikt utan befinner sig i ett slags metastabilt läge. Vid långvarig uppvärmning kommer cementit att omvandlas till en fas av järn, exempelvis ferrit eller perlit, och grafit som är i sann jämvikt. Hypotesen är således att cementiten på ytan omvandlas till grafit under anlöpning. Dock förklarar det inte vart ”grantopparna” kommer ifrån. Om hypotesen stämmer skulle andelen höghus som uppstår ha ett förhållande med hur lång tid anlöpningen sker.

### 3.2 Hypotes 2: Oxidation

Stål SS2511 är ett låglegerat stål vilket innebär att det har väldigt lätt för att oxidera. Vid uppkolning och anlöpning så är det höga temperaturer inblandade vilket ökar chansen för oxidation. ”Grantopparna” som kan synas i ytstrukturen skulle kunna vara oxidation eftersom det sker i en jämn och homogen takt. Om oxidation skulle vara anledningen till ”grantopparna” skulle det vara skillnad mellan exempelvis en vanlig sätthärnings ugn och en LPC ugn. I och med att LPC minskar chansen för oxidation bör det synas mindre ”grantoppar” på den provbiten.

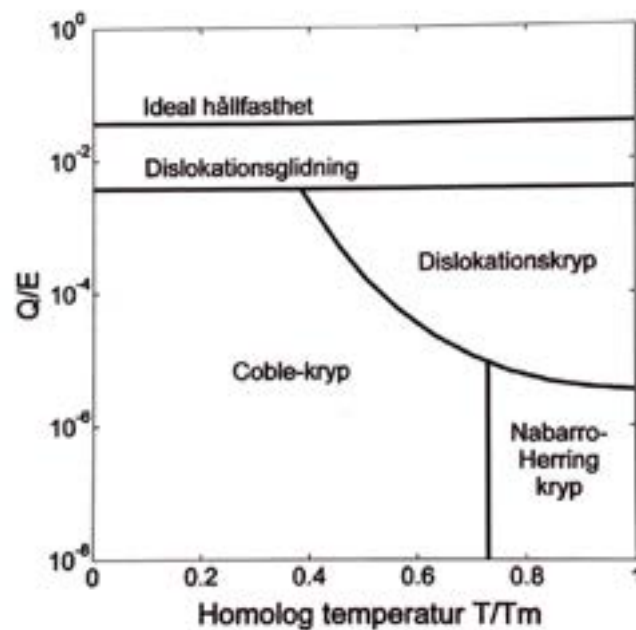
### 3.3 Hypotes 3: Metal dusting

Vid uppkolning kan det ske en sällsynt slags korrosion så kallat metal dusting. Detta fenomen bidrar till att det lossnar material från ytan och ytan får då runda gropar i sig (Elayaperumal och Raja, 2015). Metal dusting skulle kunna vara en anledning till att ”höghusen” och ”grantopparna” bildas. Då metal dusting är en form av korrosion som skapar gropar i ytan kan inte metal dusting av komponenten leda till de ytojämnheter som Parker upptäckt eftersom ”höghusen” och ”grantopparna” växer uppåt (se *figur 1.2*). Däremot skulle metal dusting av ugnen kunna vara en

anledning till varför ytojämnheterna uppstår. Hypotesen är att när ugnens, andra komponenters eller chargeringskorgarnas yta korroderar lossnar små partiklar från ytan som sedan landar och fastnar på komponentens yta, vilket leder till "höghusen". Detta förklarar dock framförallt varför "höghusen" bildas och inte "grantopparna".

### 3.4 Hypotes 4: Restspänningar

Vid anlöpning så gör man ytskiktet mjukare genom att man släpper på restspänningar som gör materialet hårdare och mer hållfast (se *avsnitt 2.1.4.2*). När dessa restspänningarna släpps kanske det sker dislokationskrypning (power law krypning). Dislokationskrypning sker när ett material är under spänning och temperaturen stiger (se *figur 3.1*). Det innebär att martensit kornen börjar glida relativt varandra och bidrar till att skapa "granskogen" genom att dem stiger upp ovanför ytan.



Figur 3.1: Krypningsdiagram (Holm m. fl., 2010).

### 3.5 Hypotes 5: Smuts eller restpartiklar från process

Efter släckning tvättas detaljerna både alkaliskt och med alkohol för att ta bort härdoljan för anlöpning. Hypotesen är således att partiklar från oljan förblir på ytan och bränns fast under anlöpning vilket skulle ge upphov till "höghusen" och "grantopparna". För att kunna bekräfta detta krävs det en jämförelse mellan en anlöpt och en icke anlöpt bit för att se om det uppstår mer eller mindre höghus vid anlöpning, samt om extra tvätt med till exempel alkohol minskar mängden "höghus" och "grantoppar".

# 4

## Metod

Detta avsnitt beskriver arbetsgången för projektet samt vilka metoder som använts för att komma fram till ett svar på problemet.

Provbitarna samt komponenterna som använts tillhandahölls av Parker Hannifin och är av stål SS2511 (se *avsnitt 2.1.2*). De olika provbitarna benäms enligt listan nedan:

- A1: LPC
- A2: Standard sätthårdning
- B1: Sätthärdad utan anlöpning
- Parker komponent, K1: Standard sätthårdning
- Parker komponent, K2: Standard sätthårdning samt tvättad

### 4.1 Slipning av provbitar

För att undersöka problemet för olika ytfinheter användes fem olika slipningar på olika sidor av provbiten. De grit som användes var P80, P120, P320 och P500 enligt ISO/FEPA grit beteckning (Europeisk standard) (Bengtsson, u. å). Den femte ytan slipades av Parker och är slipad med en slipskiva från Norton 46GVX. Det är en skiva med korn av aluminiumoxid och en kornstorlek på 46 samt att skivans hårdhet är medel.

Slipningen genomfördes för hand med hjälp av en roterande slipskiva hos RISE (se *bilaga A.1*). Det innebär att provbitarna inte var fastspända i maskinen, vilket bidrog till att slipning inte blev jämn över ytan. För den första biten stegrades inte slipningen utan till exempel P120 ytan slipades direkt med finhet P120. Vid slipning av de andra bitarna stegrades däremot slipningen enligt listan nedan. Detta gav ett bättre resultat.

- P80 ytan slipas endast med P80
- P120 ytan: P80 → P120
- P320 ytan: P80 → P120 → P320
- P500 ytan: P80 → P120 → P320 → P500

## 4.2 Kapning, gjutning och polering

Vissa provbitar genomgick kapning, gjutning och polering som förberedelsesteg för analys och undersökning, där kapning delade på provbiten, gjutning omformade bitarna med epoxi och polering förbättrade ytkvaliteten.

### 4.2.1 Kapning

Provbitarna A och B har kapats på mitten för att skapa provbitarna A1, A2 samt B1, då A och B var relativt stora samt få i antalet. Kapningen har genomförts med en "abrasive cutter", vilket är en typ av såg som används för att såga i metall. Provbit K2 har även kapats i tre delar för att försöka undersöka ytan från sidan och förstå hur "höghusen" samt "grantopparna" växer på höjden.

### 4.2.2 Gjutning

De tre delarna från K2 har även gjutits i epoxi. Det fungerar så att provbitarna ordnas i var sin form som sedan placeras i en vakuumkammare. Epoxi blandas sedan med ett härdningsmedel och det är denna lösning man gjuter delarna i. Lösningen injiceras sedan i formarna under vakuum som efter detta tas ut ur vakuumkammaren. När epoxin sedan har stelnat tas bitarna tillsammans med den fastgjutna epoxi lösningen ut ur formarna och är redo för att användas.

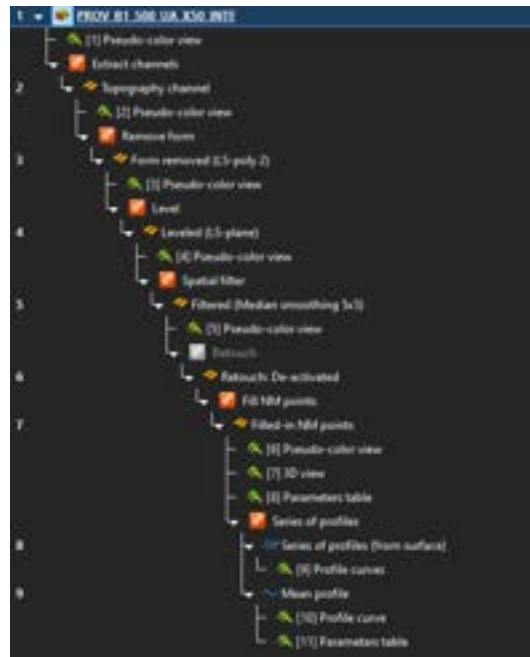
### 4.2.3 Polering

För att bitarna ska gå att undersökas behöver de även poleras för att få bort ränder från kapningen. Innan polering slipades de tre bitarna med grovt slippapper (P120) för att jämna ut ytan. Därefter polerades ytan i tre olika steg med tre olika polermedel: 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  och 1  $\mu\text{m}$ . Poleringen genomfördes med en polermaskin där provbitarna fästes i maskinen, som skötte poleringen automatiskt.



### 4.3 Mätning av ytfinheten

Med hjälp av ett ytstrukturmikroskop genomfördes mätningar av ytfinheten. Mätningarna gjordes i mitten av varje yta på alla provbitarna. Detta genomfördes både före och efter de olika värmebehandlingsmetoderna bitarna utsattes för. Mätresultaten sammanställdes sedan i programmet MountainsMap. Processtegen utförda i Mountainsmap visas i *figur 4.1* nedan.



**Figur 4.1:** Mountainsmap processteg.

Tre mätetal valdes för att kunna jämföra ytorna.  $S_{dr}$ ,  $S_a$  och  $S_{10z}$  ansågs vara mest relevanta då de beskriver grovhet. Jämförs skillnaden mellan mätvärdena före och efter värmebehandling kan de beskriva tillväxt av ytstrukturen. Värden sammanställdes och jämfördes före och efter olika processteg, för att komma fram till vilka processteg som påverkar ytfinheten.

### 4.4 Avspänningsglödning

Provbit A2 avspänningsglödades (se *avsnitt 2.9*) efter att den slipats, då slipning kan införa restspänningar. Detta för att undersöka ifall restspänningar från slipning påverkar ytstrukturen. Mätningar av ytfinheten genomfördes både före och efter avspänningsglödningen. Avspänningsglödningen genomfördes av personal på RISE enligt receptet nedan:

Provbitarna placerades i en låda som sedan placerades i ugnen och värmdes upp.

- 0 - 600°C på 60 minuter
- 600°C i 120 minuter
- 600°C - 400°C på 130 minuter

Lådan med provbitarna tas sedan ut.

- 400°C - 200°C på 10 minuter (temperatur på lådan)
- 200°C - 60°C på 30 minuter (temperatur på lådan)

Provbitarna tas sedan ut ur lådan med en temperatur på 160°C och kyls ned till rumstemperatur. Under processen användes skyddsgas (Mison H2).

## 4.5 Sätthårdning

Efter att alla förberedande mätningar genomförts skickades provbitarna till Bodyco-te för att sätthärdas. De flesta provbitarna sätthärdades i anläggningen i Angered, men en av bitarna sätthärdades i en LPC (Low Pressure Carburizing) ugn i Västerås. Olika steg i sätthärdningsprocessen har även alternerats för de olika provbitarna för att testa de olika hypoteserna (se *avsnitt 3*). Med den kunskapen kan sedan metoderna justeras för att minska eller öka mängden höghus och grantoppar.

De provbitarna som har testats är följande:

- A1: LPC
  - \* Pumpa vakuum → Uppvärmning till 850°C → Temperaturutjämnning vid ca 850°C i 1 h. → Uppkolning temperatur 1030°C → En boost med kolrik atmosfär 2 minuter följt av ett diffusions steg på 30 minuter → Kylning i kvävgas cirka 6 bars tryck.
- A2: Standard sätthårdning
  - \* Förvärmning: 400°C → Sätthårdning 0,7 mm: 930°C → släckning i olja (70°C) → alkalisk tvättning → anlöpning 160°C (ej skyddsgas)
- B1: Sätthärdad utan anlöpning
  - \* Förvärmning: 400°C → Sätthårdning 0,7 mm: 930°C → släckning olja 70°C → alkalisk tvättning
- Parker komponent, K1: Standard sätthårdning
  - \* Förvärmning: 400°C → Sätthårdning 0,7 mm: 930°C → släckning i olja (70°C) → alkalisk tvättning → anlöpning 160°C (ej skyddsgas).
- Parker komponent, K2: Standard sätthårdning samt tvättad
  - \* Förvärmning: 400°C → Sätthårdning 0,7 mm: 930°C → släckning i olja (70°C) → alkalisk tvättning → anlöpning 160°C (ej skyddsgas).

När provbitarna härdats och skickats tillbaka till RISE genomfördes samma mätningar som beskrevs i *avsnitt 4.3*.

### 4.6 SEM/EDS

För att komma fram till vad ”höghusen” och ”grantopparna” består utav har SEM/EDS (se *avsnitt 2.8*) använts. Med hjälp av SEM/EDS kan ytans kemiska uppbyggnad undersökas och på så sätt kan slutsatser dras om vad som bildar dessa ”höghus” och ”grantopparna”. Genom att undersöka vilka olika ämnen höghusen och grantopparna består utav kan slutsatser även dras om var de olika ämnena kommer ifrån.

### 4.7 Ultraljudstvätt

För att ta reda på hur hårt granskogen och höghusen sitter på ytan så tvättas provbitarna med ultraljud. Genom att köra provbitarna i ultraljudstvätten kommer material, som till exempel oxider och smuts, lossna från ytan. Efter detta bör det endast vara kvar ”granskog” och ”höghus” av järn på ytan.

