

CHALMERS



Effektivisering av punktsvetsningssystemet för att få ned elektrodförbrukning och stopptider i produktionen, Volvo Cars, Torslanda

*Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom
Maskiningenjörsprogrammet*

Abdullah Tekcan

Sylvester Serban Stankic

Institutionen för material och tillverkningsteknik

Avdelningen för avancerad tillverkningsteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2016

Examinator: Examinators Namn Examensarbete No. 161/2016

Förord

Detta är ett examensarbete inom programmet Maskinteknik, 180 Hp, på Chalmers Tekniska Högskola skrivet av Abdullah Tekcan och Sylvester Serban Stankic.

Arbetet omfattar 15 högskolepoäng och genomfördes under sommaren 2016 på Volvo Cars karosfabrik i Torslanda. Under arbetets gång möttes vi av både spännande och utmanande problem vilket bidrog till att arbetet blev intressant för oss. Vi fick testa våra kunskaper som inhämtats under de tre år vi studerade på Chalmers Tekniska Högskola.

Vi vill tacka vår handledare Oscar Andersson från Volvo Cars för det förtroende och stöd som vi fått under arbetet.

Samtidigt vill rikta ett stort tack till produktionsledarna Peter Ytterberg, Karim Chawqui och lagledaren Mikael Meira som bidrog med mycket hjälp under arbetets gång.

Ytterligare ett stort tack till alla andra anställda på företaget; bland annat svetsmästarna, linemekanikerna och operatörerna för att de ställt upp och delat med sig av sina kunskaper samt sin tid under projektet och riktat in oss i rätt riktning med sina erfarenheter inom området.

Slutligen vill vi tacka vår handledare och examinerare från Chalmers Tekniska Högskola: Peter Hammersberg, för de råd och diskussioner vi haft gällande arbetet.

Vi hoppas att de verktyg och förslag vi tagit fram kan hjälpa Volvo Cars karosfabrik i Torslanda i sitt framtida arbete.

Göteborg augusti 2016

Abdullah Tekcan
Sylvester Serban Stankic

Sammanfattning

Vid framställning av karosser till personbilar är punktsvetsning en central och viktig del i tillverkningsprocessen. På industriell skala används avancerade robotar med kopparelektroder för att utföra dessa svetsoperationer. Några av de främsta anledningarna till att koppar används är för att det leder värme och elektricitet väl.

Elektrodena måste med jämna mellanrum bytas ut vilket leder till en elektrodförbrukning. På Volvo Cars Torslanda, där arbetet utfördes, är varierande elektrodförbrukning och stopptider kopplat till punktsvetsningen några av de problem som man ställs inför dagligen. Syftet med arbetet är att göra en mer noggrann kartläggning av problemen som uppstår samt undersöka på vilket sätt kan man effektivisera svetsningsprocessen så att man får ner antal elektrodbyten och stopptider.

Kvalitativa och kvantitativa intervjuer utfördes i karosfabriken med fabrikspersonal och vid sidan om en omfattande litteraturstudie inom ämnesområdet. För att kunna svara på de två forskningsfrågor som lades fram kopplat till syftet utfördes dessutom stickprovsmätningar på fyra olika robotar i fabriken. Målet är att ta reda på genomsnittlig elektrodförbrukning och stopptider per dygn och robot för produktionstakterna icke-fulltakt och fulltakt. På Chalmers laboratorium i Johanneberg gjordes även en jämförelse mellan två olika elektrodtyper som används i produktionen i form av en hårdhetsmätning för att jämföra med uppmätt förslitning.

Övervakning av elektrodförslitning sker genom tre olika nivåer (grön, gul och röd nivå) och manuella elektrodbyten utförs utifrån dessa. Grön nivå motsvaras av en förslitning i höjdled på elektroden mellan 0-3.5 mm, gul nivå har gränserna 3.5-5 mm och en förslitning som är högre än detta motsvaras av röd nivå. Formering är en rengöringsmetod som utförs frekvent där material mekaniskt skärs bort från elektroden, vilket är ett sätt att säkerställa att tillräckligt stor svetsdiameter erhålls. Elektrodbyten och formeringar är moment som leder till stopptid vid produktionslinorna.

Viktiga resultat som framgick från studien var att elektrodförbrukningen och stopptiderna är högre vid fulltakt än vid icke-fulltakt, vilket har sin naturliga förklaring i fler antal tillverkade fordon. Med full takt menas då produktionen går på maximal kapacitet, där man tillverkar det antal karosser som man på förhand satt upp som mål. Vid icke-fulltakt når man inte målet och då produceras färre karosser än målet. Genom att byta elektroder vid röd nivå istället för gul nivå eller vid de senare stadierna av gul nivå kan elektrodförbrukningen årligen minska med cirka 10-20%. Den totala stopptiden per dygn som varierar mellan 40-60 minuter beroende på produktionstakt visade sig till största del utgöras av utförda formeringar; med slutsatsen att det är en rejäl kostandsslukare.

Studien avslutas med några förbättrings- och implementeringsförslag för att få ned elektrodförbrukning och stopptider. Bland annat berörs vid vilken nivå man ska byta ut elektroden och hur ändringar på gränsen för gul nivå hos mätsystemet kan göras för att erhålla lägre elektrodförbrukning. Förslag på hur den totala formeringstiden kan minimeras diskuteras även, med resonemang kring vad ändrade formeringsintervall och omkonstruktion på formerarutrustningen kan leda till.

Abstract

In the production of bodies for cars spot welding is a central and vital part of the manufacturing process. Industrial scale wise, advanced robots with copper electrodes are used to perform these welding operations. Some main reasons to why copper is used is because it has good electrical and thermal conductivity.

The electrodes must be replaced on a regular basis which leads to electrode consumption. At Volvo Cars Torslanda, where the work was performed, varying electrode consumption and downtime when spot welding are problems faced daily. The aim of the work was to make a more accurate analysis of the problems and investigate ways to improve the efficiency of the welding process to obtain lower electrode consumption and downtimes in production.

Qualitative and quantitative interviews were conducted with factory personnel and alongside an extensive literature study was carried through in the subject field. In order to answer the two research questions related to the purpose sampling was additionally performed on four different robots in the factory, with the aim to find the average electrode consumption and down time per day and robot. This was done for the production rates of non-full rate and full speed. At Chalmers laboratory in Johanneberg a comparison was also made between two different types of electrodes used in the production, through a hardness test to explain electrode wear.

Monitoring of electrode wear is done through three different levels (green, yellow and red levels) and manual electrode replacement is performed based on these. Green level corresponds to a deterioration in electrode height of 0-3.5 mm, for yellow level the limits are 3.5-5 mm and for wear higher than that red level is attained. Dressing is a cleaning operation performed frequently where material is mechanically removed from the electrodes, which is a way to obtain sufficient weld diameter. Electrode replacements and dressings are activities that lead to downtime in production lines.

Important results that appeared from the study were that the electrode consumption and down times are greater at full speed production in comparison to non-full rate, which is explained by more number of vehicles produced. Full speed production is when maximum capacity is reached, where the pre-set targets of manufactured bodies are achieved. In non-full rate these targets are not reached which leads to fewer produced bodies. By changing the electrodes at the red level instead of yellow level, or at the later stages of yellow level electrode consumption annually can be reduced by approximately 10-20%. The total down time per day varies between 40-60 minutes (depending on the production speed) and majority of this time consist of electrode dressing operations. The conclusion could be drawn that it leads to high costs.

The study concludes with some improvement and implementing proposals to reduce electrode consumption and down times in production. For example, the levels at which you should replace the electrodes and how changes to the limit for yellow level of the measuring system could be made to obtain lower electrode consumption. Suggestions regarding how the total dressing time can be minimized is also a topic, with discussions of potential improvements from modified dressing intervalls and redesigns to the dressing equipment.

Innehållsförteckning

BETECKNING- OCH FÖRKLARINGSLISTA.....	1
1. INLEDNING	2
1.1 BAKGRUND	2
1.2 SYFTE	3
1.3 AVGRÄNSNINGAR	3
1.4 PRECISERING AV FRÅGESTÄLLNINGEN.....	3
2. TEORETISK REFERENSRAM	4
2.1 PUNKTSVETSNING	4
2.1.1 Svetsningsförlopp över tid	4
2.1.2 Värmebildning	5
2.1.3 Svetsbarhet.....	6
2.2 OLIKA TYPER AV PUNKSVETSELEKTRODER.....	7
2.2.1 Grundmaterial.....	7
2.2.2 Klassifikation av koppar och kopparlegeringar hos punktsvetselektroder.....	8
2.2.3 Punktsvetselektroder med olika legeringar.....	9
2.3 ELEKTRODER SOM ANVÄNDS I VCC-FABRIKEN.	10
2.3.1 Befintlig elektrod (B-trode).....	10
2.3.2 Ny typ av elektrod (Z-trode)	11
2.4 ELEKTRODFÖRSLITNING	12
2.4.1 Förslitningsmekanismer.....	13
2.5 SVETSDIAMETER OCH SVETSSPRUT.....	15
2.6 FORMERING AV ELEKTROD	16
2.7 PROCESSPARAMETRAR VID PUNKTSVETSNING	19
2.8 UTRUSTNING VID PUNKTSVETSNING	20
3. METOD	21
3.1 INSAMLING AV KVALITATIV OCH KVANTITATIV DATA	21
3.2 SYSTEMBESKRIVNING AV PUNKTSVETSNINGSPROCESSEN	22
3.3 STICKPROVSMÄTNING AV PRODUKTIONSPARAMETRAR I FABRIK	23
3.3.1 Mätsystem.....	23
3.3.2 Stickprov	24
3.3.3 Beräkningar	25
3.4 HÄRDHETSMÄTNINGAR AV B- OCH Z-ELEKTRODER.....	28
4. ANALYS	30
4.1 BAKGRUNDSANALYS	30
4.2 MÄTBARA FÖRBÄTTRINGSMÅTT	31
4.3 PROCESSKARTA FÖR PUNKTSVETSNINGSPROCESSEN	32
4.4 SIPOC-DIAGRAM	33
4.5 P-DIAGRAM	35
5. RESULTAT	37
5.1 STICKPROVSMÄTNING AV PRODUKTIONSPARAMETRAR I FABRIK	37
5.1.2 Röd nivå – ej fulltakt	39
5.1.3 Gul nivå – fulltakt	41
5.1.4 Gul nivå – ej fulltakt.....	43
5.2 HÄRDHETSMÄTNINGAR AV B- OCH Z-ELEKTRODER.....	45

6. SLUTSATS OCH DISKUSSION	48
6.1 STICKPROVSMÄTNING AV PRODUKTIONSPARAMETRAR I FABRIK	48
6.1.1 <i>Elektrodförbrukning</i>	48
6.1.2 <i>Stopptid orsakat av elektrodbyten och formering</i>	50
6.2 HÄRDHETSMÄTNINGAR AV B- OCH Z-ELEKTRODER.....	51
6.4 FÖRBÄTTRINGSFÖRSLAG	51
7. FÖRSLAG TILL VIDARE ARBETE	54
REFERENSER	55
BILAGOR	56

Beteckning- och förklaringslista

TA – Karosfabriken på Torslanda

TA3 – Delavdelning i karosfabriken på Torslanda

VCC – Volvo Car Corporation

Formering – Rengöringsmetod av elektrod där material mekaniskt skärs bort

Formerare – Utrustning för att utföra formeringsprocess

Linemekaniker – Operatör i fabriken som manuellt utför elektrodbyten

VOC – Voice Of Customer

SIPOC – Suppliers, input, process, output, customers

1. Inledning

1.1 Bakgrund

På Volvo Cars karosfabrik TA i Torslanda är punktsvetsning en mycket vanlig och viktig del i produktionsprocessen vid tillverkning av karosser till personbilar. För det mesta utförs punktsvetsningen med hjälp av avancerade robotar som programmerats till att punktsvetsa i fördefinierade punkter på plåtarna. På robotarmarna som utför svetsoperationen används särskilda svetselektroder som består av kopparlegeringar för att de leder värme och elektricitet väl. Koppar är dock förhållandevist mjukt så dessa elektroder behöver bytas ut frekvent då de slits ut under svetsningsprocessen på grund av yttre påverkan och olika förslitningsmekanismer. Se avsnitt 2.4.

Utslitna elektroder byts i regel manuellt av en operatör eller linemekaniker som ersätter dem med helt nya elektroder. De operatörer som byter ut elektroderna kan utifrån tidigare erfarenheter och med hjälp av ett varningssystem hos robotarna uppskatta när det är lämpligt att utföra ett elektrodbyte. Idag ligger uppfattningen om situationen till grund snarare än experiment och fakta för när det exakt ska genomföras.

Under ett helt dygn fördelat över tre skift när produktionen går på fulltakt produceras flera hundra karosser från fabriken i Torslanda [1]. Eftersom en modern bilkaross från Volvo Cars har 4000-6000 punktsvetsar [2] blir storleksordningen för antalet punktsvetsar som utförs flera miljoner.