Ultraljudstvätten genomfördes genom att lägga provbitarna i en bägare och fylla den med etanol för att skydda mot oxidering. Därefter placerades bägaren i ultraljudstvätten som var fylld med vanligt vatten.

Därefter tvättades provbitarna i cykler för att kunna titta på dem emellan i ytstrukturmikroskopet

- A2 Sätthärdad
  - \* 60s → Ytstruktur analys → 300s → Ytstruktur analys
- K1
  - \* 30s → Ytstruktur analys → 120s → Ytstruktur analys → 240s → Ytstruktur analys

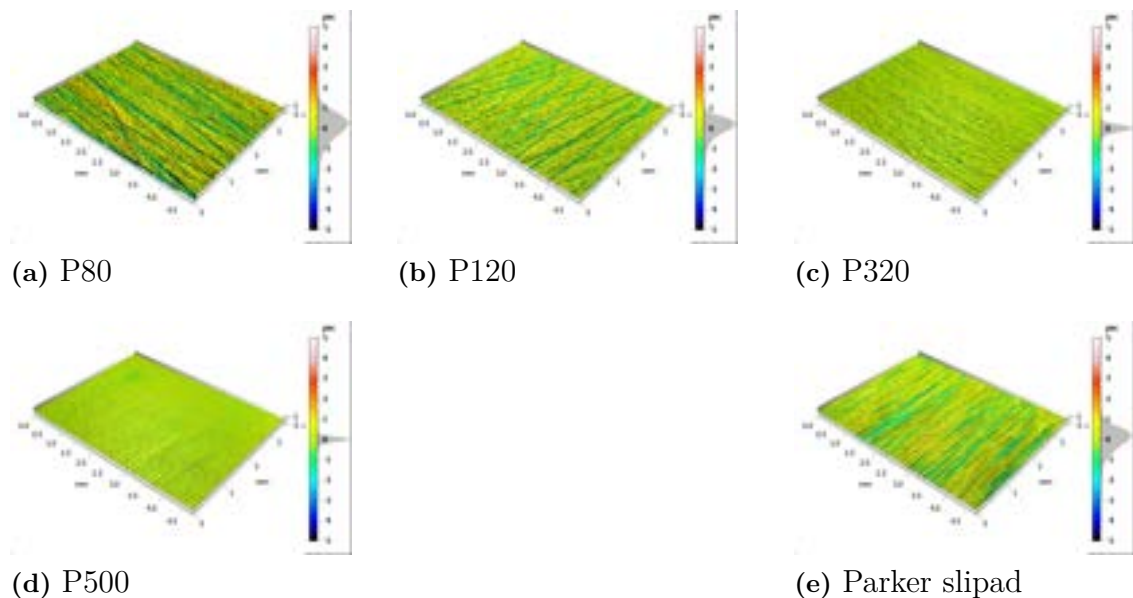
# 5

## Resultat

I detta kapitel kommer resultatet av analyserna på provbitarna att presenteras. Det är efter resultaten som slutsatser kan dras och hypoteser om de undersökta materialen och deras egenskaper kan bekräftas. Alla ytstrukturbilder är behandlade i Mountainsmap enligt *avsnitt 4.3*.

### 5.1 Slipning

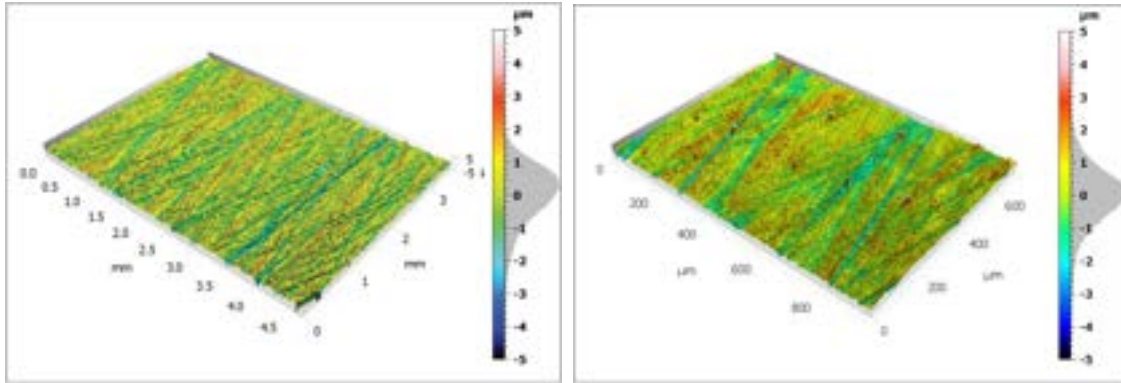
Provbitarna slipades med två olika metoder, där den ena var slipning för hand hos RISE och den andra var maskinslipning av Parker. Fem olika grovheter användes för att se om ytfinheten påverkar hur ytstrukturen förändras vid sätthårdning. De grovheter som använts beskrivs i *avsnitt 4.1*. Resultatet av detta visas i *figur 5.1a* till *5.1e*. Se *bilaga A.2* för hur provbitarna såg ut i verkligheten.



**Figur 5.1:** De olika slippningsgraderna.

## 5.2 Mätningar av ytfinheten

Med hjälp av ytstrukturmätningar i ytstrukturmikroskopet (se *avsnitt 2.6*) kunde bildandet av ”höghus” och ”granskogar” bekräftas. När mätningarna för provbit A2 jämfördes före och efter sätthårdning kunde man tydligt se att något hade hänt och att ”höghus” samt ”granskogar” hade bildats, vilket även kan ses om man jämför *figur 5.2a* och *5.2b*.



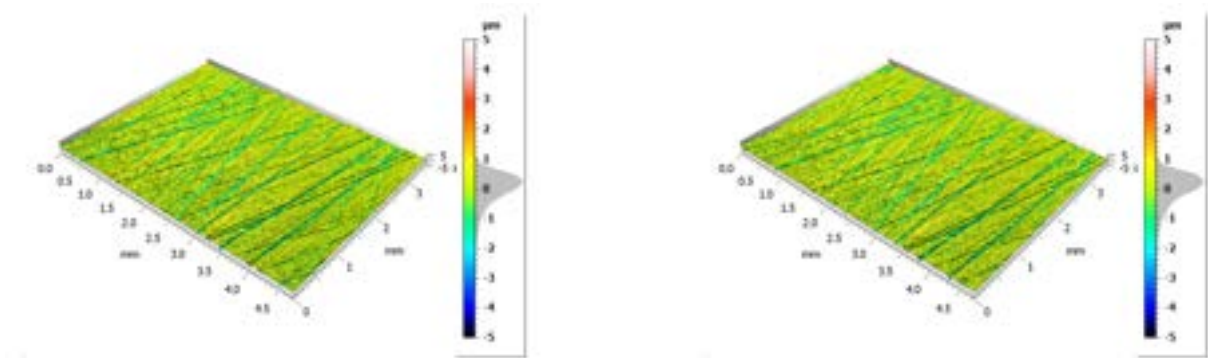
(a) Provbit A2 innan sätthårdning

(b) Provbit A2 efter sätthårdning

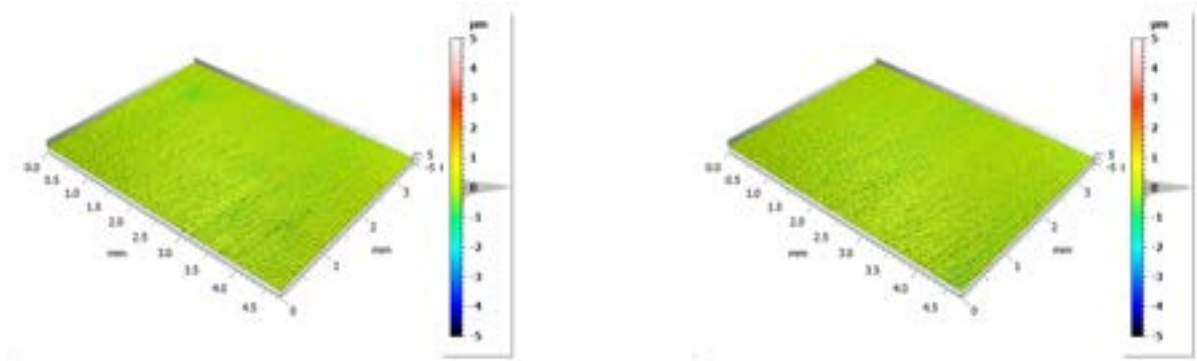
**Figur 5.2:** Jämförelse för A2 innan och efter sätthårdning.

## 5.3 Avspänningsglödning

Avspänningsglödningen gav ingen synlig skillnad i ytstrukturen på alla ytorna (se *bild 5.3* & *5.4*). Eftersom det inte syntes någon skillnad i resultaten så har de övriga provbitarna ej avspänningsglödats då det inte ansågs bidra till tillväxten av ”höghus” eller ”grantoppar”.



**Figur 5.3:** P120 före och efter avspänningsglödning.



Figur 5.4: P500 före och efter avspänningsglödning.

## 5.4 Ytstruktur hos sätthärdade provbitar

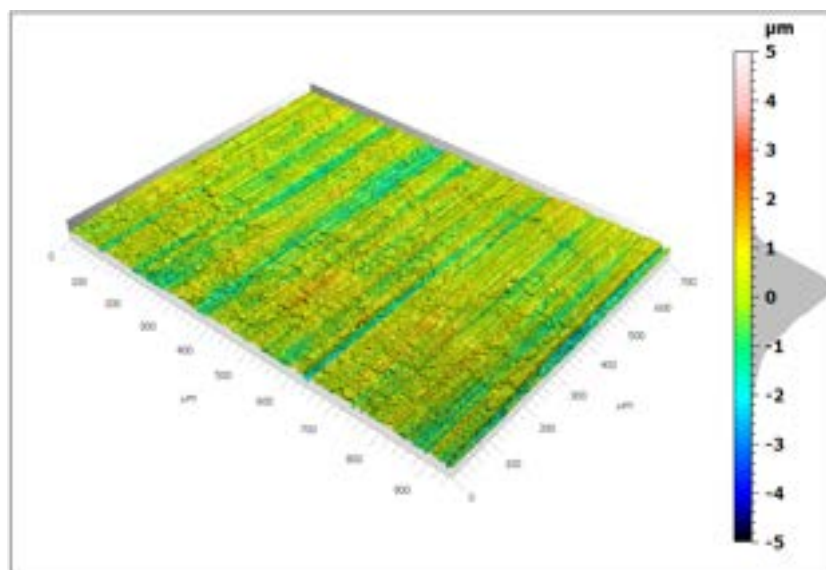
Under detta avsnitt kommer resultat av härdningen presenteras per provbit. Alla ytstrukturbilder samt grafer är på ytan som slipades av Parker Hannifin.

### 5.4.1 A1: LPC

En LPC körning genomfördes för provbit A1, enligt receptet i *avsnitt 4.5*, för att testa olika slags värmebehandlingsmetoder.

#### 5.4.1.1 Ytfinheten

Genom att titta på A1 i ytstrukturmikroskop konstaterades det att ytan är relativt olik de ytor som sätthärdats enligt standardmetoden.

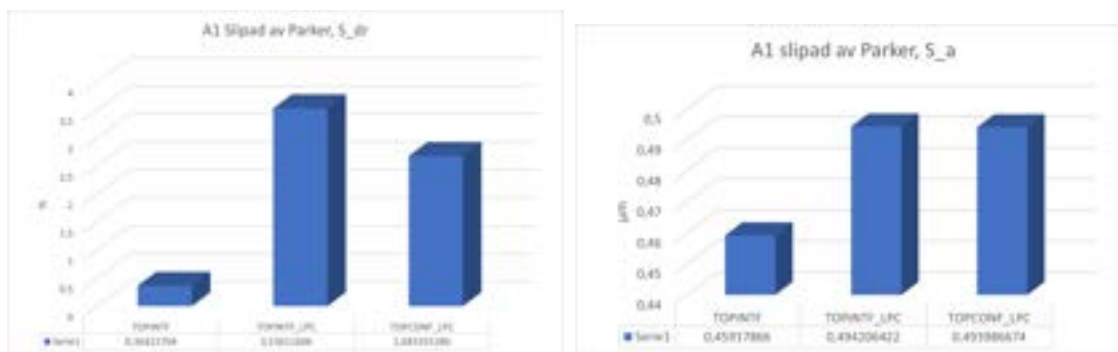


Figur 5.5: A1 efter LPC, slipad av Parker.

Med LPC metoden bildas inte samma ”höghus” och ”granskog” som för standard sättjärdning, vilket blir tydligt om man jämför *figur 5.7* i *avsnitt 5.4.2.1* med *figur 5.5* ovan. I LPC bitens yta bildas även branta höjdskillnader, vilket i figuren ser ut som sprickor. Detta är något som inte förekommer på samma sätt hos provbit A2.

#### 5.4.1.2 Mätvärden

I *figur 5.6* nedan visas mätvärden för provbit A1. Vad de olika mätvärdena betyder beskrivs i *avsnitt 2.7*. TOP är ytan slipad av parker. INTF och CONF är de två olika metoderna för att ta bilderna (*se avsnitt 2.6*). CONF läget är på 100x inzoomning och INTF är på 50x inzoomning.



(a)  $S_{dr}$  jämförelse för A1.

(b)  $S_a$  jämförelse för A1.



(c)  $S_{10z}$  jämförelse för A1.

**Figur 5.6:** A1 topografivärden jämförda.

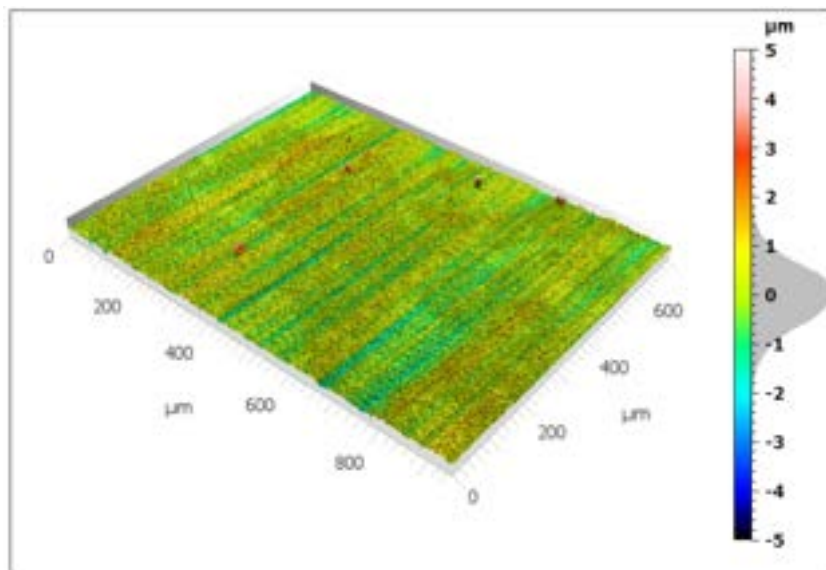
Tabellen visar att  $S_a$  värdet är ungefär samma som innan värmebehandlingen. Den visar också att ytan växt uppåt, enligt  $S_{dr}$  och  $S_{10z}$ .

## 5.4.2 A2: Standard sätthårdning

Provbit A2 har sätthärdats enligt ett standard recept för att få en grund som går att jämföra med andra variationer (se *avsnitt 4.5*). Provbiten visuellt hade förändrats och blivit mörkare samt mattare.

### 5.4.2.1 Ytfinheten

Under ytstrukturmikroskåpet syntes både höghus och grantoppar (se *bild 5.7*) vilket är de små prickarna på en annars ganska homogen yta.



**Figur 5.7:** Provbit A2 efter sätthårdning.

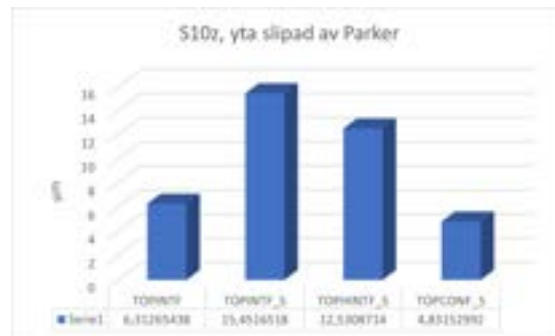
Ytan hade också blivit grövre samt sett en viss tillväxt (se *bild 5.8a*) där  $S_{dr}$  värdet generellt har ökat med 10 procentenheter.  $S_{10z}$  visar också en viss tillväxt (se *bild 5.8c*).  $S_a$  värdet har också ökat vilket innebär att ytan har blivit grovare (se *bild 5.8b*). TOP är ytan slipad av parker och TOPH är samma yta men på en annan position. INTF och CONF är de två olika metoderna för att ta bilderna (se *avsnitt 2.6*) och S betyder sätthärdad. CONF läget är på 100x inzoomning och INTF är på 50x inzoomning.





(a)  $S_{dr}$  jämförelse för A2.

(b)  $S_a$  jämförelse för A2.



(c)  $S_{10z}$  jämförelse för A2.

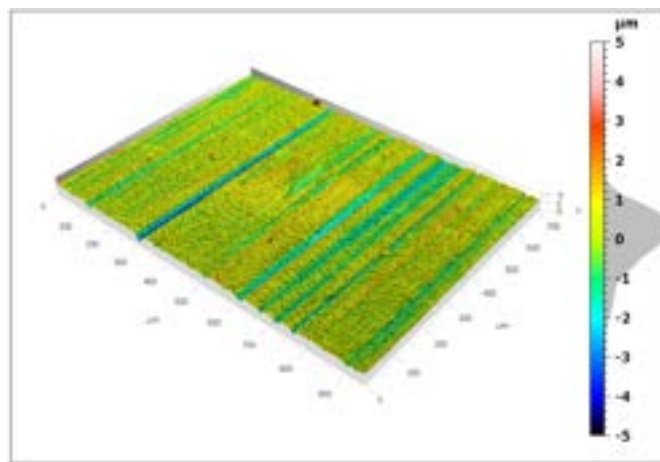
**Figur 5.8:** A1 topografivärden jämförda.

### 5.4.3 B1: Sätthårdning utan anlöpning

Provbit B1 sätthärdades enligt samma metod som A2 (se *avsnitt 4.5*), fast utan anlöpning på slutet. Anledningen till att en provbit kördes utan anlöpning var för att ta reda på vart i processen "höghusen" och "granskogen" bildas, genom att eliminera olika delar i processen.

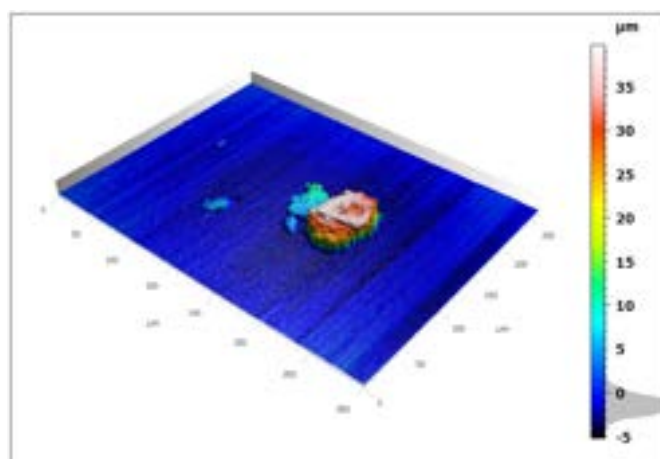
#### 5.4.3.1 Ytfinheten

När B1 studeras under ytstrukturmikroskop kan det konstateras att betydligt fler smuts- och restpartiklar från sätthärdningsprocessen finns kvar.



**Figur 5.9:** B1 efter sätthårdning utan anlöpning.

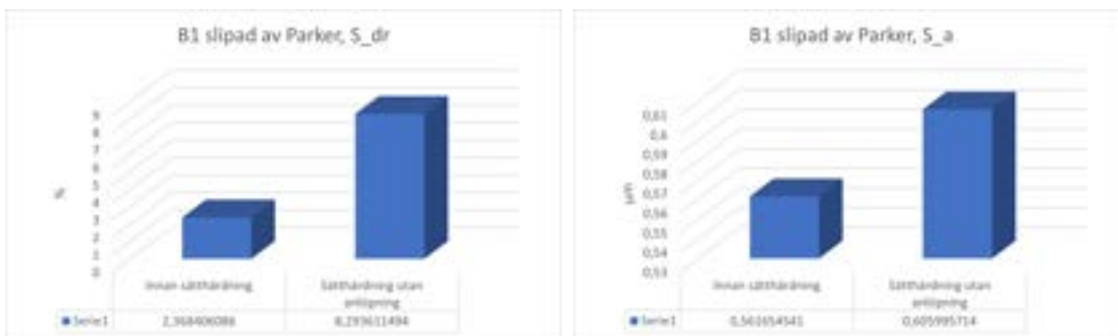
Ett exempel på en smuts- eller restpartikel visas i *figur 5.10* nedan. Skalan är även justerad i denna figur för att få med hela objektet, då det är cirka sju gånger högre än ett vanligt "höghus".



**Figur 5.10:** Objekt som tros var en smuts- eller restpartikel under ytstrukturmikroskop.

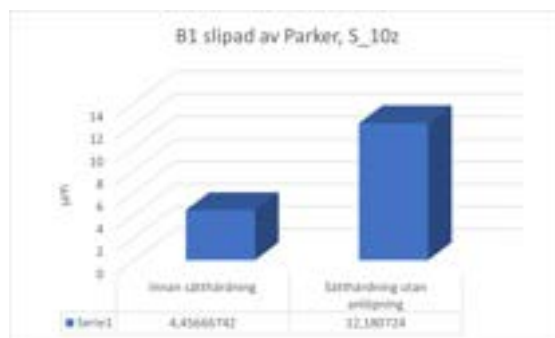
### 5.4.3.2 Mätvärden

Mätvärden i de tre figurerna nedan avser den vanliga ytan och inte specialfallet i figur 5.10.



(a)  $S_{dr}$  jämförelse för B1.

(b)  $S_a$  jämförelse för B1.



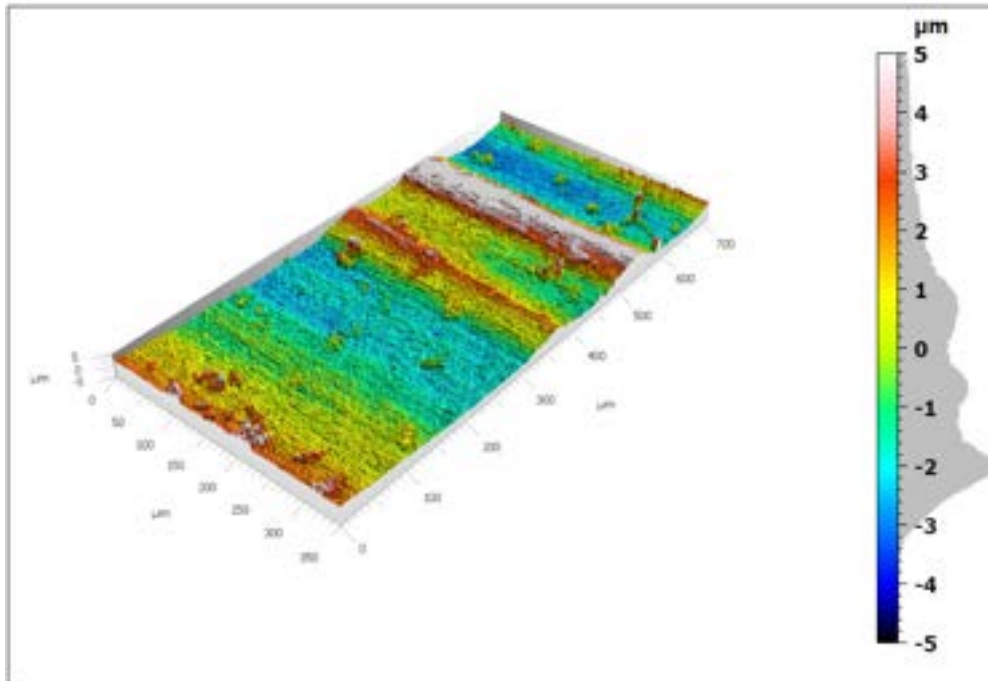
(c)  $S_{10z}$  jämförelse för B1.

**Figur 5.11:** B1 topografivärden jämförda.

Mätvärdena visar tydligt att alla värden har ökat efter sätthårdning, vilket betyder att ytan växt på höjden samt blivit grovare.

#### 5.4.4 K2: Standard sätthårdning

En "riktig" komponent tillverkad av Parker och sätthärdad enligt standard sätthårdning (se *avsnitt 4.5*) hos Bodycote har även undersökts för att få fler mätningar att jämföra mellan.

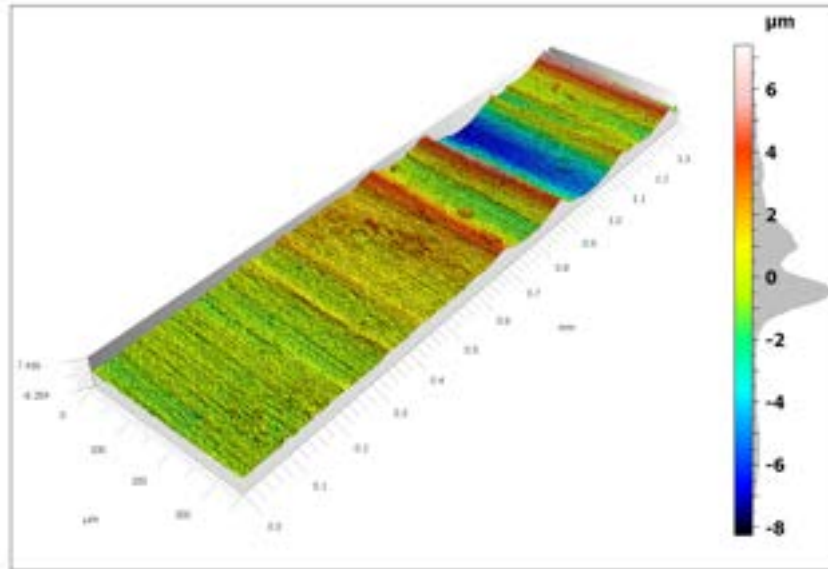


**Figur 5.12:** Komponent tillverkad av Parker under ytstrukturmikroskop.

Återigen syns tydligt artefakter på ytan som föreställer "höghus" och "grantoppar". Ränderna kommer från maskinbearbetning.

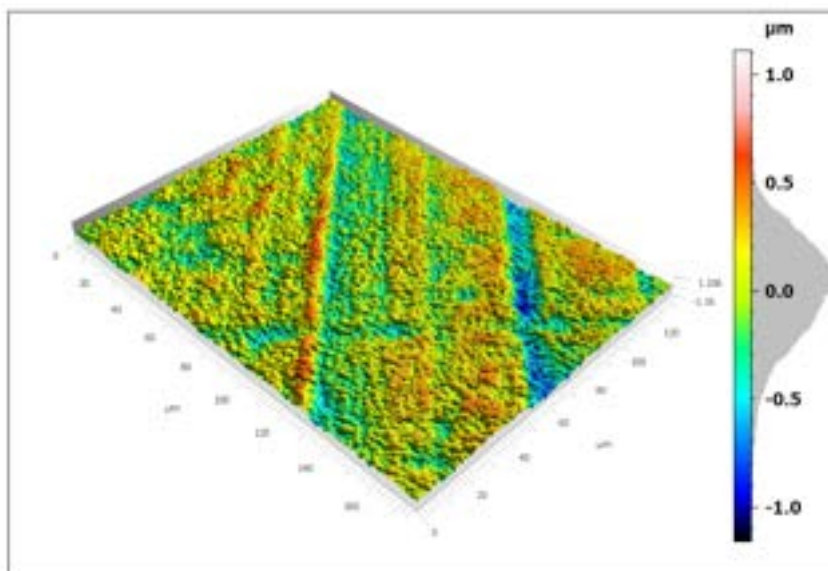
### 5.4.5 K2: Standard sätthårdning samt tvättad

Samma komponent har även undersökts efter att den lätt tvättats av med alkohol.