Då svetselektroderna byts ut står produktionen stilla, och tiden för elektrodbyte varierar beroende på hur effektivt bytet görs. Efter flertalet besök i karosfabriken på Torslanda observerades att bytestiden oftast varierar mellan en halv uppmot två minuter. Ibland är man tvungen att byta ut elektroder på flera robotar under samma tillfälle och då blir produktionsstoppet längre. Då det är viktigt med varje sekund inom produktionen är dessa minuter väldigt värdefulla i och med att ungefär en kaross produceras varannan minut (detta kan dock variera) när produktionen går på fulltakt. Vid icke-fulltakt är inte stoppen en produktionsflaskhals på samma sätt. Målet är att hålla nere stopptiderna på grund av elektrodbyten, men även stopptider som kan uppstå vid punktsvetsningsprocessen på grund av andra faktorer. Detta då den totala stopptiden leder till att potentiell inkomst förhindras.

Efter samtal med olika aktörer i karosfabriken och ytterligare observationer insågs att elektroderna i många fall byts ut allt för ofta. Elektroderna används inte effektivt då dessa byts ut för tidigt, vilket är en av de brister som finns i dagsläget. Arbetet avser att kartlägga punktsvetsningssystemet hos Volvo Cars mer i detalj för att se vilka förbättringar som kan göras för att få ned antal elektrodbyten och stopptiden i produktionen.

1.2 Syfte

Uppdragets syfte är att undersöka och hitta sätt att förbättra punktsvetsnings-systemet som används hos Volvo Cars för att få ned antal elektrodbytten och stopptider som uppstår i produktionen vid punktsvetsning.

Den generella frågeställning blir då: På vilket sätt kan man effektivisera svetsningsprocessen så att man får ner antal elektrodbytten och stopptiden i produktionen och vilka är de största hindren? Det kan brytas ner till följande undersökningsområden:

1. Nuläget. Hur ser det ut i dagsläget och vad vet man om problemet?
2. Framtiden. Vad vill man uppnå i framtiden?
3. Implementering. Hur ska man gå tillväga för att komma dit?

1.3 Avgränsningar

För att försöka svara på den generella frågeställningen skall huvudfokus läggas på att beskriva och kartlägga problemen i processen. De parametrar med utdata som ska undersökas noggrannare och ligga till grund för förbättringar i systemet är:

- Elektrodens förslitning och dess livslängd
- Tid mellan och antal formeringar per elektrod
- Elektrodtyper med olika legeringsmaterial

Övriga tänkbara parametrar tas ej hänsyn till i denna undersökning.

1.4 Precisering av frågeställningen

De frågor som listas nedanför har en direkt koppling till den generella frågeställningen och ska försöka besvaras under arbetets gång.

- Hur ser dagens mätsystem ut för att mäta elektrod förslitning och vad har det för brister? Kan man på något sätt göra förändringar för att få till ett effektivare mätsystem, så att man minskar antal elektrodbytten och stopptider som uppstår i produktionen?
- Hur ska man undvika problem som uppstår när produktionen går för fullt, då man inte längre på samma sätt kan dra nytta av strategiska elektrodbytten?

2. Teoretisk referensram

Detta kapitel baseras på de litteraturstudier som utförts under arbetets gång. Här presenteras de grundläggande tekniska teorierna för punktsvetsningsprocessen. Några andra relevanta områden som berörs i detta avsnitt är svetsdiameter, formering och kringutrustning vid punktsvetsning.

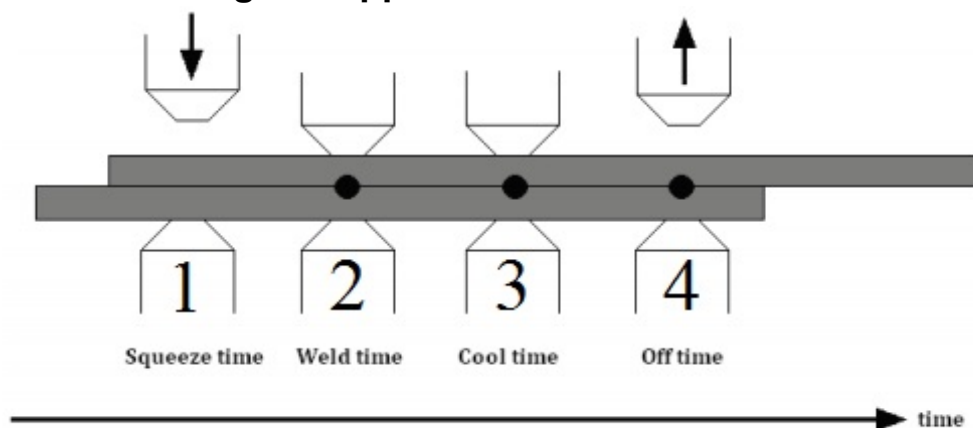
2.1 Punktsvetsning

Punktsvetsning är en typ av elektrisk motståndssvetsning som vanligtvis utförs med hjälp av avancerade robotar, där dessa programmeras till att utföra svetsoperationer i fördefinierade punkter på arbetsstycken som skall fogas ihop [2].

Principen för punktsvetsningsprocessen är att ström och kraft appliceras på arbetsstycket via de kopparlegerade elektroder, se *figur 2.1.1*. Grundtanken vid punktsvetsning är att lokalt generera tillräckligt med värmeenergi att smältpunkten för arbetsmaterialet överstigs och de smälter samman vilket uppnås genom den kontaktresistans som finns mellan den övre- och undre plåten i arbetsstycket [3].

På grund av den korta strömbanan och den låga resistansen i processen, krävs låg spänning och hög ström för att svetsoperationen skall kunna genomföras. Detta kan även ses hos Volvo Cars tillämpningar, där spänningen och strömmen varierar mellan 1,2–1,8 Volt respektive 6–32 kA.

2.1.1 Svetsningsförlopp över tid



Figur 2.1.1. Svetsningsförlopp över tid. [2]

I ovanstående *figur 2.1.1* åskådliggör principen vid punktsvetsningsprocessen. Denna process kan delas in och förklaras i fyra steg. Dessa steg är följande:

1. Klämtid

Först pressas två överlappande plåtbitar ihop med ett mycket högt mekaniskt tryck mellan övre och undre svetselektroderna under en bestämd tidsperiod på cirka 100 ms som kallas för klämtid. Hos Volvo Cars varierar den mekaniska klämkraften mellan 1,5–4,5 kN.

2. Svetstid

Svetsström slås sedan på under 200-700 ms som ger en lokal förhöjning av temperaturen med en ökning på som mest över 1500C°. Strömstyrkan varierar mellan 6-32 kA beroende på andra process- och materialparametrar.

3. Kyltid

När en tillräckligt stor smälta bildats i beröringsytorna mellan de två plåtarna kan strömmen slås av, samtidigt som elektrodtrycket hålls kvar tills smältan helt har stelnat. Kyltiden ligger på cirka 100 ms och då har en svets bildats i en specifik punkt mellan de två plåtarna.

4. Frigöring av elektrodtryck

Efter avsvälningen på cirka 100 ms avlägsnas elektrodtrycket och processen återupprepas på andra förbestämda ställen längs arbetsstycket. Noterbart är att punktsvetsning även kan göras på fler än två staplade plåtar - principen är densamma.

2.1.2 Värmebildning

Ett av de viktigaste stegen i punktsvetsprocessen är värmebildningen som uppstår under svetstiden (steg 2 från kapitel 2.1.1). Denna generering av värme kan enklast förklaras med Joule's lag [3] som i sin enklaste form kan uttryckas genom ekvation (1)

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

där Q = Värmeenergi [J]

I = Ström [A]

R = Elektrisk resistans [Ω]

t = tid [s]

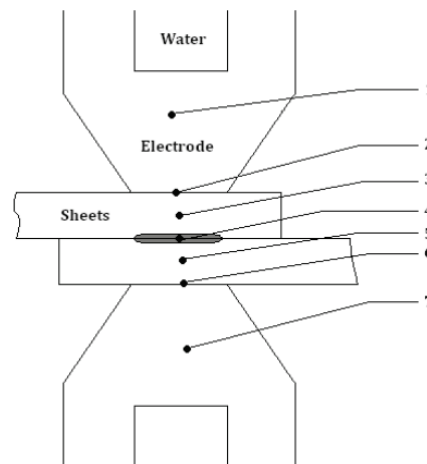
Ekvationen beskriver förhållandet mellan värmeenergi, ström, elektrisk resistans och tid.

En av de ingående storheterna för att producera värmeenergi är elektrisk resistans, vilket man kan se i ekvation (1). Ju större resistans, desto mer värme skapas som höjer temperaturen. Inom punktsvetsning består den elektriska kretsen av olika resistanser i olika områden. Dessa har man samlat ihop till fyra huvudområden som illustreras i *figur 2.1.2*. Dessa huvudområden är:

- Elektrodernas resistanser - 1 och 7
- Resistanserna mellan elektrod och plåt - 2 och 6
- Plåtarnas resistanser - 3 och 5
- Resistansen mellan plåtarna - 4

Kontaktresistansen mellan plåtarna (4) är oftast större än resistanserna i de övriga områdena och i denna zon bildas mest värme [2]. Det är förklaringen till varför smältan uppstår mellan plåtbitarna. Då elektroderna är gjorda i koppar har de lägre resistans än arbetsstycket som oftast är gjort av stål eller någon form av aluminiumlegering [4]. Det innebär att större delen av värmen bildas i arbetsstycket och inte i elektroderna vilket man är ute efter vid punktsvetsning.

För att säkerställa att elektroderna inte blir för varma kyler man dessutom ned dessa kontinuerligt med vatten, se *figur 2.1.2*. Hos Volvo Cars punktsvetsrobotar cirkulerar det cirka fyra liter kallt vatten per minut i särskilda omloppsbanor i punktsvetsselektroderna. Värmet som bildas i arbetsstycket under svetsprocessen (steg 2) är tillräckligt hög för att vattenkylningen skall ha en direkt påverkan på svetsningsprocessen. Koppar har hög termisk och elektrisk konduktivitet vilket innebär att det är ett material som leder ström bra, samt avlägsnar värme effektivt. Det är några av huvudanledningarna till varför dessa material oftast används i punktsvetsselektroder [2].



Figur 2.1.2. Tvärsnitt av punktsvetsningen med ingående delar samt numrering av resistanser i systemet. [2]

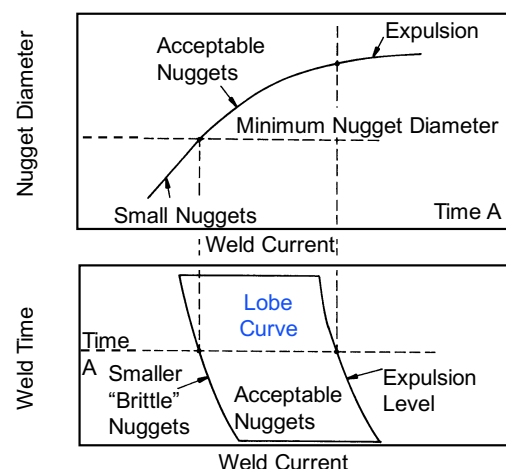
2.1.3 Svetsbarhet

Svetsbarhet kan på det enklaste sättet definieras som inom hur stort strömintervall man kan erhålla en godkänd svets. Definitionen av svetsbarhet är en indikation på storleken av svetstransformatorn (svetsutrustningen) som är nödvändig för att svetsa materialet av intresse.

En strömområdeskurva representeras i den övre halvan av vidstående grafiska *figur 2.1.3* (nugget diameter = svetsdiameter, weld current = svetsström, expulsion = svetsstrut). Denna kurva används för att kunna definiera området av svetsströmmar med förmåga att bilda en acceptabel punktsvets. Det aktuella området avgränsas vid låg ström av en svets med för liten storlek i diameter respektive vid hög ström av att svetsstrut uppstår (se kapitel 2.5 om svetsdiameter och svetsstrut).

Ett brett strömområde i en strömområdeskurva antyder på att betydelsefulla variationer i svetsstorlek kan ske, utan att svetskvaliteten blir oacceptabel vilket uppstår när svetsdiameteren är för

Current Range & Weldability Lobe



Figur 2.1.3. Strömområdeskurva och svetsbarhetslob. [6]

liten eller när svetssprut uppstår på grund av en för stor svetsdiameter. Ett snävt strömområde indikerar, å andra sidan, på att mindre variationer i svetsdiameter kan resultera i oacceptabel svetskvalitet. Det vill säga; att svetsdiameteren blir för liten eller att svetssprut uppstår vid en allt för stor svetsdiameter [6].