**Figur 5.13:** Parker komponent under ytstrukturmikroskop efter tvätt med alkohol.

Efter att komponenten tvättats av syns det tydligt att antalet höghus och grantoppar minskat. Dock kvarstår några få höghus på ytan. Ett mönster likt en granskog, som också är tydligt under SEM (se *figur 5.22*), framgår ganska tydligt även här i ytstrukturmikroskopet.



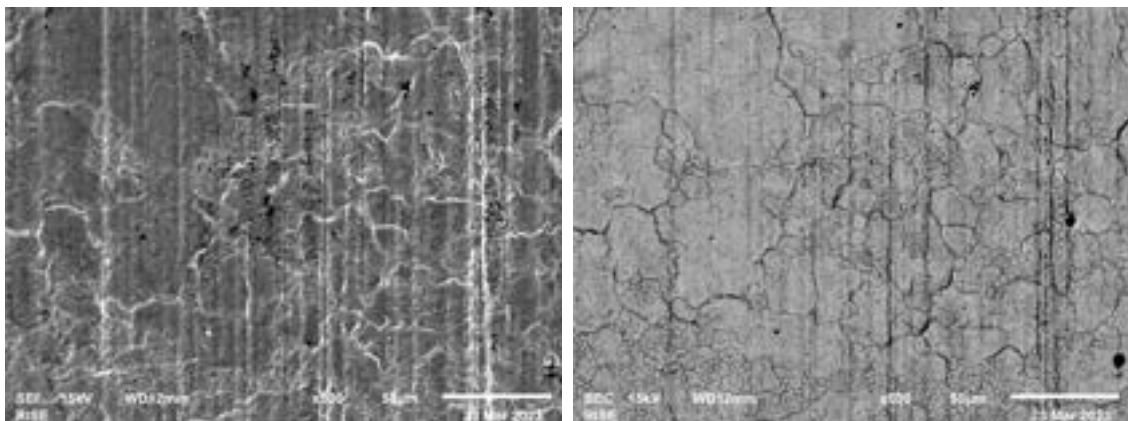
**Figur 5.14:** Granskogsmönster på ytan av en Parker komponent.

## 5.5 SEM/EDS

Genom SEM/EDS analysen gick det att ta reda på vad höghusen består utav, vilket var ett av målen med projektet.

### 5.5.1 A1: LPC

LPC provbiten har en yta som liknar en torkad sjöbotten med spruckna oxider över hela ytan.

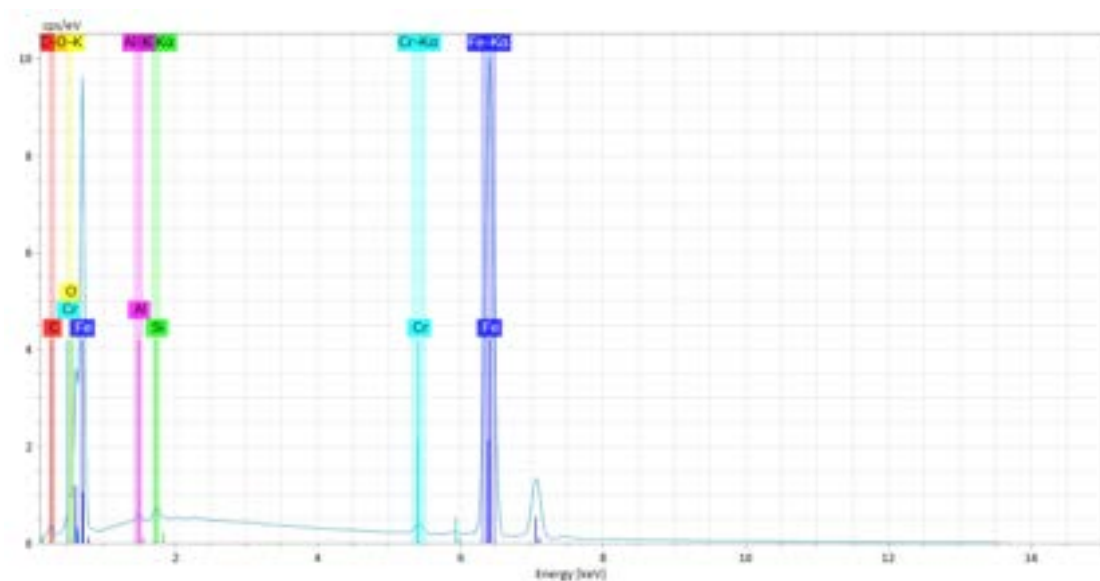


(a) SEI bild av ytan på provbit A1.

(b) BEC bild av ytan på provbit A1.

**Figur 5.15:** SEI och BEC bilder av A1.

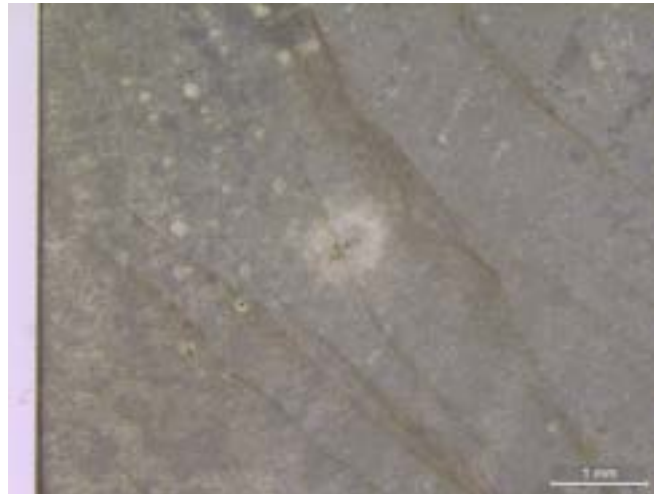
Den kemiska uppsättningen visar att ytan är väldigt homogen och främst består av oxider då det förekommer mycket syre. Detta illustreras i figuren nedan, där topparna i spektrat visar de olika ämnena i ytan.



**Figur 5.16:** Spektra av LPC biten under SEM.

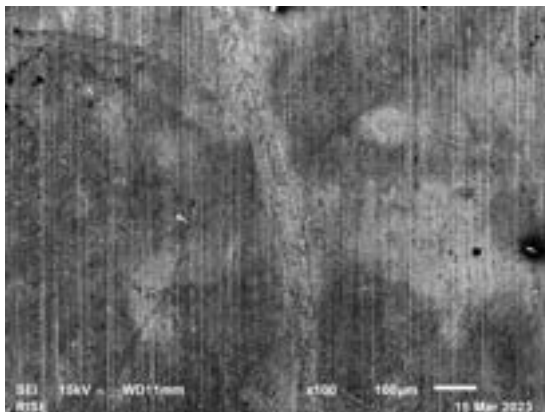
### 5.5.2 A2: Standard sätthårdning

Provbiten A2 är sätthärdad enligt ett vanligt recept och har en väldigt annorlunda yta gentemot A1. Det ser ut som att ytan har segrat sig samt att höghusen kan synas vid vita och svarta prickar på ytan (se *bild 5.17*).

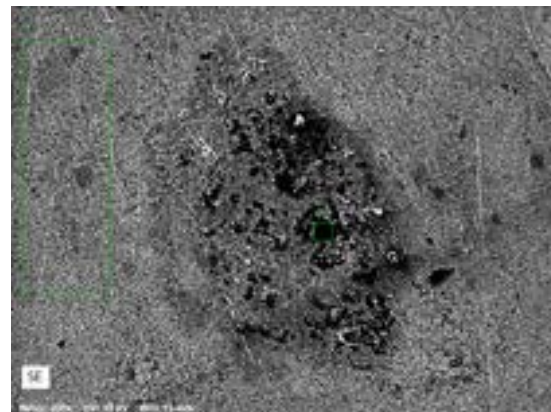


**Figur 5.17:** A2 under stereomikroskop.

I SEM:et analyserades först en överblicks bild av ytan som visar att det finns några små rester som lyser upp starkt. Den vita fläcken i *bild 5.17* analyserades även och det kunde konstateras att den innehöll höghus.



(a) Överblicksbild på provbit A2.



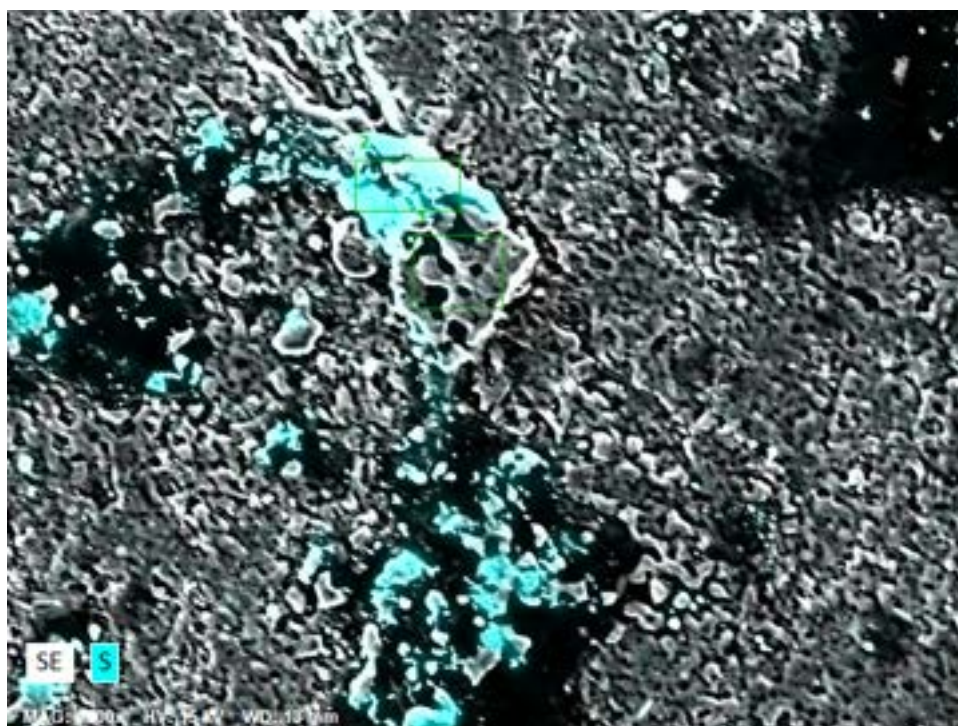
(b) Överblicksbild av ljus fläck.

**Figur 5.18:** Provbit A2.

Spektrum	C	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe
Map		13,24	0,74	1,55	12,19	0,24	0,74	0,90	5,59	8,53	56,28
1		5,40			1,86	0,23		0,15	6,18	5,53	80,65
2	3,50	30,05	0,99	2,08	30,47		2,10	2,48	2,38	11,67	14,28
3	4,72				1,53	0,28				2,31	91,15
4	20,05	42,10	2,65		22,37		3,65			3,83	5,35

**Tabell 5.1:** Spektrum tabell som visar % av olika ämnen i fyra olika områden från figur 5.18b.

Det som sticker ut är ämnen som kisel, svavel, kalium och kalcium, där några är legerings ämnen (*se tabell 2.1*), i allt för höga halter. Närmare analys på ett höghus visar att det består av svavel och rent järn.



**Figur 5.19:** 1500x inzoomning på ett höghus. De blåa områdena är svavel i hög koncentration.

Spektrum	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe
Map	8,68	0,18	0,58	7,71	1,80	0,29	0,80	4,72	7,15	68,09
1	3,27			3,64	0,72		1,27			91,10
2	20,96			15,07	25,55		3,17	5,34	4,07	25,85

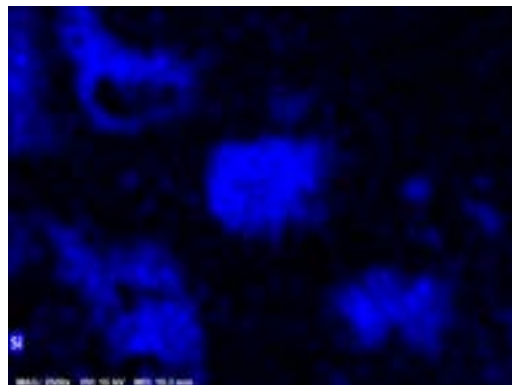
**Tabell 5.2:** Spektrum tabell som visar % av olika ämnen i de olika områden från figur. 5.19



I område 2 (se *figur 5.19* samt *tabell 5.2*) så sticker det ut svavel och kisel återigen med lite kalcium. Området bredvid däremot är nästan 100% järn. Förstoring på andra höghus i samma ljusa fläck visar flera järn höghus samt kisel och svavel höghus.

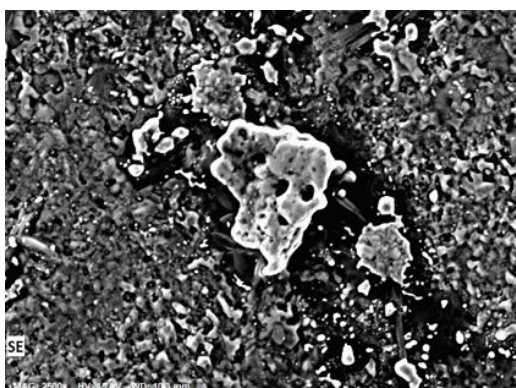


(a) Överblicksbild på kisel klump.