Ström, tid och kraft är de tre huvudparametrarna som kan regleras samt kontrolleras på en punktsvetsmaskin. "Weldability lobe (Svetsbarhetslob)" är den definierade termen som används för att utföra svetsoperationer baserad på dessa tre parametrar. Denna term är nära relaterad till strömområdeskurvan och representerar det acceptabla intervallet av svetsströmmen som funktion av svetstiden, vilket också representeras i den nedre delen av *figur 2.1.3*. [3] [5] [6].

2.2 Olika typer av punktsvetselektroder

Marknaden för elektroder för motståndssvetsning är enormt stor. Det finns elektroder med olika geometrisk form, legereringssammansättning och kostnad. De elektrodformer som används är tillverkade utifrån olika ISO-standarder. Vilken typ av elektrod som används beror på vilken typ av applikation man har i produktionen. Några elektroder med olika form och storlek åskådliggörs i nedanstående *figur 2.2*. Det som är gemensamt för de flesta elektroderna på marknaden är att endast ett fåtal olika legeringar används så grundmaterialet är mer eller mindre detsamma, vilket beskrivs mer om i nästa avsnitt (2.2.1 Grundmaterial).



Figur 2.2. Olika geometrier för punktsvetselektroder. [7]

2.2.1 Grundmaterial

Koppar är den dominerande huvudbeståndsdelen hos alla elektrodmaterial för punktsvetsning. Den är korrosionsbeständig och har överlägsen termisk och elektrisk konduktivitet. Dessa egenskaper är mycket viktiga vid punktsvetsning. En av nackdelarna med koppar är dock att det är ett relativt mjukt material. Det kan motverkas genom olika härdningsmekanismer där man ökar materialets styrka och hårdhet. Ett exempel är genom utskiljningshärdning, som är en värmebehandlingsmetod, där man ökar och sänker temperaturen för att bilda särskilda faser för att stärka materialet [8].

2.2.2 Klassifikation av koppar och kopparlegeringar hos punktsvets elektroder

Fyra typer av material av koppar och kopparlegeringar finns och definieras enligt:

Typ 1: Icke-värmebehandlade legeringar med hög elektrisk och termisk konduktivitet. Dessa legeringar har medel hårdhet och får sin styrka genom kallbearbetning under tillverkning. [9]

Exempelvis:

- Cu-Cd1: Koppar-Kadmiumlegering har en unik kombination av hög draghållfasthet och hög elektrisk och termisk ledningsförmåga. Den nominella sammansättningen består av ca 99% koppar och 1% Kadmium. Kadmium i legeringen ökar både koppars styrka och dess motståndskraft mot mjukning med en minimal minskning av dess elektriska konduktivitet [10].

Typ 2: Dessa legeringar har en ökad hårdhet och därmed bättre mekaniska egenskaper jämfört med typ 1 legeringar, vilket har utvecklats genom värmebehandling under tillverkningen eller genom en kombination av värmebehandling och kallbearbetning [9]. Exempelvis:

- Cu-Cr1: Koppar-Kromlegering är en värmebehandlad kopparlegering med god elektrisk och termisk konduktivitet. Koppar-Kromlegering är beständig mot mjukning vid förhöjda temperaturer samt har en god hårdhet och hållfasthet. Den nominella sammansättningen består av ca 99.1% koppar och 0.9% krom [10].

Typ 3: Värmebehandlade legeringar med överlägsna mekaniska egenskaper jämfört med typ 2 legeringar men har en lägre elektrisk och termisk ledningsförmåga jämfört med typ 1 och typ 2 legeringar. [9] Exempelvis:

- Cu-Ni2-Si: Koppar-Nikel-Kisellegering är en utskiljningshärdad legering med en lägre elektrisk och termisk ledningsförmåga, men med en god styrka, hårdhet och utmattningshållfasthet [10].

Typ 4: Dessa legeringar har vissa specialiserade egenskaper, som kan erhållas antingen genom värmebehandling eller genom kallbearbetning [9]. Exempelvis:

- Cu-Al10-Ni5-Fe5: Koppar-Aluminium-Nickel-Bronslegering är en speciell kopparaluminium-legering med en hög hållfasthet. Den nominella sammansättningen består av ca 80% koppar, 10% aluminium, 5% nickel och 5% järn, vilket gör denna legering till ett utmärkt val för applikationer med tunga laster, korrosion och friktion. Nickeln i legeringen ökar hållfastheten för materialet utan att minska dess utmärkta duktilitet, seghet och dess korrosionsbeständighet [10].

2.2.3 Punktsvets elektroder med olika legeringar

Som tidigare nämnts finns det många geometrier att finna i olika leverantörskataloger. De elektrodformer som skapas och används inom punktsvetsning är utifrån olika ISO-standarder [9]. Vilken typ av elektrod som används beror på vilken typ av applikation man har i produktion. Tabell 1 visar elektroder med olika legeringskompositioner och mekaniska egenskaper.

Material								Softening temperature °C min.
Group	Type	Number	Designation	Nominal composition ¹⁾ %	Forms available (values in mm)	Hardness HV (30 kg) min.	Electrical conductivity S/m min.	
A	1	1	Cu-ETP	Cu (+ Ag) min. 99,90	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	85 90 50 40	56 56 56 50	150
		2	Cu Cd1	Cd 0,7 to 1,3	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged	90 95 90	45 43 45	250
		2	Cu Cr1	Cr 0,3 to 1,2	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	125 140 100 85	43 43 43 43	475
			Cu Cr1 Zr	Cr 0,5 to 1,4 Zr 0,02 to 0,2	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged	130 140 100	43 43 43	500
			Cu Cr Zr	Cr 0,4 to 1 Zr 0,02 to 0,15	hardened ground < 45	160 160	43 43	500
			Cu Zr	Zr 0,11 to 0,25	hardened ground < 30	130 130	47 47	500
	3	1	Cu Co2 Be	Co 2,0 to 2,8 Be 0,4 to 0,7	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	180 190 180 180	23 23 23 23	475
		2	Cu Ni2 Si	Ni 1,6 to 2,5 Si 0,5 to 0,8	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	200 200 168 158	18 17 19 17	500
		4	Cu Ni1 P	Ni 0,8 to 1,2 P 0,16 to 0,25	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	130 140 130 110	29 29 29 29	475
			Cu Be2 Co Ni	Be 1,8 to 2,1 Co-Ni-Fe 0,20 to 0,60	drawn $\geq$ 25 drawn < 25 forged cast	350 350 350 350	12 12 12 12	300
		3	Cu Ag6	Ag 6 to 7	forged $\leq$ 25 forged 25 to 50	140 120	40 40	400
		4	Cu Al10 Fe5 Ni5	Al 8,5 to 11,5 Fe 2,0 to 6,0 Ni 4,0 to 6,0 Mn 0 to 2,0	forged cast	170 170	4 4	650
	B	10	W75 Cu	Cu 25		220	17	1000
		11	W78 Cu	Cu 23		240	16	1000
		12	WC70 Cu	Cu 30		300	12	1000
		13	Mo	Mo 99,5		150	17	1000
		14	W	W 99,5		420	17	1000
		15	W65 Ag	35 Ag		140	29	900

Tabell 1: Mekaniska egenskaper för punktsvets elektroder enligt den internationella standarden ISO 5182:1991. [9]

2.3 Elektroder som används i VCC-fabriken.

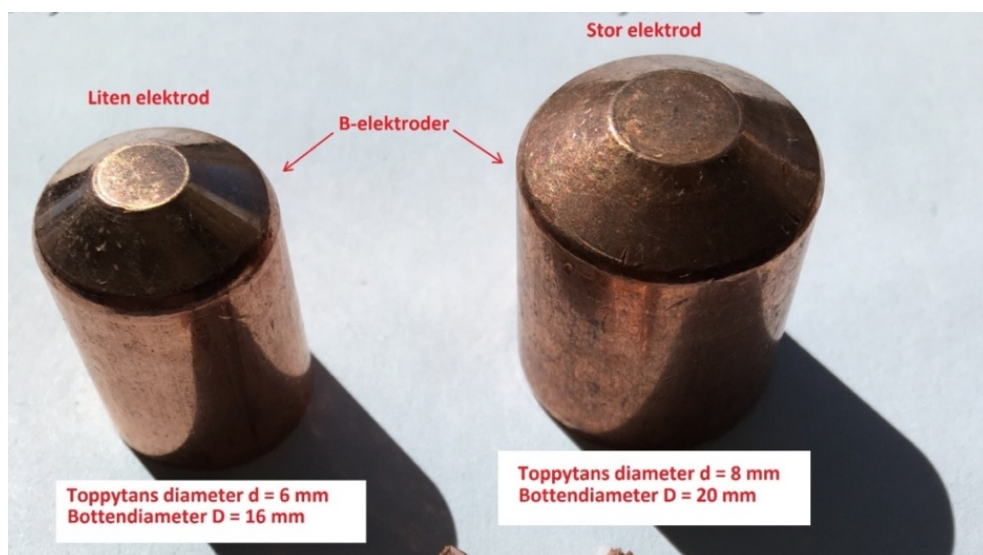
På Volvo Cars karossfabrik TA i Torslanda används i dagsläget två olika kopparelektroder med olika tillsatslegeringar. En av dessa elektroder som används är den elektrodtyp (typ 2 enligt Tabell 1) som kallas för "B-trode" och som används i störst utsträckning. Det finns även en ny typ av elektrod med namnet "Z-trode" (också typ 2) som man delvis har börjat implementera i produktionen. "B-trode" och "Z-trode" är varumärkesnamn namngivna av underleverantören av elektroderna.

Dessa kopparelektroder finns i två olika geometriska storlekar, där anledningen till att olika storlekar används bland annat är för att svetsstorleken varierar beroende på var någonstans svetsningen utförs på karossen. Variationen har en direkt koppling till konstruktionen av karossen där spänningar och materialhållfasthet har inverkan på vilken storlek på svetselektroden som ska användas.

2.3.1 Befintlig elektrod (B-trode)

De elektroder som används i dagsläget i produktionen på Volvo Cars karossfabrik TA har namnet B-trode. B-trode är en kopparlegering som består av grundmaterialet Koppar med legeringsmaterialen Krom och Zirkonium. Enligt ISO standard 5182:1991 har denna legering en god hårdhet och termisk samt elektrisk konduktivitet, men även en godtagbar mjukningstemperatur på cirka 500 grader Celsius. Se ovanstående *tabell 1*.

På Volvo Cars karossfabrik används främst två olika storlekar av denna typ av elektrod. En mindre variant där toppytans diameter är 6 mm med en bottendiameter på 16 mm och en större variant där toppytans diameter är 8 mm med en bottendiameter på 20 mm. Se *figur 2.3.1*.



Figur 2.3.1. B-elektroder i olika storlekar.

2.3.2 Ny typ av elektrod (Z-trode)

En ny typ av elektrod som är planerad för implementering i är elektroden Z-trode. Den består precis som B-trode av grundmaterialet koppar, men enbart med tillsatslegeringen Zirkonium. Enligt ISO Standarden 5182:1991 (se tabell 1) har denna legering en lite lägre hårdhet än B-trode men en högre termisk och elektrisk konduktivitet. Z-trode har precis som B-trode en godtagbar mjukningstemperatur på cirka 500 grader Celsius.

Liksom B-trode förekommer Z-trode i två olika storlekar. Måtten på Z-troden är identiska med de för B-trode: en mindre variant där toppytans diameter är 6 mm med en bottendiameter på 16 mm och en större variant där toppytans diameter är 8 mm med en bottendiameter på 20 mm. Se ovanstående *figur 2.3.1*.

Z-trode är dyrare att köpa in än B-trode men ska ha sina fördelar som mindre klibbande och glödgning samt bättre elektrisk ledningsförmåga [11]. Som tidigare nämnt används i dagsläget B-trode i större utsträckning än Z-trode. Detta då Z-trode är en ny typ av elektrod som ännu inte helt implementerats i produktionen.

Tester som har gjorts på VCC visar på lovande resultat när det kommer till svetsningshållbarhet över tid vid användning av Z-trode jämfört med B-trode [12]. I dagsläget har man samma formeringsintervall för både typer av elektroder och här finns rum för förbättring: om Z-trode visar sig ha längre livstid än B-trode, så kan tiden mellan formeringar ökas vid användning av Z-trode. Se kapitel 2.6 – formering av elektrod.

Elektrodena är rörformade, vilket illustreras i *figur 2.3.2*, där utseendet för en stor- och liten elektrod visas underifrån. Med erhållen geometri förbinder man elektrodena på robotar-armarna och i ihålligheten strömmar vatten för att kyla ned vid svetsoperation.



Figur 2.3.2. Elektrodenas utseende underifrån.