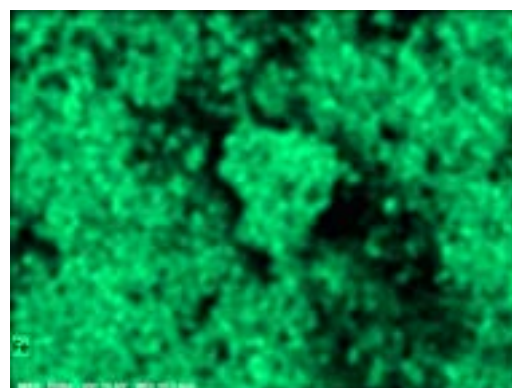


(b) Kisel koncentration.

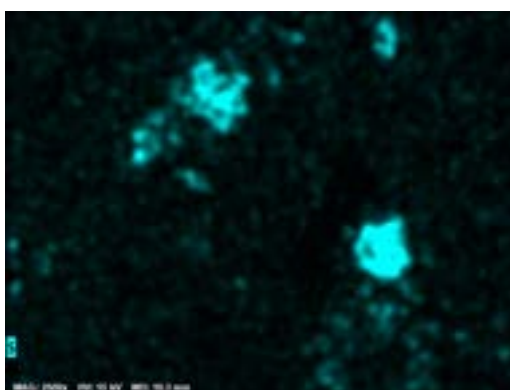
**Figur 5.20:** EDS på provbit A2 på ett höghus.



(a) Överblicksbild på järn höghus.



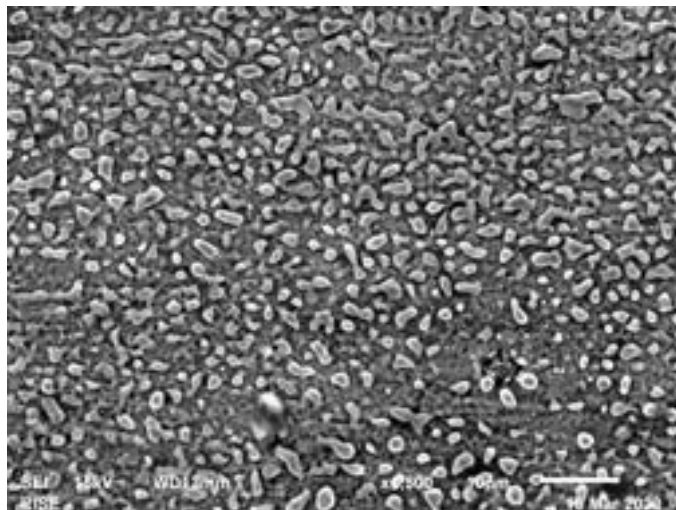
(b) Järnkonzentration.



(c) Svavelkonzentration.

**Figur 5.21:** EDS på provbit A2 på ytterligare ett höghus.

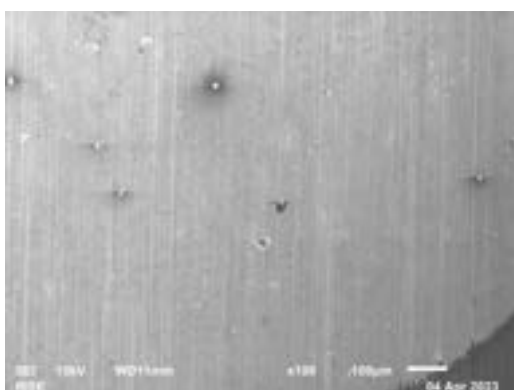
När provbit A2 studerades med hjälp utav SEM upptäcktes även ett mönster av toppar och dalar, vilket illustreras i *figur 5.22* nedan. Detta mönster syns även på alla sätthärdade bitar förutom A1, som är sätthärdad i LPC. Detta mönster tros vara granskog.



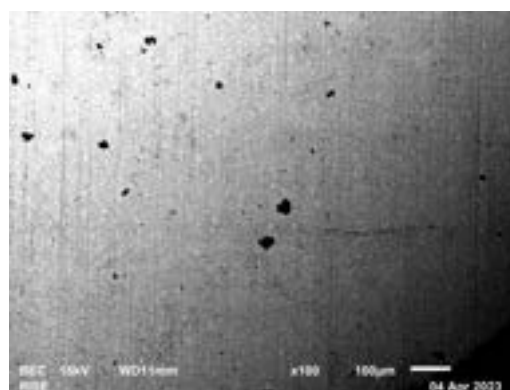
**Figur 5.22:** Granskog på A2.

### 5.5.3 B1: Sätthärdning utan anlöpning

Under ytstrukturmikroskop visades det många höghus och grantoppar. Höghusen bestod mest utav kol och var till synes väldigt genomskinliga.

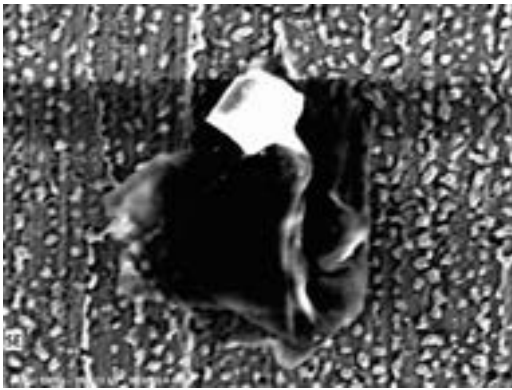


(a) Överblicksbild på B1 SEI.

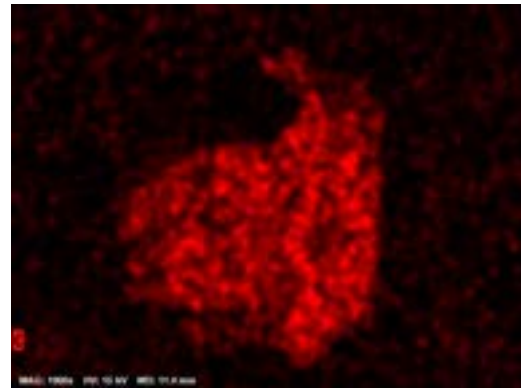


(b) Överblicksbild på B1 BEC.

**Figur 5.23:** SEM B1.



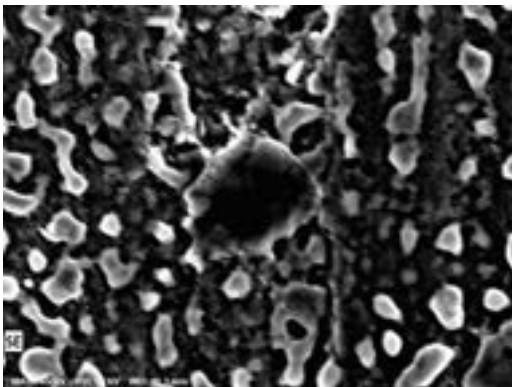
(a) Överblicksbild på kol klump.



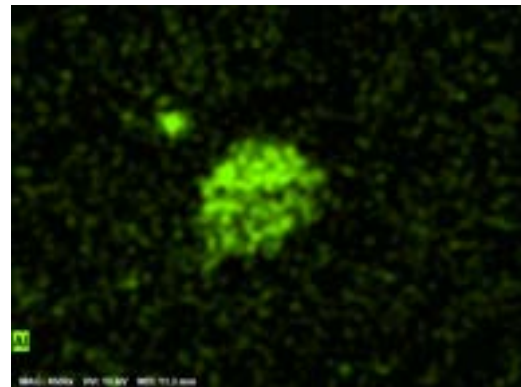
(b) Kolkoncentration.

**Figur 5.24:** EDS B1 P1.

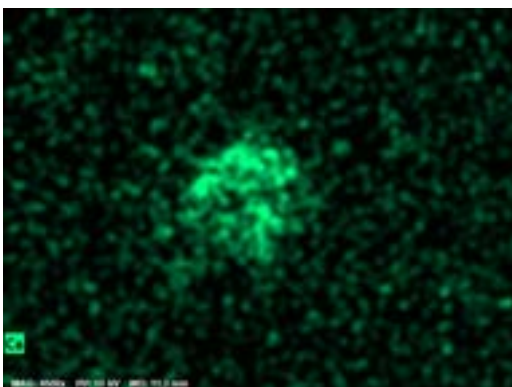
I och med att det fanns så många punkter likt *figur 5.24a* så tvättades ytan med alkohol. Det visade att många av dessa kol-avlagringar försvinner lätt med alkohol. Däremot stannade andra partiklar kvar.



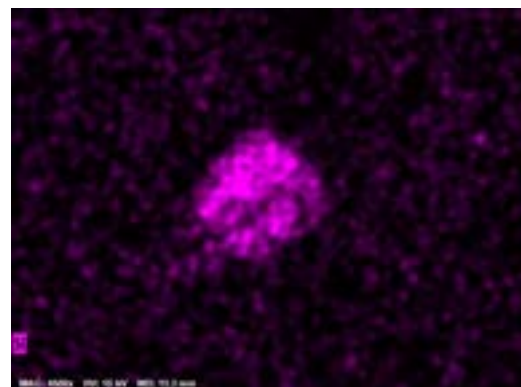
(a) Överblicksbild på Aluminium korn.



(b) Aluminium koncentration.



(c) Kalcium koncentration.

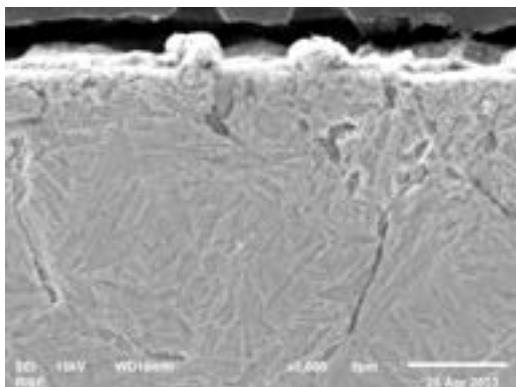


(d) Kisel koncentration.

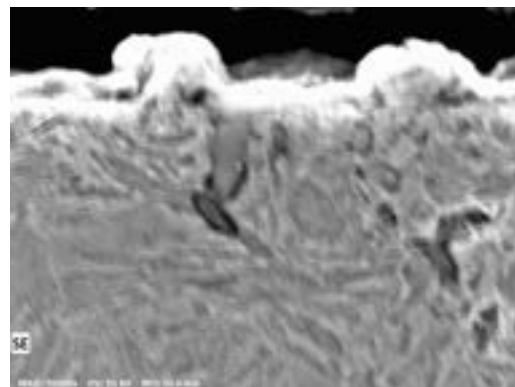
**Figur 5.25:** Aluminiumkorn.

### 5.5.4 K2 kapad

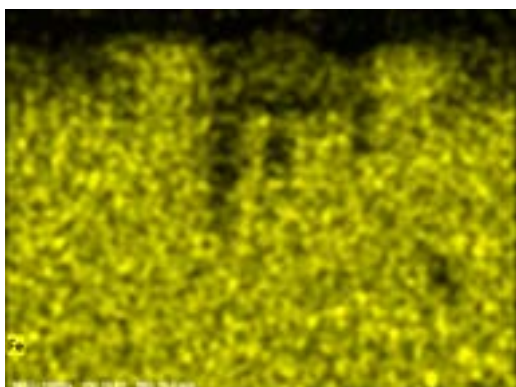
Parker komponent K2 har kapats enligt avsnitt 4.2 för att kunna titta på tvärsnittet. Tvärsnittet visar hur granskogen ger en mer ojämn yta (se figur 5.26a till 5.26d).



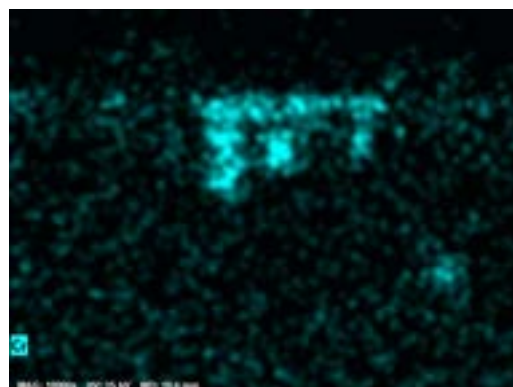
(a) Överblicksbild på K2 granskog tvärsnitt.



(b) Överblicksbild på K2 granskog tvärsnitt.



(c) Järnområde.



(d) Kromet visar positionen av oxiden.

**Figur 5.26:** K2 granskog tvärsnitt.

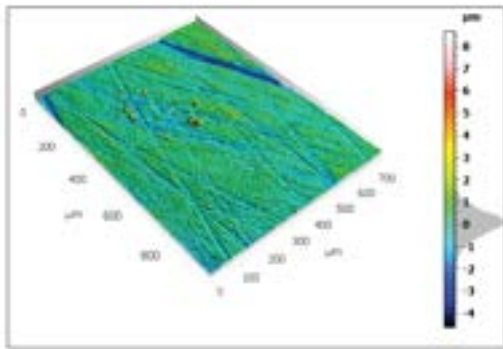
De ljusa områden är tyngre ämnen som järn (stål) och de mörkare områden är oxiderade legeringsämnen som till exempel krom, mangan och kisel.

## 5.6 Ultraljudstvätt

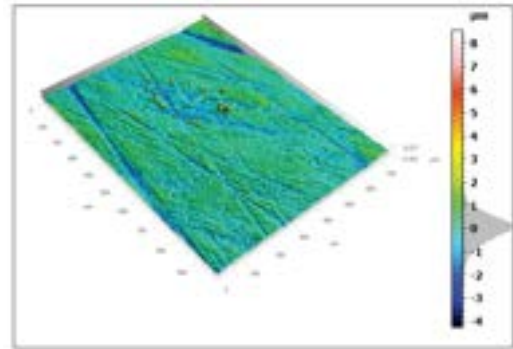
Provbitarna A2 och K1 utsattes för ultraljudstvätt då de var standard sätthärdade. Detta för att titta på hur en standard komponent påverkas av att tvättas samt om höghusen och grantopparna påverkas av en mekanisk rengöring.