2.4 Elektrodförslitning

Förslitning av elektroder som används vid punktsvetsning är oundvikligt. Detta då elektroderna kontinuerligt utsätts för elektriska och mekaniska laster. Förslitningen sker i höjdlid och till slut har elektroderna degraderats så pass mycket att de måste bytas ut mot ett nytt elektroddpar. Det finns en yttre gräns för när elektroderna akut måste bytas ut. Denna gräns ligger oftast på 5 mm avverkning i höjdlid men kan vara mindre. Vid ytterligare slitage finns risk för bildning av ett öppet hål genom toppytan så att elektroden blir helt ihållig och obrukbar. Se *figur 2.4.* som visar ett utslitet elektroddpar samt en jämförelse mellan en ny och utsliten elektrode

Arbetsstycket, plåtarna som svetsrobotarna fogar samman, består huvudsakligen av galvaniserat stål. Det är stål som är belagt med ett tunt lager av zink. Denna zink-beläggning bidrar till att kontaktresistansen blir lägre för galvaniserat stål jämfört med icke-galvaniserat stål [3]. Enligt tidigare resonemang så innebär en större resistans att mer värme skapas, vilket leder till förhöjda temperaturer och snabbare svetsbildning. För att kompensera för den värmeförlust eller ”brist av värmegenerering” som orsakas av lägre resistans, behövs en ökad strömstyrka. Det resulterar i sin tur till en lägre kläm- och svetstid och bidrar till ett smalare strömmråde (se avsnitt 2.1.3). Ett smalt strömmråde att operera på indikerar att mindre variationer i svetsdiameter kan resultera i oacceptabel svetskvalitet, samt snabbare förslitning av elektroderna.

Ytterligare faktorer som bidrar till förslitning av elektroder vid svetsning av galvaniserat stål är:

- Uppmjukning av ytskikten på elektroden.
- Gropfrätning på elektrodens yta som leder till central kavitation, dvs. hålrum [3].
- Rekristallisation av elektrodmaterialen under ytskiktet.
- Legeringsbildning på toppytan av elektroden och zinkbelägget på arbetsstycket.
- Tillväxt av toppytan genom plastisk deformation samt uppkomst av ojämnheter hos toppytan



Figur 2.4. Till vänster: utslitet elektroddpar. Till höger: ny elektrod samt utsliten elektrod.

2.4.1 Förslitningsmekanismer

Förslitningen hos elektroderna beror av flera olika mekanismer. I dagsläget har 5 olika mekanismer identifierats [3]. Dessa är enligt följande:

- *Uppmjukning eller glödning av ytskikten på elektroden:* Glödning eller mjukning av materialet i elektroden sker då temperaturen förhöjs upprepade gånger under svetsprocessen. I produktion på TA kan temperaturen vid punktsvetsning uppgå till hela 1500 grader Celsius i arbetsstycket. Smältpunkten för materialet i elektroden som oftast är någon kopparlegering ligger på cirka 1000 grader Celsius. I och med dessa höga temperaturer vid punktsvetsning blir elektroden mjukare och deformationer uppstår lättare. Förslitningen blir alltså större, särskilt vid höga temperaturer där smältpunkten överskrids och elektrodmaterialen deformerar lättare.
- *Gropfrätning och lokal korrosion på elektrodens ytor som leder till central kavitation, dvs. hålrum i elektroden:* På grund av förslitningsmekanismerna uppstår ojämnheter hos toppytan, vilket påverkar svetskvaliteten och ökar risk för svetsssprut (se avsnitt 2.5). Exempel på ett extremfall av en utsliten elektrod med väldigt ojämna ytor visas i figur 2.4.1.
- *Rekristallisation hos elektrodmaterialen vid ytskiktet:* Vid kvarhållning av förhöjd temperatur uppstår rekristallisation, vilket är ett fenomen då nya fina korn bildas i de deformerade områdena [13]. Detta sker främst vid elektrodens toppyta där deformationen är som störst. Vad som kännetecknar rekristallisation är att mikrostrukturen genomgår en förändring. Ursprungligen har man vid de deformerade områdena större avlånga korn, där dislokationstätheten har ökat med en hög energimängd. Vid uppvärmning av materialet bildas nya fina korn i korngränserna hos de avlånga kornen så att en mer finkornig struktur erhålls i materialet.
- *Legeringsbildning på elektrodens toppyta:* Ett vanligt förekommande problem är när legeringar bildas på toppytan hos elektroden vilket ytterligare är en faktor som bidrar till förslitningen. Det galvaniserade stålet i arbetsstycket är belagt med zink som bildar mässing vid kontakt med kopparelektroden under svetsoperationen. Arbetsstycket ”klibbar” alltså fast på elektrodens toppyta. Legeringsbildning medför också i många fall att svetsresultatet blir sämre. För att förhindra legeringsbildningens påverkan formeras därför elektroderna regelbundet, vilket är en rengöringsprocess, där en liten del av toppytan samt flankerna på elektroderna svarvas bort i en anordning som kallas för formerare. Genom att avlägsna dessa ytskikt fås det ursprungliga kopparmaterialen tillbaka utan legeringar. Nackdelen med formering är dock att det bidrar till ytterligare förslitning av elektroden.



Figur 2.4.1 Kraftigt försliten toppyta hos en elektrod. [2]

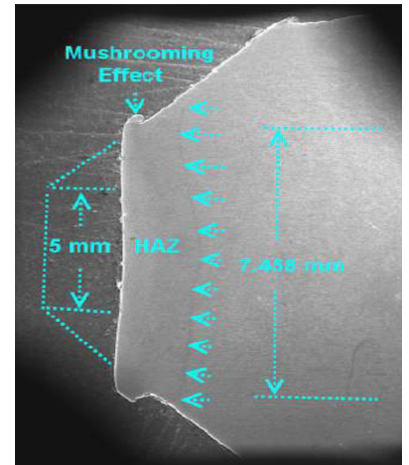
- *Tillväxt av elektrodens toppyta genom plastisk deformation samt uppkomst av ojämnheter hos toppytan:* Denna förslitningsmekanism är enligt Williams et.al den förslitningsmekanism som påverkar elektrodens livslängd mest.

Tillväxt av elektrodens toppyta beror på tre faktorer enligt Holiday *et al*:

- 1) Svampbildning: detta orsakas av deformation och flöde av olegerat material till elektrodspetsens periferi. Se figur 2.4.2.
- 2) Legeringsbildning på elektrodens toppyta.
- 3) Reduktion av elektrodens längd orsakar tillväxt av toppytan på elektroden. Den geometriska relationen mellan längdreduktion och tillväxt av elektrodens toppyta beskrivs av följande formel:

$$d_2 = 2[l_0 - l_f / \tan 30] + d_1$$

där d_1 och d_2 är start- och slutspetsdiametern och l_0 samt l_f är den initiala och slutliga längden.

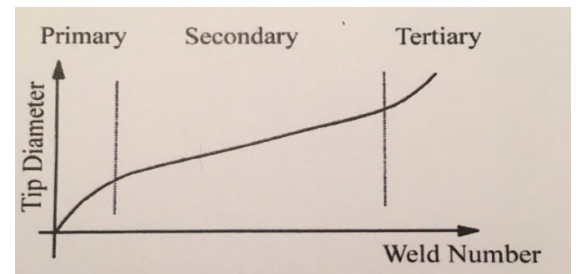


Figur 2.4.2. Svampbildning. [17]

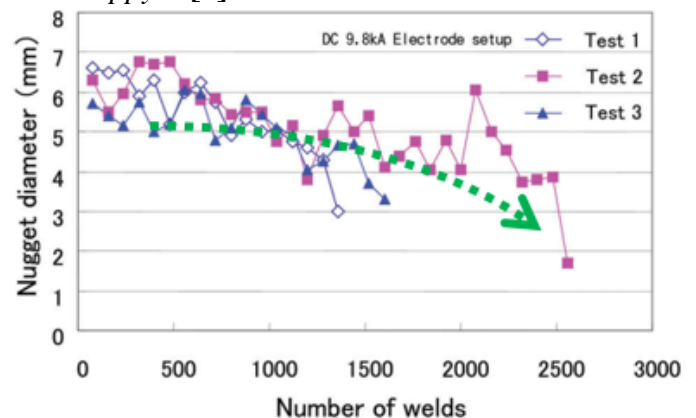
Det är problematiskt, då man vill erhålla en hög strömtäthet genom en så liten yta som möjligt. Då toppytan blir större leder det till att man bland annat måste öka strömstyrkan och klämkraften för att bibehålla strömtätheten. Ökad strömstyrka och klämkraft är två av de faktorer som har störst inverkan på elektrodens toppyta och dess förslitning.

Tillväxt av elektrodens toppyta delas in i tre stadier. Från figur 2.4.3 ser vi att vid första och tredje stadiet så sker tillväxten av toppytan relativt snabbt. Vid det mellanliggande stadiet lutar kurvan mindre, med en långsammare tillväxt. Detta beror på att då toppytan tillväxer så leder det till att klämkraften och strömtätheten minskar vilket tillfälligt bidrar till en långsammare tillväxt av toppytan på elektroden [3].

Ändras toppytans form och egenskaper allt för mycket blir svetsresultatet inte acceptabelt. Man vill ha en viss diameter på svetsen och den minskar generellt med antalet punkter som utförts från ett elektrodpar [12], se figur 2.4.4.



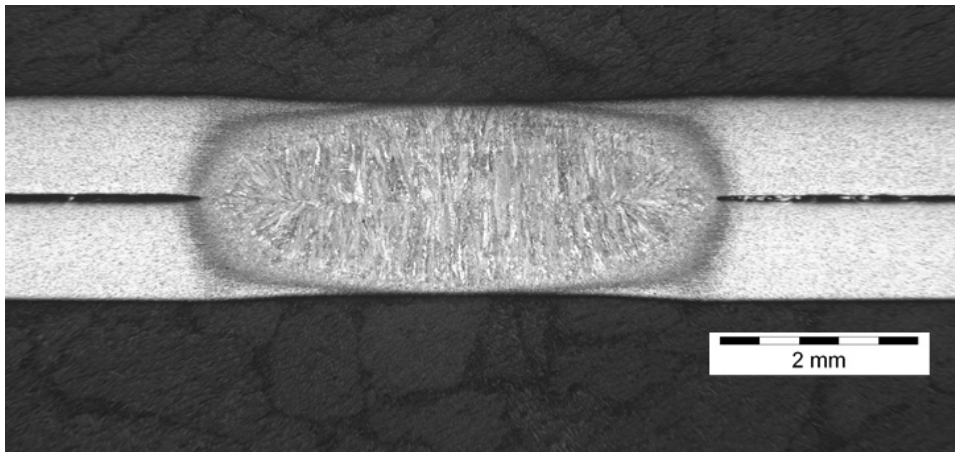
Figur 2.4.3. Stadier vid tillväxt av toppyta.[3]



Figur 2.4.4. Svetsdiameter som funktion av antalet svetsar. [12]

2.5 Svetsdiameter och svetssprut

Det finns flera olika parametrar att ta hänsyn till vid mätning av svetskvalitet. Två av de viktigaste är svetsdiameter samt svetssprut [2]. Svetsdiameter definieras som den diameter på den stelnade zonen som mäts upp från sidan, se *figur 2.5.1*. Bilden visar ett exempel på en lyckad punktsvets. På den övre och undre ytan har små fördjupningar uppkommit. Detta på grund av det mekaniska tryck som applicerats från elektroderna samt den värme som genererats i området. En av fördelarna med svetsdiametern är att den är relativt lätt att mäta upp genom provning. Vid svetsning finns krav på att svetsdiametern skall vara tillräckligt stor för att erhålla en god svets. Det finns en tendens att denna minskar ju fler svetsar som utförs från ett elektrodpar, vilket nämdes i avsnitt 2.4.1.



Figur 2.5.1. Tvärsnitt av stelnad punktsvets. Med tillstånd från TWI Ltd.

Ett annat fenomen som kan uppstå vid punktsvetsning är svetssprut. Det är när smälta stöts bort från svetsen vilket uppstår på grund av expanderande krafter där all smälta inte kan hållas kvar i det området där svetsen ursprungligen skulle ha bildats. Svetssprut uppstår oftast mellan ytor som vid gränssnittet mellan elektrod och plåt eller mellan plåtarna [14]. Ett hål kan bildas genom arbetsstycket om svetssprutet är för stort. Exempel på en utbränd yta på grund av svetssprut kring elektrodens toppyta visas i *figur 2.5.2*.



Figur 2.5.2. Utbränd yta på grund av svetssprut. Med tillstånd från G.E. Schmidt, Inc. [14]

2.6 Formering av elektrod

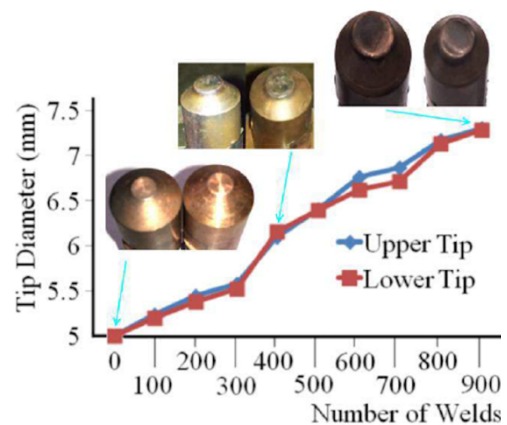
Definitionen av livslängd för en elektrod kan förklaras med antalet svetsoperationer som elektroden kan genomföra utan att passera det maximala värdet för nedgradering av elektrodens höjd. Denna gräns brukar oftast ligga på 5 mm avverkning i höjddled hos Volvo Cars svetsrobotar. Vid ytterligare slitage finns risk för bildning av ett öppet hål genom toppytan så att elektroden blir helt ihålig och obrukbar.