### 5.6.1 A2 Sätthärdad ultraljudstvätt

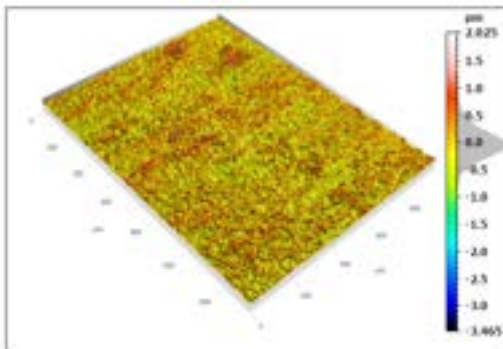
Hos provbit A2 syntes det att material hade avverkats från ytan. Tillsynses har grantopparna växt uppåt och randoxiderna har rensats.



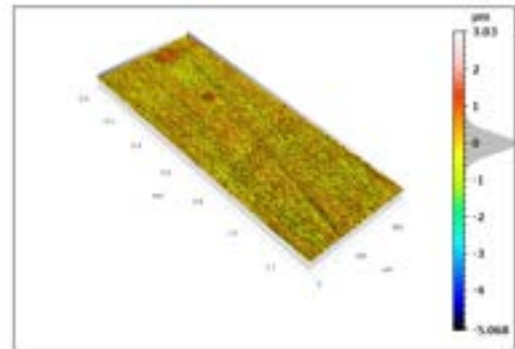
(a) A2 P120 TVÄTTAD 60s.



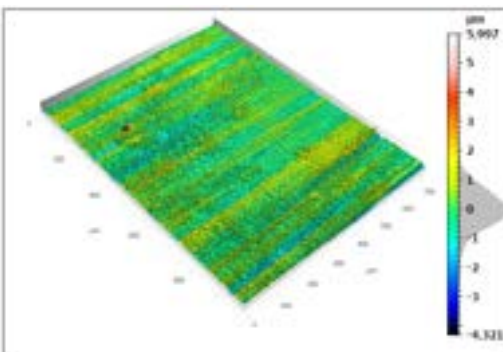
(b) A2 P120 TVÄTTAD 360s.



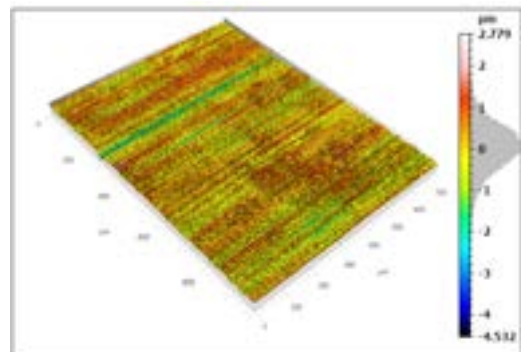
(c) A2 P500 TVÄTTAD 60s.



(d) A2 P500 TVÄTTAD 360s.

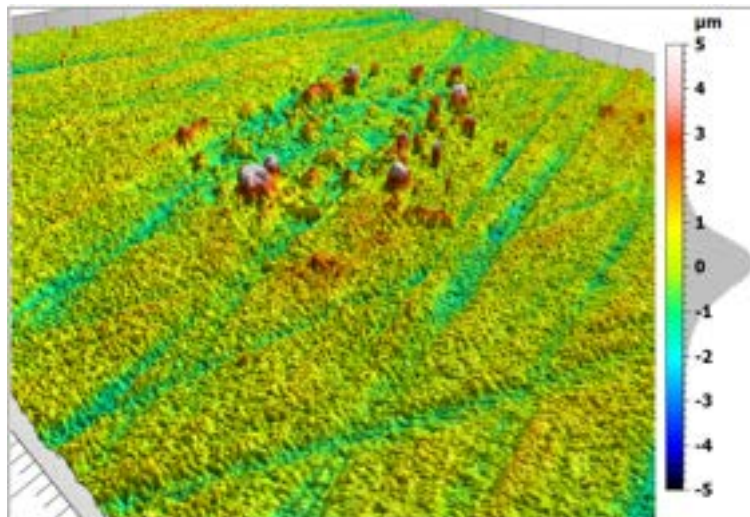


(e) A2 TOP TVÄTTAD 60s.



(f) A2 TOP TVÄTTAD 360s.

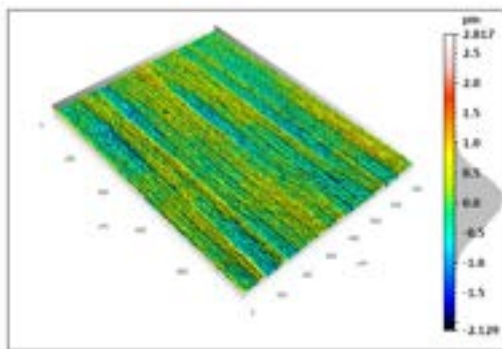
**Figur 5.27:** A2 sätthärdad efter olika lång ultraljudstvätt.



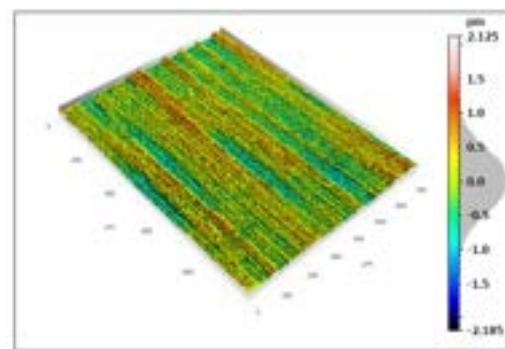
Figur 5.28: Ljus fläck under ytstrukturmikroskop.

### 5.6.2 K1 ultraljudstvätt

Provbit K1 såg samma förändring som A2.



(a) K1 TVÄTTAD 150s.



(b) K1 TVÄTTAD 390s.

Figur 5.29: K1 med ultraljudstvätt.

På båda provbitarna försvann alla höghusen som bestod av oljerester och järnhöghusen stod kvar (se *bild 5.27a* & *bild 5.27b*). Dock har de blivit kortare, vilket blir tydligt när *bild 5.27a* & *bild 5.27b* jämförs med *bild 5.28*.

# 6

## Slutsatser

I detta kapitel kommer resultaten sammanställas i slutsatser. De huvudsakliga resultaten kommer att undersökas om hur de svarar på forskningsfrågorna och syften som var i fokus för studien. Vilka mönster, tendenser och samband som har identifierats och vilka slutsatser som kan dras utifrån dessa resultat.

### 6.1 Grantopparna

*Figur 5.22* och *avsnitt 5.5.4* är det Grantoppar som undersökts. De vita prickarna innehåller mestadels järn, medan de svarta områdena runt omkring är en oxid av legeringsämnen som finns i *tabell 2.1*. Detta mönster liknar Turing-mönstret, vilket är en matematisk modell som beskriver hur atomer binder sig till varandra i naturen.

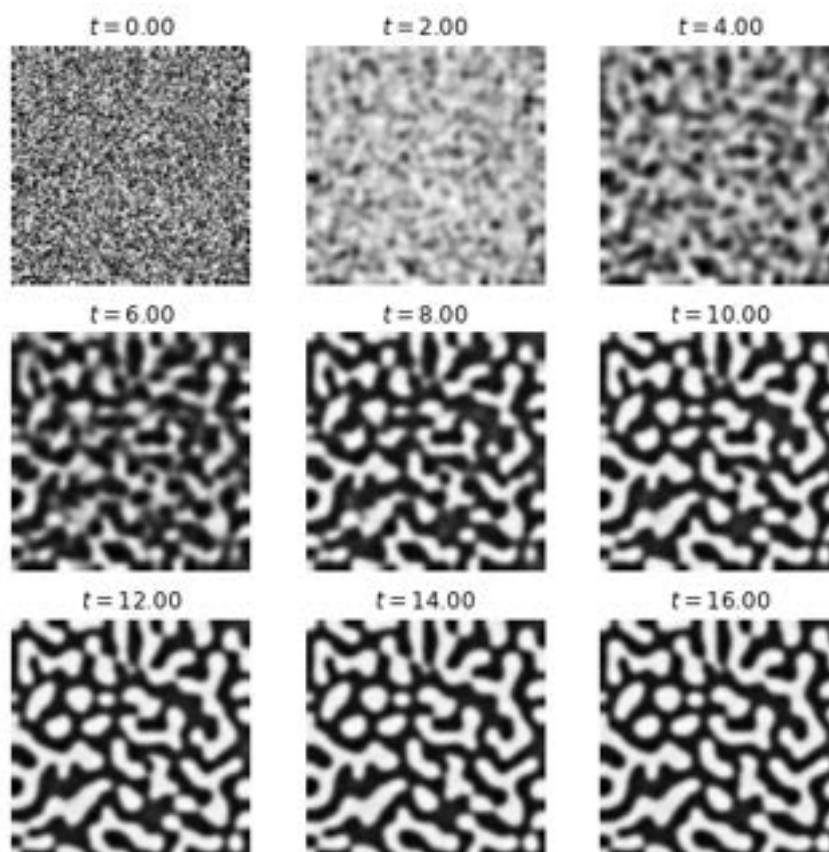
Turing-mönstret är uppkallat efter den brittiske matematikern Alan Turing, som först beskrev detta fenomen i en artikel från 1952 (Turing, 1952). Turing-mönstret har sedan dess studerats i en mängd olika sammanhang, inklusive biologiska, kemiska och fysiska system. Turing-mönstret kan uppstå i många olika situationer där det finns en konkurrens mellan två eller flera kemiska processer. Ett exempel på detta är i hudmönster hos djur, där det finns en interaktion mellan två kemikalier som styr bildandet av mönstret.

Att förstå Turing-mönstret är viktigt eftersom det kan ge insikt i grundläggande processer som styr mönsterbildning i provbitarna. Dessutom kan det ha tillämpningar inom teknikområden som materialvetenskap, där det är viktigt att kunna kontrollera mönsterbildning på mikronivå för att skapa nya ytor med specifika egenskaper.

När provbitarna är i ugnen så kan de vara upp mot 900°C varma. Det innebär att stålet befinner sig i en fas kallad austenit. När stålet är i austenit fasen så är det väldigt mottagande till förändring. Eftersom provbitarnas yta ökar i temperatur börjar det bildas randoxider runt kornen som ökar i volym och tar plats från järnet. Järnet kan endast röra sig uppåt ur ytan och formar toppar av järn på ytan som sett i *bild 6.2a*. Det lämnar kvar randoxiderna mellan järntopparna som bildar Turing mönstret.

Processen stämmer överens med hur Turing beskriver hur olika atomer binder sig med varandra samt att detta mönster bildas baserat på olika yttre faktorer som diffusionskoefficienter och tid. Ett bra exempel på detta är *figur 6.2c* då oxiden ligger i en dal där järn har tryckts uppåt till sidan och ut ur ytan.

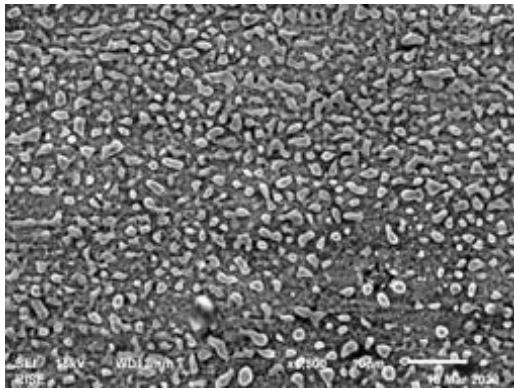
Genom att använda datorer kan man simulera olika kvoter av diffusionskoefficienter och visa hur mönstret bildas över tid. Detta ger en djupare förståelse för hur dessa mönster skapas och kan hjälpa till att förutsäga mönstret som bildas på provbitens yta (se *bild 6.1*). Jämförs  $t=8.00$  i *figur 6.1* nedan med *bild 6.2a* så syns en tydlig liknelse.



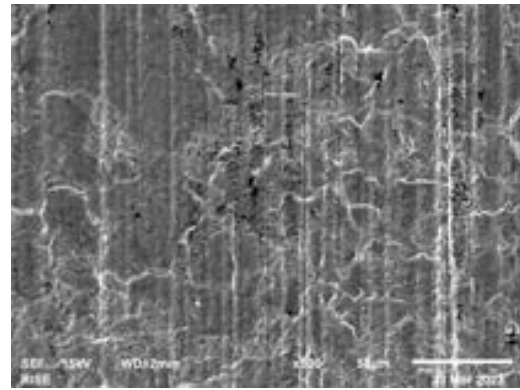
**Figur 6.1:** Simulerat Turing-mönster.

Jämförelsen mellan A1 (LPC) och A2 visar att tiden som spenderas i ugnen är en faktor som påverkar utvecklingen av Turing-mönster på provbiten (se *figur 6.2a* och *6.2b*). Det syns att LPC provbiten har ett mindre utvecklat Turing-mönster jämfört med A2 och A1 liknar mer  $t=0,00$  på vissa ställen. Detta beror troligtvis på att det bildas mindre oxid i en LPC-ugn, vilket resulterar i mindre tillfällen för mönstret att bildas på provbiten samt att tiden som provbiten spenderade i ugnen är kortare (se *avsnitt 4.5*). I K2 kapad (se *figur 6.2c*) syns det tydligt att grantopparna bidrar till en mer ojämn yta och att det är järn toppar omringade av oxider.