Formering av elektroder utförs då svetsresultatet vid punktsvetsning inte blir acceptabelt på grund av påverkan av förslitningsmekanismer som tidigare beskrevs i avsnitt 2.4.1. Detta görs istället för att kassera elektroderna vid icke godkänt svetsresultat.

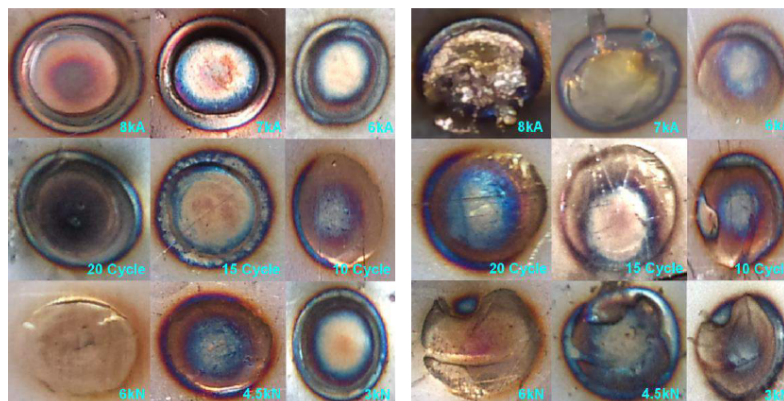
Som tidigare nämnts i avsnitt 2.4.1 är tillväxt av elektrodens toppyta den förslitningsmekanism som försliter elektroden mest och därmed påverkar svetsresultatet mest. Genom formering av elektroden kan man återställa toppytans diameter, som ökar mest på grund av svampbildning, till den ursprungliga diametern. Vid formering repareras elektrodens slitage och skador, samt avlägsnas eventuell legeringsbildning, genom att man mekaniskt skär bort material från spetsytan, så att toppytan återfår sin optimala geometri.

Forskning kring typ 2 elektroder som är tillverkade av koppar och krom i enlighet med ISO-standarderna visar att elektroder med en ursprunglig diameter på 5 mm växer med ca 23% till 6.123 mm efter 400 svetsförsök. Denna ökning beror på svampbildning. Vid fortsatt svetsning visar det sig att diametern ökat med ca 49% till 7,458 mm efter 900 svetsförsök, se figur 2.6.1. [17]

Figur 2.6.2 a) visar svetspunkter som utfördes med nya elektroder med diametern 5 mm, medan figur 2.6.2 b) visar svetspunkter som utfördes efter 900 svetsförsök utan någon mellanliggande formering. Bra svetsar har cirkulär form med regnbågens färger som orsakas av värmeexpansion, medan dåliga svetsar har defekter som avvikelse i form och missfärgning, se figur 2.6.2. [17]



Figur 2.6.1. Förhållandet mellan toppytans diameter och antalet utförda svetsar. [17]



Figur 2.6.2. a) Bra svetspunkter med nya elektroder b) Dåliga svetspunkter efter 900 svetsförsök. [17]

För att

kunna återställa toppytans diameter till den ursprungliga diametern och förebygga dåligt svetskvalitet utför man formering av elektroder med jämna mellanrum. Denna formering utförs med hjälp av särskilda elektrodformerare.

Volvo Cars karosfabrik i Torslanda använder idag helt automatiserade formerare som erbjuder en hög nivå av tillförlitlighet och som kan kontrollera och övervaka strömmar, krafter och punktsvetsstider. Men de automatiserade formerarna som används i Volvo Cars karosfabrik är inte helt perfekta då diverse problem kan uppstå vid formeringsprocessen.

Som tidigare nämnts, så är formeringsunderhåll och byte av elektroder den främsta orsaken till att det blir stopp i produktionslinjen vid fullproduktion. Samtidigt måste programmering av scheman för formerare vid implementering av nya linor göras manuellt, i form av testning och iterativt optimering. Detta i sig är en tidskrävande process som tar mycket resurser.

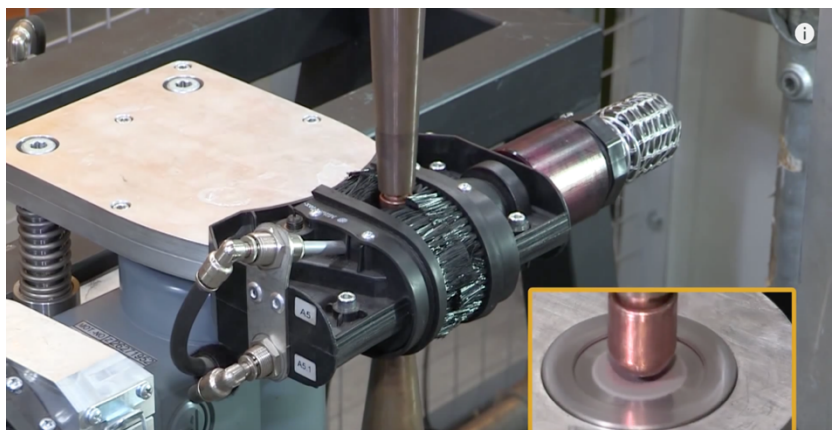
Helt automatiserade formerare som används i Volvo Cars använder mekaniska skär som avlägsnar en stor mängd koppar, vilket bidrar till en snabb förbrukning av de dyra kopparelektrodena. Den optimala formeringsmetoden för att återställa elektrodens geometri till den ursprungliga är genom att lätt slipa elektrodernas toppyta [3].

Sortimentet för elektrodformerare ute på marknaden är enormt stor. Beroende på det ekonomiska tillståndet och budgeten man har, är alternativen för elektrodformerartyper bred. I sortimentet finns allt från enklare manuella formerare till helt automatiserade formerare. I och med den ständigt utvecklande teknologin, finns det riktigt smarta lösningar på formerare. Ett sådant har namnet "Smartdress".



Figur 2.6.3 Manuell formeringsutrustning. [17]

Smartdress är en ny teknologi, som tar formeringsprocessen ett steg längre fram. Denna teknologi är utformad på så sätt att, mänskligt ingrepp vid formering och underhåll av elektroder har minimaliserats. Denna teknologi använder sig både utav en slipanordning och mekaniska skär för att kunna minska mängden koppar som avlägsnas vid formering och därigenom öka elektrodens livslängd. Ett datoriserat styrsystem bearbetar data från en optisk sensor och avgör sedan vilken typ av formering som krävs för elektroden: slip- eller skär-ingrepp. Samtidigt kan styrsystemet automatiskt avgöra och planera om formeringsscheman genom data från elektrodunderhållsfrekvensen. För att ytterligare



Figur 2.6.4 Formering med slipanordning. [18]

minska mänskligt ingrepp kan denna teknologi även automatiskt byta ut utslitna elektroder. Bytet görs endast för den slitna elektroden och inte för elektrodparet. [18]

I relation har teknologin som används hos Volvo Cars karosfabrik i Torslanda många problem vid formeringsprocessen.

- Att spånor från de mekaniska skären fastnar i formeraren och därigenom orsakar skador på elektroden vid nästa formeringsprocess.
- Att elektrodutbytet görs manuellt leder till stopp i produktionslinan.
- Att elektrodparet (både elektroderna) byts ut trots att bara en av elektroderna är utslitet.
- Att elektroden fastar i formeraren på grund av att den expanderar vid värmetillförsel, vilket bidrar till att linemake måste ingripa.
- Att elektrodbytet bygger mer på linemekanikerns känslor och erfarenheter.
- Formeringen för varje enskild robot skiljer sig från den ena till den andra. Vissa har en spåntjocklek som är för höga, andra har låg. Spåntjockleken som bildas då formeringen utförs av skär påverkar elektrodens livslängd avsevärt. Formerare som finns tillgängliga hos Volvo Cars karosfabrik i Torslanda är tänkt att ha en spåntjocklek på 0.2 mm. Men denna tjocklek varierar väldigt mycket beroende på de enskilda robotarnas formerare, vilket är bekymmersamt då variationen för elektrodernas livslängd hos dessa olika robotar därmed också kan variera.



Figur 2.6.5. Spånbildning i skärverktyget.



Figur 2.6.6. Elektrod som fastnat i formerare.



Figur 2.6.7. Spånor efter formering.

- Verktyget som används vid byte, används eller finns inte tillgängligt vid varje station.
- Spånor från formeringsprocessen hamnar på golvet och bidrar till att arbetare måste rengöra.
- Att skäret i formeraren måste bytas ut då det slits med tiden.



Figur 2.6.8 Verktyg vid elektrodbyte.

2.7 Processparametrar vid punktsvetsning

Vid punktsvetsning finns flera olika processparametrar som är viktiga att hålla koll på som har en direkt koppling till hur pass bra svetskvaliteten blir i arbetsstycket. En god svetskvalitet innebär bland annat att svetsdiametern uppfyller de krav som ställs (är tillräckligt stor) samt att svetssprutet hålls nere vid svetsningsprocessen. Genom regelbunden kontrollprovning av genomförda svetsar i efterhand erhålls svar på svetskvalitetens duglighet. Om svetskvaliteten inte uppfyller de krav som ställts upp i förhand regleras oftast någon eller några av de vanliga processparametrarna. Detta genomförs med hjälp av avancerade datorstyrda system. I ett kontrollrum där svetsmästare och andra ingenjörer sitter och arbetar kan processparametrarnas nivåer justeras efter behov, som sedan svetsrobotarna opererar utefter. Det hela kan beskrivas som ett ständigt samspel mellan övervakning och reglering, där dagens nivåer på processparametrarna har tagits fram utifrån tiotals år av erfarenhet där man testat sig fram för att finna lämpliga nivåer. Några av de viktigaste parametrar beskrivs nedanför.

Svetsströmmen som sammankopplas till värmegenereringen är en av de absolut viktigaste parametrarna i punktsvetsningsprocessen. Är svetsströmmen för låg så finns det en risk för att inte tillräckligt med värme kan frambringas så att smälta och en punktsvets bildas mellan metallplåtarna. En för hög ström leder å andra sidan leder till att risken för svetssprut ökar och att en så pass hög temperaturer uppstår att kokpunkten överstigs. Inträffar detta ökar risken för porositet i den färdiga svetsen. Dessutom blir intrycket på metallytorna för stor vid en hög svetsström. Vanligtvis ligger strömmens storlek inom intervallet 5kA-10kA, lite beroende på de andra parametrarna samt vilken applikation och vilka krav som ställs [2].

En annan viktig parameter är tiden som tar det tar att utföra en svets. Svetstiden har likt svetsströmmen en tydlig koppling till värmeproduktionen. En för låg svetstid innebär att inte tillräckligt med värme kan genereras och därmed bildas ingen punktsvets. En för hög svetstid leder istället till överhettning med risk för svetssprut. Det är önskvärt att hålla nere på svetstiden i tillverkningen därför att en ökad svetstid innebär högre produktionskostnader. Detta kan exempelvis kompenseras genom en högre strömstyrka. Svetstiden ligger oftast mellan 200ms-700ms [2].

Den kraft som elektroderna utsätts för under svetsningen är också betydelsefull. Tillräcklig kontakt och tryck mellan elektroderna och arbetsstycket måste erhållas så att en sluten krets uppstår. Om kraften är för stor minskar den elektriska resistansen i kontaktytorna vilket innebär att värmegenereringen blir för låg. Samtidigt kan en för stor kraft leda till skador på arbetsstycket med stora fördjupningar och ojämna ytor. En för låg kraft leder till instabilitet under svetsningsprocessen och kontaktresistansen ökar vilket leder till stora mängder värme och risk för svetssprut. Inom produktion ligger elektrodkraften mellan 3kN-6kN [2].

2.8 Utrustning vid punktsvetsning

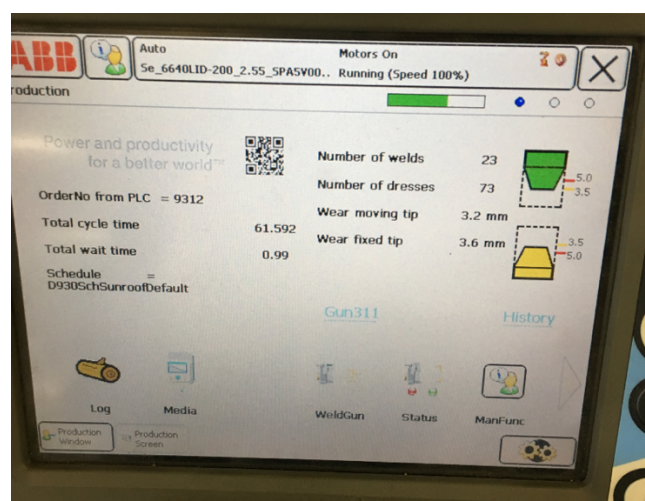
Vid produktion på industriell skala, som hos VCC på Torslanda, används främst automatiserade robotar vid punktsvetsningsutförandet. Svetsstänger har monterats på robotarnas armar som förflyttar sig enligt ett bestämt rörelseschema som programmerats på förhand. Svetsrobotarna placeras på raka led efter varandra i särskilda banor som kallas för linor. På en avdelning som TA finns ett stort antal robotar som utför punktsvetsningen. Mängden robotar uppgår till fler än cirka 1000 stycken enbart på denna avdelning. Det finns även manuell punktsvetsning. Då utför en operatör på egen hand svetsningsprocessen med hjälp av en svetsstång. Nackdelen blir då att svetsresultatet oftast inte blir lika exakt som vid användning av de automatiserade svetsrobotarna. Resultatet beror av operatörens skicklighet.

Vid varje robot finns ett visst antal övervakningsskärmar som är till för att visa på elektrod-förbrukningen hos elektrodparet som är monterat på roboten. Det görs genom ett färgkodningssystem i färgerna grönt, gult och rött. Om elektroderna på skärmen är gröna innebär det att de är helt nya eller att de enbart slitits ut lite grann och inte behöver bytas ut.

När elektroderna på skärmen har blivit gula innebär det att de delvist slitits ut och att det snart är dags att byta ut elektrodparet. Här går oftast en operatör/linemekaniker in och byter ut elektroderna då gul nivå är detsamma som en varning för att det är dags för byte. För en stor del av de robotar som finns på TA3 uppstår gul nivå när 3,5 mm avverkats i höjddled hos elektroderna.

Då elektroderna på skärmen har blivit röda (vanligtvis vid 5 mm avverkning) så innebär det att de är helt utslitna och ett akut byte måste göras. Roboten går då in i ett serviceläge, vilket innebär att den slutar att operera och väntar på att få det helt utslitna elektrodparet ersatt av ett nytt elektrodpar. Då uppstår ett totalt stopp tills problemet har blivit avhjälpt. Därför vill man undvika att nå hit då det blir kostsamt med stopp i produktionen.

I nedanstående *figur 2.8* visas ett tillfälle där den undre elektroden förslitits till gul nivå samtidigt som den övre elektroden fortfarande ligger på grön nivå. Elektrodförslitningen är alltså inte densamma för den övre och undre elektroden. På skärmen går att utläsa hur många millimeter den övre- och den undre elektroden har slitits ut i höjddled samt gränserna för när gul- och röd nivå inträffar. Dessutom finns annan matnyttig information att hitta på skärmen som antalet svetsar och totalt antal formeringar som har genomförts för tillfället.



Figur 2.8. Övervakningsskärm vid svetsrobot.

3. Metod

Upplägget för hur arbetet bedrivits beskrivs mer i detalj i detta kapitel. Bland annat hur olika data samlats in genom intervjuer och mätningar samt hur en analys av systemet (systembeskrivning) har gjorts. Detta med hjälp av bland annat "*Lean Six Sigma Toolbook*", som är en handbok listad med verktyg för hur ett projekt bör bedrivas [15].

3.1 Insamling av kvalitativ och kvantitativ data

Till att börja med gjordes en bakgrundsanalys med insamling av kvalitativ och kvantitativ data för att ta reda på och få en bättre förståelse för vilka problem som fanns, hur stora de var och vilka konsekvenser de fick för de inblandade aktörerna. Detta som ett underlag för att visa på varför problemen är värda att lösa. Bakgrundsanalysen är ett sätt att kartlägga kundens röst (i detta fall uppdragsgivaren VCC) och kallas för VOC (Voice Of Customer).

För att få in den grundläggande informationen gjordes flera besök på Volvos karosfabrik TA på Torslanda. Detta för att samtala med olika personer som har en koppling till punktsvetsningsprocessen. Som förberedelse innan besöket skapades två stycken särskilda frågeformulär; det ena med frågor av kvalitativ karaktär och det andra med frågor av kvantitativ karaktär. Frågorna som var kvalitativa formulerades på ett sådant sätt att de skulle ge svar på vilka problem och hinder som fanns i dagsläget i produktionen, hur stora de var och vad de gav för konsekvenser. De kvantitativa frågorna formulerades istället med syftet att samla in mer rådata och fakta om punktsvetsningsprocessen hos Volvo Cars, och ingick som en del av litteraturstudien. Frågorna som ställdes finns bifogade att se i bilaga A och bilaga B.

Diskussioner fördes och frågorna ställdes till bland annat flera svetsmästare, en underhållsingenjör och två produktionsledare samt ett antal operatörer och arbetare. Detta för att få inblick ur olika perspektiv och ta reda på vad de tyckte behövde förbättras mot ett idealt system. Vad som framgick av insamlingen av de olika typerna av data samt övriga observationer vid besöken går att läsa om i avsnitt 4.1 - "Bakgrundsanalys".

3.2 Systembeskrivning av punktsvetsningsprocessen

Flertalet metoder från kompendiet "System Functional Understanding" [16] och handboken "Lean Six Sigma Toolbook" [15] användes för att skapa en systembeskrivning av de ingående delarna i punktsvetsningsprocessen. Syftet var att undersöka hur de ingående delarna stod i relation till varandra och få en bättre förståelse för hur systemet i sig var uppbyggt. Detta för att underlätta vid avgränsningen och hitta delområden inom systemet där potentiella förbättringar kunde genomföras.

Först identifierades de tänkbara ingående delarna i svetsningssystemet med hjälp av brainstorming. Dessa delar sorterades sedan i olika grupper på papper. Denna kategorisering utfördes för att få en bättre bild av delarna i systemet samt hierarkin mellan dem. För att få en uppfattning av hur systemet med dess ingående delar och aktiviteter fungerar från "start" till "slut" konstruerades dessutom en processkarta. Där relateras delarna mer noggrant till varandra med hjälp av flödespilar. Syftet med processkartan är att få en bättre bild av hur systemet fungerar och hur de ingående delarna kopplas ihop till varandra. Se kapitel 4.3 för processkarta.

Därefter skapades ett SIPOC-diagram (SIPOC = Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers). Det är ett redskap som är till för att skilja mellan olika delar och aktörer i ett projekt. Diagrammet underlättar att få grepp på processens omfattning, samt identifiera kritiska intressenter som leverantörer och kunder. Fördelen är då att det blir lättare att avgränsa sig och rikta fokus. I ett SIPOC-diagram listas leverantör, input, output, process och kunder, se kapitel 4.4 för SIPOC-diagram.

Olika P-diagram skapades för mätbara parametrar som valts ut (elektrodens livslängd och tid mellan formeringar). Att de är mätbara innebär att de har utdata som kan samlas in (i detta fall bland annat genom att utföra mätningar i fabriken). P-diagram används för att sätta relation mellan "input" och "output" ($y=f(x)$) hos systemet som beskrivs mer i detalj. Här ingår designparametrar som man som ingenjör kan gå in och reglera för att optimera ens "output". För P-diagram, se kapitel 4.5.

3.3 Stickprovsmätning av produktionsparametrar i fabrik

För att kunna identifiera den genomsnittliga elektrodförbrukningen samt formeringsintervallet och stopptiden för svetsrobotarna i Volvo Cars karossfabrik i Torslanda, TA, fanns det ett behov av utforma ett mätsystem vid stickprovsmätningen av produktionsparametrar i fabriken. Detta då det i TA finns uppemot cirka 1000 svetsrobotar och att observera samt analysera varje enskild robot är omöjligt då det är för tidskrävande. Just på grund av denna anledning, byggdes ett mätsystem upp, som skulle underlätta vid insamling och analys av produktionsdata. Se bilaga E för rådata från stickprovsmätningen.

3.3.1 Mätsystem

Det mätsystem som skapades, gjordes i samförstånd med operatörer, linemekaniker och underhållspersonal. Skapandet av mätsystemet gjordes till stor del med hjälp från dessa personer som riktade in oss i rätt riktning med sina erfarenheter inom området.

Samtal med bland annat linemekaniker gjordes för att kunna hitta nya infallsvinklar till problemet, och metoder för att kunna identifiera den genomsnittliga elektrodförbrukningen, samt formeringsintervallet och stopptiden som uppstår hos svetsrobotarna. Det resulterade i att övervakningsskärmarna till varje vald robot i stickprovsmätningen skulle användas vid insamling av data för ovanstående parametrar.

Övervakningsskärmarna som finns vid varje enskild robot gav mycket av den information som behövdes, bland annat:

- 1) Antalet punkter roboten svetsade innan en formering utfördes.
- 2) Antalet formeringar svetsroboten utförde innan ett elektrodbyte.
- 3) Gränserna för gul respektive röd nivå samt aktuellt slitage på övre- och undre elektrod. Se avsnitt 2.8.

Genom att observera robotarna fick man dessutom reda på antalet punkter som roboten svetsade för varje enskild kaross och därigenom kunde man identifiera formeringsintervallet för hur många karosser som passerade en robot innan en formering utfördes. Exempelvis: Att roboten utförde svetsoperationen på två stycken karosser, där det totala antalet svetsade punkter uppgick till 50 svetspunkter innan en formering behövde genomföras (25 punkter per kaross). Det innebär att formeringsintervallet för den roboten då är två passerade karosser eller 50 stycken utförda punktsvetsar.

De operatörer/linemekaniker som byter ut elektroderna, gör det i regel när varningssystemet visar gult i övervakningsskärmen. Se avsnitt 4.1. Genom samarbete med och tillstånd från produktionsledaren för avdelningen kunde fyra utvalda robotar köras tills att varnings- och övervakningssystemet visade rött. Från övervakningsskärmarna kunde antalet formeringar svetsroboten gjorde innan ett elektrodbyte noteras, som hör ihop med elektrodens livslängd. Samtidigt kunde gränserna för gul respektive röd nivå också studeras och noteras från övervakningsskärmarna.

Att elektrodparet vid en robot körs ner ända tills röd nivå uppstår är inte vanligt i produktionssammanhang. Anledningen till varför detta gjordes för de utvalda robotarna var för att kunna få en teoretisk bild på hur mycket man maximalt kan använda elektrodparet och för att kunna jämföra med elektrodförbrukningen i dagsläget (då elektroderna nöts ner till gul nivå). Vid insamling av data för gul nivå användes samma robotar som för röd nivå. Närvaro

krävdes när linemekanikern efter eget tycke utförde elektrodbytet vid gul nivå. Då lästes antalet utförda formeringar hos svetsroboten från övervakningsskärmen samt att annan information hade samlats in likt vid röd nivå. Allt detta täckte det mesta av den data som behövdes, men inte riktigt allt.

Den totala tiden som gick åt enbart åt formering under elektrodens livslängd kunde inte fås genom övervakningsskärmarna. Efter observation och analys av robotarna under en längre tid, insågs ett ytterligare problem. Vilket var att roboten utförde formering på två olika sätt och frekvensen för hur ofta den ena och den andra utfördes var okänd. Det ena sättet var att formeringen utfördes med efterföljande mätning (roboten utför då en extra kontroll med laser efter formering för att kontrollera att formeringsresultatet blev acceptabelt) och det andra sättet var att formering uträttades utan någon efterföljande kontrollmätning. Formering med mätning tar längre tid än formering utan mätning. Dessa två typer av formering ingår i den totala tiden som går åt vid formering av elektroder.

Detta problem löstes genom ytterligare observation av robotarna under en längre tid. Då drogs slutsatsen att majoriteten av alla robotar i karosfabriken är inställda på samma intervall, för när vilken typ av formering skall göras.

Den totala tiden som gick åt enbart för elektrodbyten samt formering under elektrodens livslängd kunde fås fram genom att klocka tiden för:

- Bytestid för elektrod, utfört av linemekaniker.
- Formeringstid med mätning (roboten utför en extra kontroll med laser efter formering)
- Formeringstid utan mätning
- Formeringstid med mätning efter ett utfört byte (formerings görs efter elektrodbyte)

Med lite enklare beräkningar, kunde antalet elektrodbyten för varje enskild svetsrobot samt stopptiden pga. elektrodbyten och den totala tiden som enbart gick åt formering under elektrodens livslängd identifieras. Se avsnitt 3.3.3.

3.3.2 Stickprov

Det stora problemet, om att få en så rättvis bild över det genomsnittliga elektrodförbrukningen som svetsrobotarna i karosfabriken har, hade ännu inte någon lösning.

Elektrodförbrukningen, som de enskilda robotarna i karosfabriken har skiljer sig beroende på arbetsstycket. Eftersom en kaross är uppbyggd av flera metalleder med olika material som svetsas ihop, kan arbetsstycket variera. Det kan vara bland annat stål med galvaniserad zink eller borstål med varierande tjocklek, där vissa robotar svetsar två tunna detaljer medan andra svetsar tre tjocka. Detta påverkar då förslitningen hos elektroden och därigenom dess livslängd.