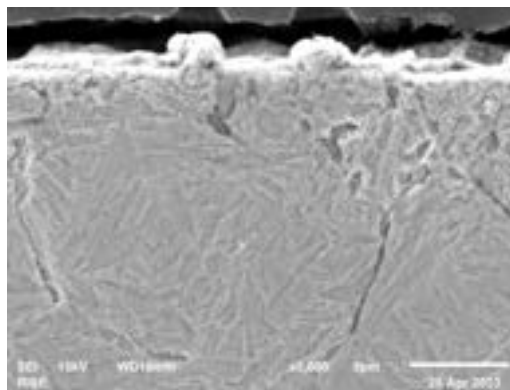




(a) Överblicks bild på A2 SEI.



(b) Överblicks bild på A1 SEI.



(c) Överblicks bild på K2 granskog tvärsnitt.

**Figur 6.2:** Jämförelse i SEM mellan A1 & A2.

### 6.1.1 Ultraljudsvätt

Efter ultraljudsvätten syns det tydligt att grantopparna har avrundats och blivit trubbigare. Dem har även blivit lite kortare. Det innebär att för att ta bort dem och få en jämn yta krävs det starkare mekanisk rengöring i form av polering eller slipning.

### 6.1.2 Sammanfattning slutsatser av grantopparna.

Sammanfattningsvis så kommer granskogsmönstret från grundmaterialet och uppstår i ugnen där stålet är mer mottagligt till förändring. Detta förstärks även då det inte syns någon markant skillnad mellan A2 sätthärdad och B1 sätthärdad utan anlöpning i mönstret som bildas.

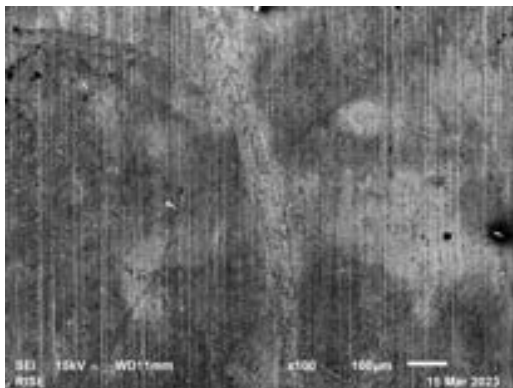
Genom att kontrollera tiden provbitarna är i ugnen kommer mönstret att anta olika stadier av utveckling. Ytterligare om mönstret ska förändras kan stålsorten vara en variabel då olika diffusionskoefficienter samt mängden oxid bildas vilket ska ge olika mönster enligt (Turing, 1952).

## 6.2 Höghus

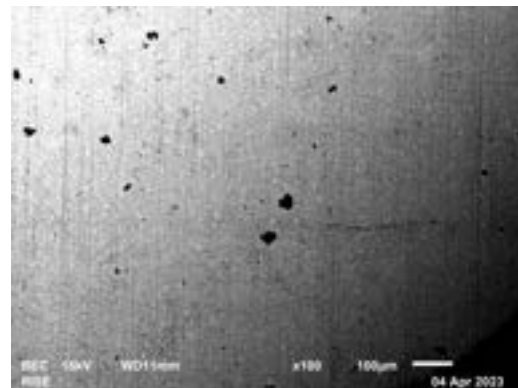
Höghus karaktäriseras som relativt stora korn som är  $\geq 10 \mu\text{m}$  höga. De består till stor del av kol, kisel, svavel, kalium, kalcium, aluminium (på ytan slipad av parker) och väldigt sällan järn. Detta är till störst del beståndsdelarna av härdolja som komponenterna släcks i. När komponenten kommer ut ur ugnen och släcks går oljan igenom tre faser: ångstadiet, kokstadiet och konvektivstadiet.

När komponenten utsätts för den höga temperaturen i oljan, skapas ett ångskikt runt komponenten. Under detta stadium är kylningen långsam och värme avlägsnas endast genom strålning genom ångskiktet (*Valvoline Global Operations, u. å.*). Resterna från ångan bränns då fast på stålets yta och bildar höghusen.

Höghusens ursprung från härdolja förstärks eftersom mängden och storleken på höghusen var större på provbit B1 utan anlöpning jämfört med A2 sätthårdning (se *figur 6.3a & 6.3b*). EDS på de svart prickarna visar att det är till största del kolrester på B1 (se *avsnitt 5.5.3*). Dessa syns ej i samma utsträckning på A2 vilket antyder på att dem försvinner vid den alkaliska tvätten hos Bodycote eller under anlöpning.



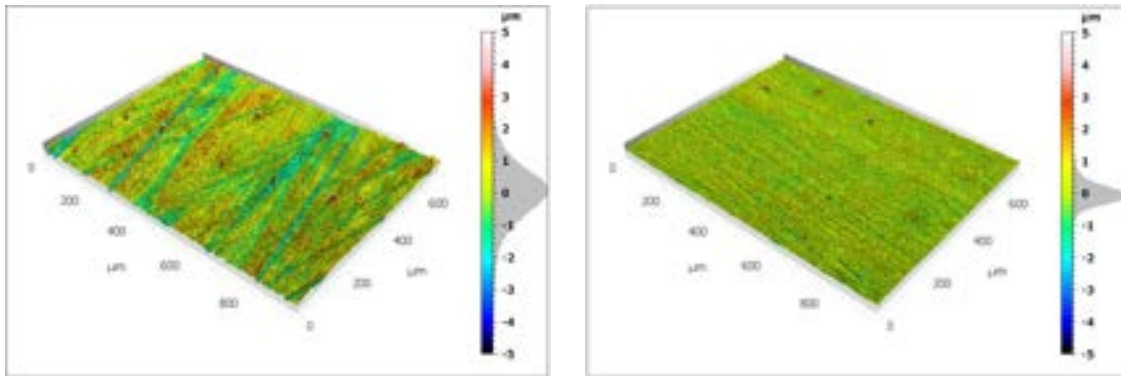
(a) Överblicks bild på A2 SEI.



(b) Överblicks bild på B1 SEI.

**Figur 6.3:** SEM A1 & A2 jämförelse.

Ytterligare en sak som är värd att nämna är att det uppstod fler höghus på de grövre ytorna än de finare. Detta kan ses som ett bevis på ett höghusen består av rester från härdolja, då de grövre ytorna håller fast oljan bättre eftersom de blir lite som henade ytor. Det här illustreras också i *figur 6.4* nedan, där en yta slipad med P80 och en med P500 jämförs för provbit A2.



(a) Ytstrukturbild på A2 P80.

(b) Ytstrukturbild på A2 P500.

**Figur 6.4:** Jämförelse mellan ytstrukturen hos A2 P80 och A2 P500.

### 6.2.1 Ultraljudstvätt

Efter ultraljudstvätten så sitter de hårda höghusen kvar på A2 (se *avsnitt 5.6*) vilket antyder på att det behövs en mer aggressiv mekanisk tvätt för att ta bort höghusen.

### 6.2.2 Specialfall

Ett specialfall har även observerats där ”hughus” av rent järn upptäckts. Detta specialfall beskrivs i *avsnitt 5.5.2*. I området runt järnhöghusen fanns det mycket oxider och i anslutning till järnhöghusen fanns det även toppar av svavel. På grund av all oxid runt området kan det vara samma fenomen som för ”grantopparna”. Detta är dock i så fall ett extremfall där det oxiderat extra mycket vilket gör att mer järn växt uppåt än för ”granskogen”. Det skulle även kunna vara korn som skjutits upp ur ytan på grund av power law dislokation.

Eftersom de består av järn samt sitter fast på ytan måste ”järnhöghusen” komma från materialet och inte från till exempel härdoljan.

### 6.2.3 Sammanfattning slutsatser av Höghusen

”Höghusen” består av kol, kisel, svavel, kalium, kalcium, aluminium och väldigt sällan järn. ”Höghusen” kommer sannolikt från härdoljan då den befinner sig i ångstadiet, då bränns det fast beståndsdelar av oljan på komponenten. Kol försvinner lätt under resterande processer som tvätt och anlöpning medan de andra ämnena som kisel och svavel sitter fast lite hårdare. Järntopparna kan dock ej komma från härdoljan och ger en viss avvikelse. De diskuteras ytterligare under (*avsnitt 7.2.2*).

### 6.3 Utvärdering av hypoteser

I *avsnitt 3* togs några hypoteser kring varför ”höghusen” och ”granskogen” bildas fram. Hypotes 1 (Grafit-bildning 3.1), 3 (Metal dusting 3.3) och 4 (Restspänningar 3.4) kan direkt avfärdas då data från undersökningen visar på att dessa inte stämmer. Med hjälp av EDS analyser som visar vad höghusen består utav kan metal dusting och grafitbildning avfärdas, då höghusen helt enkelt består utav andra ämnen. Dock finns spår utav kol i höghusen, men detta anses komma från härdolja och inte från grafitbildning hos stålet.

Restspänningar kan ej bidra till tillväxt av höghus då det skulle synas mellan A2 slipad och A2 avspäningsglödgd då det introduceras restspänningar vid slipningen. Det är också motsatt skillnad mellan A2 sätthärdad och B1 icke anlöpt då B1 har flera höghus trots att restspänningar introducerade vid släckning har släppts vid anlöpning.

Hypotes 2 (Oxidation 3.2) och 5 (Smuts eller restpartiklar från process 3.5) verkar vara rimliga. I hypotes 2 är det dock järntopparna växer uppåt snarare än själva oxiden. Dock har oxiden en viss påverkan på granskogen. Hypotes 5 stämmer bra överens med datan som visar tydligt att det är rester och smuts från härdoljan som bidrar till tillväxten av höghus.

# 7

## Diskussion

Under diskussions avsnittet kommer metoden, resultatet och slutsatsen att diskuteras för vad som kan gjorts annorlunda och vilka saker som skulle kunna förbättras i arbetet. Ett avsnitt kommer även innehålla rekommendationer för framtida forskning, samt eventuella begränsningar och utmaningar som studien mötte. De praktiska tillämpningarna av resultaten och hur de kan användas för att förbättra relevanta områden inom värmebehandling (sätthårdning).

### 7.1 Metod

I detta avsnitt beskrivs hur metoder valdes för att undersöka hur sätthårdning påverkade de provbitar som användes och vad som skulle kunna förbättras.

#### 7.1.1 Slipning

Metoden valdes baserat på hur en verklig produktion skulle ha sett ut och provbitarna slipades relativt grova för att spegla den verkligheten.

I efterhand var det huvudsakliga målet med projektet att hitta artefakter och tillväxter från ytan under sätthärtningsprocessen. För att underlätta detta borde provbitarna ha slipats och polerats tills de var helt blanka för att ta bort så mycket ytstruktur som möjligt.

Genom att eliminera all ytstruktur innan provbitarna gick in i sätthärtningsprocessen blir det lättare att se om det har skett någon förändring. Detta skulle ha gjort det lättare att undersöka hur sätthärtningsprocessen påverkade ytan på provbitarna och om det fanns några artefakter eller tillväxter som uppstått under processen.

Således kan man dra slutsatsen att slipning och polering av provbitarna skulle ha varit en mer lämplig metod för att uppnå syftet med projektet och möjliggöra en mer noggrann analys av sätthärtningsprocessen.

Trots det har metoden fungerat för syftet av projektet men det har gjort det svårt att förankra slutsatsen då det finns en stor variabel som är ytstrukturen.

Slipningen genomfördes också för hand vilket betyder att trycket på provbiten inte var jämnt. Detta ledde till att slipningen i hörnen inte var tillräckligt konsekvent för att genomföra mätningar i hörnen, vilket betyder att ytstrukturmätningar endast genomfördes i mitten av provbitarna. För att förbättra resultatet kunde en slipmaskin användas istället, vilket skulle ha gett en jämnare slipning.

### 7.1.2 Avspänningsglödningen

Avspänningsglödningen genomfördes på provbit A2 efter slipningen för att se om det ger någon skillnad i ytstrukturen vilket det ej gjorde. Därför avspänningsglödades inte resterande provbitar igenom projektets gång.

### 7.1.3 Mätning av ytfinheten

Under projektets gång användes ett ytstrukturmikroskop för att ta bilder och mäta ytfinheten. På grund av tidsbrist och hand slipning togs det endast data i mitten av provbiten för att den var garanterat slipad till graden av slippappret. Bilderna togs i ett 3x3 mönster och var som störst  $\simeq 3,5 \cdot 4,5$  mm och minskade beroende på förstoringen av ockuläret. Efter sätthårdning var även ytan väldigt svår att mäta på vilket krävde mer förstoring vilket leder till en ännu mindre mätt yta. Det innebär att höghus och grantoppar kan ha funnits på ytan då provbiten var mycket större (se bild 7.1a, 7.1b & 7.1c).



(a) Toppytan.



(b) Långsidan.



(c) Kortsidan.

**Figur 7.1:** Provbit A2s storlek. Notera att alla provbitarna är ungefär denna storleken.

För att förbättra detta skulle det behövas mer tid för att kunna ta flera mätningar på ytan eventuellt om det finns snabbare sätt att mäta ytstrukturen. Mikroskopet har även en viss pixelstorlek. Det innebär att om något är smalare än en pixel som kommer det inte registreras hos mikroskopet.

### 7.1.4 Sätthårdning

Sätthårdningen utfördes av Bodycote och följde ett vanligt recept de brukar använda vid sätthårdning. Dock skiljer sig A1 LPC då den kördes i ett standard recept som bodycote använder. Det innebär att det uppkolade skiktet var mindre jämför med den sätthärdade provbiten. Det är därför svårt att jämföra dem direkt mot varandra då härdrecepten är utvecklade för olika användnings områden.

### 7.1.5 SEM/EDS

En av begränsningarna med användningen av SEM/EDS-mikroskopet är att det bara kan användas av personal på RISE, vilket innebär att andra användare måste samarbeta med RISE för att genomföra en analys. Detta har lett till logistiska utmaningar och har förlängt tiden det tar att genomföra en analys av provbitarna.