Ytterligare brainstorming och lite litteraturstudie kring olika statistiska undersökningar resulterade i en typ av stickprovsmätning. Denna mätning bygger på att det minsta respektive högsta värdet väljs, för att kunna dra en slutsats kring större undersökningar. Syftet med denna metod är då att få så stor spridning som möjligt, kring det undersökta. Se figur 3.3.2.

Med detta som grund gjordes en rekognosering i fabriken, där robotar som pekades ut av linemekaniker och underhållare observerades. Dessa robotar som pekades ut, var robotar som enligt deras erfarenheter hade mest respektive minst elektrodbyte. Vissa formerare som robotar hade kallades för oस्थ्यel, detta för att formeraren degraderade elektroden alldeles för mycket, det vill säga spåntjockleken var för tjockt.



Figur 3.3.2. Exempel på fördelning av undersökta objekt.

Utifrån dessa utpekade robotar gjordes ett ytterligare urval, där hänsyn togs till var på karossen robotarna svetsade, tjockleken och materialet på arbetsstycket. Men hänsyn togs även till att välja linor där robotar svetsar blandad karossmodeller.

3.3.3 Beräkningar

För att beräkna antalet elektrodbyten för varje enskild svetsrobot och den totala tiden som går åt formering under elektrodens livslängd samt elektrodbyten användes mätsystemet som beskrivs i avsnitt 3.3.1.

Utifrån mätsystemet identifierades och samlades följande data in:

- a) Antalet svetspunkter roboten gjorde innan formering.
- b) Antal formeringar svetsroboten gjorde innan ett elektrodbyte.
- c) Antalet punkter som roboten svetsade för varje enskild kaross.
- d) Gränserna för gul respektive röd nivå. Se avsnitt 2.8.
- e) Bytestid för elektrodpar, utfört av linemekaniker.
- f) Formeringstid utan mätning.
- g) Formeringstid med mätning (roboten utför en extra kontroll med laser efter formering).
- h) Formeringstid med mätning efter ett byte.

Som tidigare nämnt, för att kunna få en bra bild på hur mycket man tar användning av elektroden samt underlag för att kunna jämföra elektrodens användning i dagsläget (gul nivå) med den teoretiska (röd nivå), observerades och noterades ovanstående processparametrar för varje enskild robot.

Beräkningarna gjordes både för produktion vid fulltakt och icke-fulltakt. Med full takt menas då produktionen går på maximal kapacitet, där man tillverkar det antal karosser som man på förhand satt upp som mål. Vid icke-fulltakt når man inte målet och då produceras färre karosser. Att produktionen inte går på full takt beror på diverse anledningar som att olika problem uppstår i produktionen.

Med hjälp av produktionsledare i karosfabriken kunde mängden producerade karosser vid fulltakt och icke-fulltakt fås fram för ett helt dygn. Ett helt dygn fördelas i tre-skift;

- A-skift: Arbetspass mellan 06:30-15:36
- B-skift: Arbetspass mellan 15:36-00:30
- C-skift: Arbetspass mellan 00:30-06:30

För att räkna antal elektrodbyten under ett dygn (A+B+C-SKIFT) vid fulltakt respektive icke-fulltakt utfördes följande beräkningar:

Totalt antal punkter innan elektrodbyte =
= Punkter innan formering x Antal formeringar innan elektrodbyte.

$$\textbf{Totalt antal punkter innan elektrodbyte} = a \times b \quad (1)$$

Totala antalet punkter för A skift =
= Antal karosser per A skift x Antal punkter som roboten svetsade för varje enskild kaross.

$$\textbf{Totalt antal punkter för A skift} = \text{Antal karosser för A skift} \times c \quad (2)$$

Totala antalet punkter för B skift =
= Antal karosser per B skift x Antal punkter som roboten svetsade för varje enskild kaross.

$$\textbf{Totalt antal punkter för B skift} = \text{Antal karosser för B skift} \times c \quad (3)$$

Totala antalet punkter för C skift =
= Antal karosser per C skift x Antal punkter som roboten svetsade för varje enskild kaross.

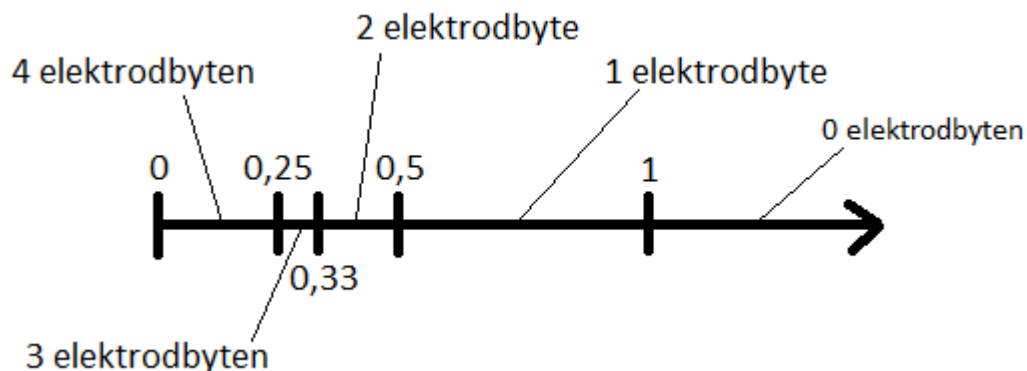
$$\textbf{Totalt antal punkter för C skift} = \text{Antal karosser för C skift} \times c \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Summa antal punkter under ett dygn} = \\ \textbf{Totalt antal punkter för (A + B + C skift)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Antal elektrodbyten för A skift} = \\ = \frac{\text{Totalt antal punkter innan elektrodbyte}}{\text{Totalt antal punkter för A skift}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Antal elektrodbyten för A + B skift} = \\ = \frac{\text{Totalt antal punkter innan elektrodbyte}}{\text{Totalt antal punkter för A + B skift}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Antal elektrodbyten under ett dygn (A + B + C skift)} = \\ = \frac{\text{Totalt antal punkter innan elektrodbyte}}{\text{Summa antal punkter under ett dygn}} \end{aligned} \quad (8)$$



Figur 3.3.3. Omvandlingsmall för att få fram antalet elektrodbyten utförda.

För ekvation (6), (7) och (8) användes ovanstående omvandlingsmall (figur 3.3.3) för att få antalet utförda elektrodbyten från de värden som beräknades hos ekvationerna. Först togs hänseende till antal elektrodbyten utförda under ett skift – ekvation (6). Då det visade sig att elektrodparet i vissa fall kunde hålla i mer än ett skift; alltså även utnyttjas under nästkommande skift så användes ekvation (7) för att identifiera antalet elektrodbyten under dessa två skift tillsammans. På samma sätt bestämdes antal elektrodbyten för tre skift, och ett helt dygn, enligt ekvation (8).

Förklaring av hur omvandlingsmallen skall tolkas:

- Fås ett värde på kvoten som är större än 1, så innebär det att elektrodparet kan användas i mer än ett skift och därmed utförs inget elektrodbyte.
- Om ett värde erhålls på kvoten som ligger mellan 0,5-1 så betyder det att elektrodparet inte kan användas under ett helt skift utan måste bytas en gång.
- Då värdet på kvoten ligger mellan 0,33–0,5 så innebär det att elektrodbyten måste utföras två gånger under skiftets gång.
- Vid ett värde på kvoten mellan 0,25–0,33 måste tre elektrodbyten utföras.
- Fås värden på kvoten under 0,25 måste fyra eller fler byten göras under skiftet.

Vid uträkning av den totala tiden som går åt formering under elektrodens livslängd samt för elektrodbyten under ett dygn ($A+B+C$ -SKIFT), vid fulltakt respektive icke-fulltakt användes den data som samlades in med hjälp av mätsystemet. Följande beräkningar gjordes:

$$\text{Total bytestid per dag} = \text{Antal elektrodbyten under ett dygn } (A + B + C \text{ skift}) \times \\ \times \text{Bytestid för elektrodpar, utfört av linemekaniker}$$

$$\text{Total bytestid per dag} = e \times (8) \quad (9)$$

$$\text{Total formeringstid utan mätning per dygn} = \\ \text{Formeringstid utan mätning} \times \frac{1}{2} (\text{Antal formeringar innan elektrodbyte})$$

$$\text{Total formeringstid utan mätning per dygn} = f \times b \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Total formeringstid med mätning per dygn} &= \\ &= \text{Formeringstid med mätning} \times \frac{1}{2} (\text{Antal formeringar innan elektrodbyte}) \end{aligned}$$

$$\text{Total formeringstid med mätning per dygn} = g \times b \quad (11)$$

Total formeringstid med mätning efter byten per dygn = Antal elektrodbyten under ett dygn ($A + B + C$ skift) $\times$ formeringstid med mätning efter ett byte.

$$\text{Total formeringstid med mätning efter byten per dygn} = (8) \times h \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Total stopptid per dygn} &= \text{Total formeringstid} \left(\begin{array}{l} \text{med mätning per dygn} + \\ + \text{utan mätning per dygn} \end{array} \right) + \\ &+ \text{Total bytestid per dag} + \text{Total formeringstid med mätning efter byten per dygn.} \end{aligned}$$

$$\text{Total stopptid per dygn} = (10) + (11) + (9) + (12) \quad (13)$$

3.4 Hårdhetsmätningar av B- och Z-elektroder

Hårdhetsmätningar av B-elektroder samt Z-elektroder utfördes på Chalmers laboratorium i Johanneberg, Göteborg. Syftet med mätningarna var dels att ta reda på hur hårdheten skiljde sig åt mellan de två elektrodtyperna, men även undersöka om hårdheten varierade för den enskilda elektrodtypen vid olika tillstånd som ny, delvist utsliten samt helt utsliten. Detta då hårdheten är en viktig materialegenskap som kan kopplas ihop med förslitningen. Ett hårt material slits inte ut lika mycket som ett mjukt material.

På laboratoriet fanns utrustning för att utföra ett hårdhetstest som kallas för Vickers hårdhetstest. Kortfattat är den bakomliggande teorin att ett materials förmåga att motstå plastisk deformation mäts upp genom att utsätta en provbit som är plan för en last från en pyramidformad diamantspets. Genom att mäta upp diagonalerna från intrycket efter deformationen samt beräkna medelvärdet av dessa kan hårdheten tas fram via olika omvandlingstabeller. Enheten för Vickers är HV där ett större värde innebär en högre hårdhet.

Innan mätningarna påbörjades lades en försöksplanering upp i form av olika tabeller för varje försök. Totalt genomfördes 6 stycken provförsök (3 st. för B-elektroderna respektive 3 st. för Z-elektroderna). Hårdhetsmätningarna gjordes på toppytorna av elektroderna.

- Prov 1 gjordes på en B-elektrod som var helt ny (grönt tillstånd).
- Prov 2 gjordes på en B-elektrod som var delvist utsliten (gult tillstånd).
- Prov 3 gjordes på en B-elektrod som var helt utsliten (rött tillstånd).

Samma fast för Z-elektroder i prov 4,5 och 6. Se nedanstående *figur 3.4.1* för de olika elektroder som användes som provbitar vid hårdhetsmätningen.



Figur 3.4.1. Bild tagen av prov 1-6 från vänster till höger innan hårdhetsmätningen. De tre första elektroderna är B-elektroder och de tre sista är Z-elektroder.

För varje prov gjordes 5 stycken intryck med hjälp av en hårdhetsdiamant (test 1-5). Det första intrycket utfördes längs ut vid periferin (test 1) och med varje intryck som därefter gjordes närmades toppytans centrum (test 5 alltså närmast centrum). Detta genom att stega fram och tillbaka i sidled med jämna mellanrum mellan varje intryck för att säkerställa att inte intrycken påverkade varandras resultat. Med hjälp av uppmätning av hårdhetintryckens diagonaler (horisontellt och vertikalt) på en mikroskopsskärm och med en omvandlingstabell kunde sedan olika hårdheter tas fram. Mätningarna gjordes på alla elektroder med en vikt på 20 kg (därför namnet HV20 på testet). Hårdhetsmätaren samt intrycken på toppytan hos ett prov illustreras i *figur 3.4.2*. För de 6 proven kunde tabeller fyllas i där medelvärden på hårdheterna beräknades. De exakta instruktionerna som följdes vid hårdhetsmätningen samt omvandlingstabellen HV20 bifogas som bilaga C och bilaga D.



Figur 3.4.2. Hårdhetsmätare samt intryck på toppytan hos ett av proverna.

4. Analys

4.1 Bakgrundsanalys

Det som framgick efter första besöken är att elektrodbyten görs utifrån varningar från robotsystemet, där det finns tre olika nivåer: rött, gult och grönt. Röd varning innebär att elektrodbyte måste genomföras akut, gult indikerar att det snart (cirka 60 minuter) är dags för elektrodbyte och grönt innebär att man har ”nya” elektroder och att elektrodbyte inte behöver göras.