En annan potentiell begränsning med SEM/EDS-analysen är att det kan vara en ganska tidskrävande process att undersöka provbitarna en efter en, vilket innebär att det kan vara möjligt att vissa ”grantoppar” eller ”höghus” eller inte har upptäckts. Särskilt eftersom det var tre provbitar med fem sidor var att analysera, så finns risk viktiga detaljer har missats.

## 7.2 Resultat

I detta avsnitt kommer resultaten av studien att diskuteras och jämföras med de hypoteser som ställdes i början av projektet. Dessutom kommer eventuella avvikelser från hypoteserna att undersökas för att bestämma möjliga orsaker till dessa skillnader.

Vid identifiering av avvikelser kommer dem undersökas för att hitta möjliga orsaker till skillnaderna och bestämma om det finns några faktorer som kan ha påverkat resultaten. Det kan vara så att den använda metoden, mätutrustning eller andra faktorer kan ha påverkat resultaten. Dessa faktorer bör undersökas och diskuteras i detalj för att få en djupare förståelse av resultaten och hur de kan tolkas.

Sammanfattningsvis kommer detta avsnitt att diskutera och analysera resultaten av studien och identifiera eventuella avvikelser från hypoteserna. Det kommer att undersöka möjliga orsaker till skillnaderna och ge en bredare förståelse av resultaten och deras tolkning.

### 7.2.1 Ytstruktur på sätthårdning

Efter sätthårdning så syntes det tydligt många höghus samt grantoppar. Eftersom höghusen och grantopporna skulle bevaras så tvättades provbitarna ej innan dem analyserades. Det betyder att vissa höghus och artefakter som dykt upp kan ha varit smuts från omgivningen till exempel damm eller hudavlagringar. Resultat stämde dock överens med de bilder Parker hade tillhandahållit vilket bekräftade att de artefakter som producerats är dem Parkers även sett.

Resultatet av B1 utan anlöpning var en avvikelser från hypoteserna då den hade ännu flera höghus än A2. Det skiftade fokus från att artefakterna dyker upp vid anlöpning till att det sker i ugnen och härddoljan.

### 7.2.2 SEM/EDS

SEM/EDS på provbitarna visade att det var främst kol och oljerester som var höghusen och grantopporna var ett specifikt mönster i ytan. Det som sticker ut är den ljusa fläcken som syns i *figur 5.17* som innehåller toppar av järn. Dessa järn toppar har ENDAST observerats på denna ljusa fläcken.

Den ledande teorin bakom järntopporna är att det är en form av grantoppar där det har bildats extra mycket oxid, detta kan ha uppstått på grund av olika faktorer som exempelvis föroreningar i materialet. Järnet har ännu mindre plats att stelna på och måste därför växa mer på höjden jämfört med granskogen runt den ljusafläcken. Detta bildar då dessa toppar som observerats under SEM:et

## 7.3 Slutsatser

Projektet har undersökt en rad olika faktorer och genomfört flera analyser för att få en djupare förståelse av sammansättningen och egenskaperna hos höghus och grantoppar. Utifrån den data som finns tillgänglig har projektet kommit fram till slutsatser som är rimliga och baserade på de analyser som utförts.

Det är dock viktigt att betona att projektet hade vissa begränsningar, exempelvis tidsramen för att utföra analyserna och tillgången till utrustning för vissa av analyserna. Givet mer tid och resurser hade projektet kunnat genomföra fler analyser och undersökningar, vilket i sin tur kunde ha lett till en annorlunda slutsats kring höghus och grantoppar.

Det är alltid viktigt att ha i åtanke att forskning och undersökningar kan vara begränsade av olika faktorer och att det alltid finns utrymme för vidare studier och undersökningar. Genom att fortsätta utveckla tekniker och metoder för att utföra analyser och genomföra mer omfattande undersökningar kan vår förståelse av höghus och grantoppar öka.



## 7.4 Besvarande av frågeställningar

I *avsnitt 1.4* togs följande frågeställningar fram:

- Varför uppstår ”höghusen” och ”grantopparna”?
- Vad består de av?
- Hur påverkar de egenskaperna hos stålet?
- Beroende på dess påverkan på stålets egenskaper, går det att minimera hårdbearbetning efter sätthärdning?

Svaren på delar av dessa frågor finns utspritt i *avsnitt 6* men sammanställs i detta avsnitt.

### 7.4.1 Varför uppstår ”höghusen” och ”grantopparna”?

Grantopparna uppstår troligen på grund av ett fenomen som kallas Turing-mönster, vilket är en matematisk modell som beskriver hur atomer binder sig till varandra i naturen. Denna matematiska modell kan också appliceras hos metaller, då det kan uppstå i många olika situationer där det finns en konkurrens mellan två eller flera kemiska processer. Enligt de genomförda studierna kan grantoppsmönstret hos provbitarna liknas med simulerade Turing-mönster. Slutsatsen är troligen därför att grantopparna uppstår för att de olika kemiska ämnena i stålet binder sig till varandra på olika sätt, vilket leder till att ett Turing-mönster uppstår. Mer om detta finns att läsa i *avsnitt 6.1*.

Höghusen uppstår eftersom härdoljan bränns fast under kylning på ytan av stålet. Det lämnar rester av ämnen på ytan av stålet, vilket bildar höghusen. Alltså bildas höghusen av rester från härdoljan. Mer finns att läsa i *avsnitt 6.2*.

### 7.4.2 Vad består de av?

De flesta höghusen består utav kol, kisel, svavel, kalium, kalcium och aluminium som är beståndsdelar i härdoljan. Aluminium är den enda avvikelser och kommer från slipskivan Parker använt för att slipa ytan.

Granskogen består utav små toppar av rent järn och dalar med oxider utav legeringsämnen. I *figur 6.2a* som visar granskogen är järnet de ljusa bitarna medan oxiderna är de mörka områdena runt om järnet.

### 7.4.3 Hur påverkar de egenskaperna hos stålet?

Stålet får en viss tillväxt mellan topparna och dalarna. Det påverkar värden som  $S_a$ ,  $S_{dr}$  &  $S_{10z}$ . Det innebär att om det är väldigt små tolerans på komponenten kan dem överstigas vid sätthärdning. Dock har det ej gjorts några funktions test så dess egenskaper i verkligheten har ej testats.

#### 7.4.4 Beroende på dess påverkan på stålets egenskaper, går det att minimera hårbearbetning efter sätthårdning?

Och till sist, går det att minimera hårbearbetning efter sätthårdning? Svaret på denna frågan beror lite på vad man har för toleranser. Ifall dimensionstoleranserna för komponenten är väldigt fina (till exempel  $<10 \mu\text{m}$ ) behöver komponenten fortfarande hårbearbetas för att få bort de höghus som bildas av rester från härdoljan samt de få som består utav järn. Dock skulle det behövas mer forskning på hur ofta järnhöghusen uppstår då detta projektet endast observerat två stycken i ett område. Hårbearbetning behöver inte vara så grov som den är idag. Polering bedöms enligt projektet som lämplig bearbetningsmetod för att kunna avverka dem ojämnheter som observerats, dock skulle det behövas ett funktions test för att bekräfta detta. Detta bedöms eftersom ytans grovhet ökar inte så mycket efter sätthårdning. Då kan komponenten bearbetas till en finare ytstruktur innan härdning och därefter kan ojämnheter poleras bort.

Är toleranserna däremot lite grövre (till exempel  $>40 \mu\text{m}$ ) skulle hårbearbetningen kunna elimineras. Istället skulle tvättningen efter sätthårdning kunna förbättras för att få bort i princip alla höghus då nästan alla består utav rester från härdoljan. Detta skulle dock inte eliminera de få höghus som består av järn, men eftersom toleranserna är grova skulle i så fall järn-höghusen inte varit ett problem.

Något som arbetet också visar är att ytstrukturen kan gynnas av finbearbetning som resulterar i en finare yta, så att ytan mer liknar ytan hos en färdig produkt. Då provbitarna slipats med olika finheter kan slutsatser dras för de olika slipningarna. Det blir ganska tydligt att desto finare yta desto mindre höghus bildas (se 6.2). Alltså kan mer mjukbearbetning bidra till mindre höghus, vilket i sin tur leder till att hårbearbetningen kan minimeras.

## 7.5 Rekommendationer för framtida forskning

Ett test som inte genomförts men som troligen hade varit nyttigt är ett funktionstest. Anledningen till att det inte genomfördes är tidsbristen, men också att labbet där testerna genomförts delats med ordinarie personal. Med hjälp av ett funktionstest hade det varit enklare att undersöka ”höghusen” och ”grantopparnas” påverkan på stålet. Då detta uteblir kan inga slutsatser kring hur de påverkar materialets egenskaper dras, vilket var ett av målen med examensarbetet.

För att bredda studien inom ett större område hade flera olika typer av stål behövt undersökas, vilket är något man skulle kunna göra i framtiden. Precis som tidigare nämnt under avgränsningar (*avsnitt 1.3*) så kan inte slutsatser som dras i detta arbete appliceras på andra typer av stål med 100% säkerhet. Därför hade det även varit bra att genomföra liknande undersökningar för andra typer av stål.

Eftersom höghusen tros bero på rester ifrån härdoljan hade även olika typer av härdolja kunnat undersökas. På så sätt kan svar fås kring ifall typen av härdolja påverkar till exempel mängden höghus som bildas eller deras höjd. Här hade undersökningar med till exempel snabbare oljor jämfört med varmare oljor (*Valvoline Global Operations, u. å*) kunnat vara en möjlighet att gå vidare med.

Tillsist kan provbitar härdas utan skyddsgas för att tvinga på extra oxidation. Enligt slutsatsen bör det resultera i ett annorlunda turing-mönster till det redan observerat samt bekräfta att mängden oxidation är proportionellt mot ”granskogen”.

# Litteratur

- Turing, A. M. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 237(641), 37–72. Hämtad 27 april 2023, från <http://www.jstor.org/stable/92463>
- Higgins, R. A. (1998). *Engineering metallurgy. 1. Applied physical metallurgy*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbvb&AN=edsbvb.BV012658465&site=eds-live&scope=site&authtype=guest&custid=s3911979&groupid=main&profile=eds>
- Holm, T., Olsson, P., & Troell, E. (2010). *Stål och värmebehandling : en handbok*. Swerea IVF.
- Elayaperumal, K., & Raja, V. S. (2015). *References*. <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00CXM8T2/corrosion-failures-theory/forms-of-creferences>
- Digital surf. (2018). *What is the Sdr parameter and when can it be used?* [05.04.2023]. <https://www.digitalsurf.com/blog/what-is-the-sdr-parameter-and-when-can-it-be-used/>
- Averbach, B. L. (2019). Heat treatment (metallurgy). <https://doi.org/10.1036/1097-8542.311200>
- Bass, H. E., Fowlkes, B. J., & Keppens, V. M. (2020). Ultrasonics. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.719500>
- Bralla, J. R. C. (2020). Machining. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.757321>
- Hayes, T. L. (2021). Scanning electron microscope. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.604400>
- Vallebrant, P. O. (2022). Ytstruktur av stål. [https://drive.google.com/file/d/1uQPJdLrL\\_LDmBmrPvTlbyti7UsCf2YFF/view](https://drive.google.com/file/d/1uQPJdLrL_LDmBmrPvTlbyti7UsCf2YFF/view)
- Bengtsson, M. (u. å). *Table comparing sandpaper grit standard in Europe and USA* [09.03.2023]. <http://www.mibnet.se/home-improvement/sandpaper-grit-size-comparison-between-european-and-us-standards.html>
- Bodycote. (u. å-a). *Bodycote - Vårt företag* [15.02.2023]. <https://www.bodycote.com/sv/om-oss/yhtiosta/>
- Bodycote. (u. å-b). *Sätthårdning* [27.01.2023]. <https://www.bodycote.com/sv/tjanster/varmebehandling/satthardning-och-karbonitrering/satthardning/>
- Digital surf. (u. å). *Mountains® at a glance* [05.04.2023]. <https://www.digitalsurf.com/about/mountains-at-a-glance/>
- Parker Hannifin AB. (u. å-a). *Axial Piston Fixed Pumps - Series F1* [15.02.2023]. <https://ph.parker.com/se/sv/axial-piston-fixed-pumps-series-f1>

- Parker Hannifin AB. (u. å-b). *Om oss - Globalt och lokalt* [15.02.2023]. <https://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.c17ed99692643c6315731910237ad1ca/?vgnnextoid=af26724fe7a5e210VgnVCM10000048021dacRCRD&vgnnextfmt=SV>
- RISE. (u. å). *RISE i korthet* [15.02.2023]. <https://www.ri.se/sv/om-rise/rise-i-korthet>
- Sensofar. (u. å-a). *Sensofar Confocal* [13.03.2023]. <https://www.sensofar.com/metrology/technology/measuring-principles/confocal/>
- Sensofar. (u. å-b). *Sensofar Interferometry* [13.03.2023]. <https://www.sensofar.com/metrology/technology/measuring-principles/interferometry/>
- Valvoline Global Operations. (u. å). *WHAT IS OIL QUENCHING? BASICS OF OIL QUENCHING AND QUENCHING OIL TYPES* [08.05.2023]. <https://www.valvolineglobal.com/en-eur/what-is-oil-quenching/>
- SS-EN ISO 25178-2:2022* (2. utg., Standard). (2022). Svenska institutet för standarder. Stockholm, SE.
- ISO683-3:2022* (3. utg., Standard). (2022). Svenska institutet för standarder. Stockholm, SE.

# A

## Bilagor



Figur A.1: Slipmaskin



**Figur A.2:** Provbit A2 slipad

Institutionen industri- och materialvetenskap  
**CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**  
Gothenburg, Sweden  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**