Elektrodbyten medför små stopp i produktionen och det ger störningar som försöker motverkas genom strategiska elektrodbyten. Alltså att man exempelvis byter elektroder när det är stopp i produktionen (man passar på då), eller precis innan ett skift påbörjar (rast) samt i luckor (tomma paletter, roboten står still). Detta gör man i regel när varningssystemet visar gult. Genom att byta ut innan röd nivå så håller man nere stopptiden avsevärt [1]. Det bygger på att man har en produktion som inte går på full takt, där man kan utnyttja de luckor som uppstår i produktionen, för att utföra elektrodbyten. Dessa metoder är proaktiva, vilket innebär att förebyggande åtgärder används för att minska produktionsstopp. Om man istället väntar på att röd nivå inträffar innan elektrodbytet utförs, så leder det till ett garanterat stopp i produktionen, då roboten går in i ett serviceläge och väntar på att få elektroderna utbytta. Hela linan med alla karosser bakom stannar då upp tills problemet har avlägsnats, vilket leder till en reaktiv åtgärd istället för en proaktiv handling.

Då produktion av nya bilmodeller börjar implementeras i fabriken och produktionen så småningom övergår till fulltakt blir det svårare att genomföra dessa strategiska elektrodbyten. Detta då inte lika många luckor på TA-fabrikens olika linor uppstår i och med att produktionen rullar på i en bättre takt. Att förlita sig på de stopp som uppstår i produktionen för att utföra elektrodbyten är inte heller någon direkt lösning att luta sig tillbaka på; produktionsstopp som uppstår på grund av övriga anledningar (exempelvis att en robot krånglar) bör ju hållas till ett minimum. Idealfallet vore att ha en produktion där inga sådana stopp uppstår alls, men det är ett orealistiskt krav då dessa produktionsstopp alltid kommer att uppstå på grund av olika faktorer. De motverkas genom att försöka förutse problemen i förhand och avhjälpa de snabbt när de uppstår, vilket är i linje med hur VCC bedriver verksamheten. Det hela leder i sin tur till att man inte kommer undan själva problemet, även om inte några symptom uppvisas i dagsläget. Det är ett framtida problem vid fulltaksproduktion, som redan i dagsläget kan vara bra att ta ställning till och försöka lösa.

Vad som visade sig vara ett av de största problemen vid elektrodbyten och under produktionens gång är formeringen av elektrodspetsen. Elektroden vässas (höjdliden minskar) i en process som kan jämföras med en pennvässningsaktion. Formering måste göras regelbundet (efter varje svetscykel, exempel på en svetscykel = 50 svetsar) vid svetsning då krav finns på elektrodens dimensioner, för annars blir inte svetsningsresultatet godtagbart. Formeringen upptar större delen av stopptiden samt att den ofta återkommande formeringen sliter på elektroderna, vilket till slut leder till att dessa måste bytas. Formeringsresultatet blir inte heller alltid perfekt, vilket gör att roboten måste återformera elektroden. Det innebär att ytterligare en formering behöver genomföras då det ursprungliga formeringsresultatet inte blev acceptabelt. Med formeringsresultat menas här att diametern samt ytorna på elektroden inte

uppfyller de krav som ställs på elektroden för att svetsningen ska kunna göras med god kvalitet. Att återformera leder i sin tur till ytterligare slitage och tätare mellan elektrodbyten.

En annan parameter som är problematisk och hör ihop med formeringen är spåntjockleken. Genom att observera spånor från formeringen kunde vi se att den var stor (upp emot 0.5mm) vilket innebär att materialet slits bort snabbt och därmed leder till att elektrodbyten måste göras oftare. Men om man minskar spåntjockleken allt för mycket kan det leda till att små spånor samlas i formeraren. Det medför en sämre formeringskvalitet då spånorna utgör ett hinder för skärverktyget i formeraren att utföra svarvningsoperationen. Vid formering är det önskvärt med så rena förhållanden som möjligt. Därför måste underhåll i form av rengöring göras regelbundet, vilket är ett tidskrävande moment, som kan leda till ännu större stopptider. En av farorna med att formera för sällan är att det kan leda till att svetskvaliteten blir sämre eller till och med oacceptabel.

Ett ytterligare problem som uppstår är när elektroderna fastnar i formeraren under formeringsprocessen. Detta sker då elektrodens toppyta expanderar på grund av det värme och tryck som bildas under svetsningsprocessen, och sedan direkt förs in i formeringsmaskinen. Då toppytan inte har krympt tillräckligt på grund av att elektroden varit varm så blir resultatet att den fastnar i formeraren där den senare helt svalnar. Det är mycket problematiskt då särskilda verktyg måste användas för att försöka få ut elektroden, vilket gör att produktionsstoppet kan bli ännu längre. Och när väl elektroden har avlägsnats så måste den antingen kasseras (om den är obrukbar) eller återformeras ytterligare en gång så att den kan fortsätta att användas.

Enligt operatörer på VCC så tenderar inte den nya Z-elektroden att expandera lika mycket som B-elektroderna, vilket är en av huvudanledningarna till varför Z-elektroder har börjat användas i produktion, som vid TA3, trots att de är dyrare att köpa in än B-elektroderna. Problemet med att elektroden fastnar i formeraren är alltså inte lika stort vid användning av Z-elektroder. Dessutom har tester som har genomförts på VCC visat på lovande resultat när det kommer till svetsningshållbarhet över tid vid användning av Z-elektroder jämfört med B-elektroder [18]. Dock utnyttjas inte denna fördel i dagsläget på TA, då formeringsintervallen (hur ofta formering utförs) är densamma för Z- som B-elektroderna.

Sammanfattningsvis finns det några parametrar (stora Y) som påverkar aktörerna och är viktiga att undersöka mer i detalj:

- Kostnaden – ska minimeras (hög kostnad på grund av ineffektiv användning av elektroder + stora kvantiteter måste köpas in + stopptid utgör också en kostnad).
- Tid mellan elektrodbyten – ska maximeras (om elektrodernas livslängd är låg blir det tätare mellan elektrodbyten vilket man vill undvika).
- Total stopptid – ska minimeras (tid för elektrodbyten+ tid för formering).
- Produktivitet – skall maximeras (hör ihop med tid mellan elektrodbyten och den totala stopptiden)

4.2 Mätbara förbättringsmått

Dessa parametrar kan varieras och kopplas ihop med stora Y (VOC). Det vill säga att det är sådana parametrar som kan användas som förbättringsmått för projektet. Viktigt att notera är att alla dessa ger olika effekt på det övergripande problemet; att de i sin tur beror av olika uppsättningar underliggande faktorer; och att de ibland kan vara motsägelsefulla.

Förbättring av en kan i sämsta fall påverka ett annat mätetal negativt. Följande potentiella förbättringsmått med utdata har identifierats i systemet:

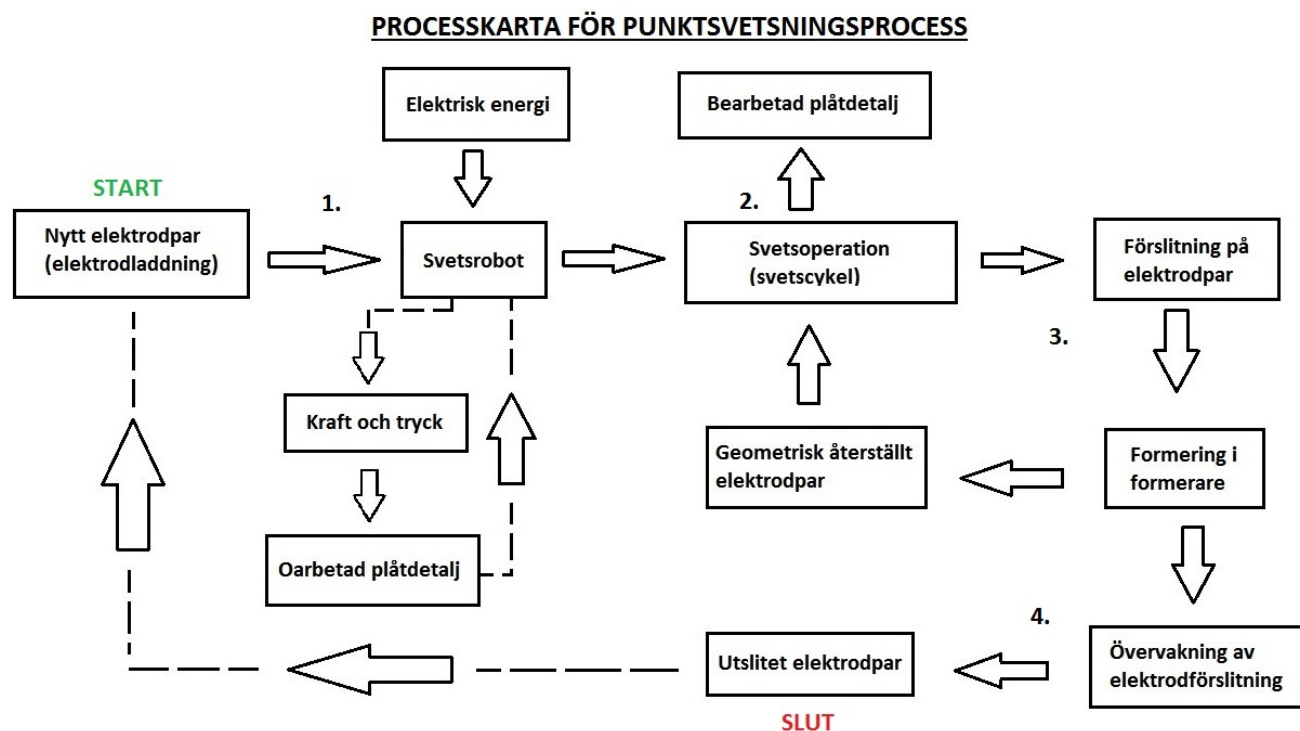
- Livslängd på elektrod [timmar/antal cykler]
- Elektrodmaterial
- Förslitning/geometriförändring [mm]
- Ström och spänningsstyrka [A och V]
- Kraft och tryck [kN och MPa]
- Spåntjocklek [mm]
- Temperatur vid svetsning [grader Celsius]
- Kylmedium och kylningsprocess vid svetsning
- Avsvalningstid efter svetsning [ms]
- Formeringstid [s]
- Tid mellan formeringar [min]
- Tid för elektrodbyten (operatör) [min]
- Antal elektrodbyten [st/dag]
- Svetskvalitet (diameter på svets) [mm]

Noterbart är att enbart några stycken av dessa valts parametrar har valts ut för noggrannare undersökning, se kapitel 1.3 om avgränsningar.

4.3 Processkarta för punktsvetsningsprocessen

Nedanstående *figur 4.3* är en slags flödes- eller processkarta som illustrerar några viktiga ingående delar och hur de relateras till varandra i punktsvetsningsprocessen. Genom att följa flödespilarna kan man se att processen återupprepas cykiskt från start- till sluttillstånd. Steg för steg visar processkartan följande:

1. Från början sker en elektrodloadning av ett nytt elektrodpar som utförs på svetsroboten. Kraft och tryck appliceras sedan från svetsroboten på en oarbetad plåtdetalj och med tillsats av elektrisk energi kan svetsningsprocessen påbörjas.
2. Svetsoperationen utförs under en hel svetscykel. En svetscykel är det antalet svetsar som utförs på en del av karossen innan elektrodparet går in för formering. Beroende på vilken del av karossen som svetsas, vilken robot som svetsar med mera, så varierar antalet svetsar i en svetscykel. Dock brukar en svetscykel inte vara mindre än 10 punktsvetsar eller fler än 100 punktsvetsar. Efter svetsoperationen erhålls en bearbetad plåtdetalj som transporteras vidare till nästa sektion på produktionslinan för vidare bearbetning.
3. Till följd av utförd svetsoperation har elektrodparet slitits ut lite grann, samt att eventuell legeringsbildning kan ha uppstått. Därför måste en formering genomföras i formeraren. Då medför det att ett geometriskt återställt elektrodpar erhålls från tidigare tillstånd. Det formerade elektrodparet kan användas igen i nästa svetscykel. Dessa steg itereras ända tills så många formeringar har utförts att elektrodparet blivit så pass utslitet att ett elektrodbyte måste utföras.
4. Genom övervakning av elektrodförslitningen med hjälp av olika skärmar vid svetsroboten kan ett beslut tas när det är dags för elektrodbyte. Det utförs i regel av en linemekaniker vid gul nivå som är varningsläget. Elektrodbytet utförs och då erhålls ett utslitet elektrodpar som är sluttillståndet i processen. Det utslitna elektrodparet kasseras och återvinns därefter.



Figur 4.3. Processkarta som illustrerar de olika stegen och dess flöden i punktsvetsningsprocessen.

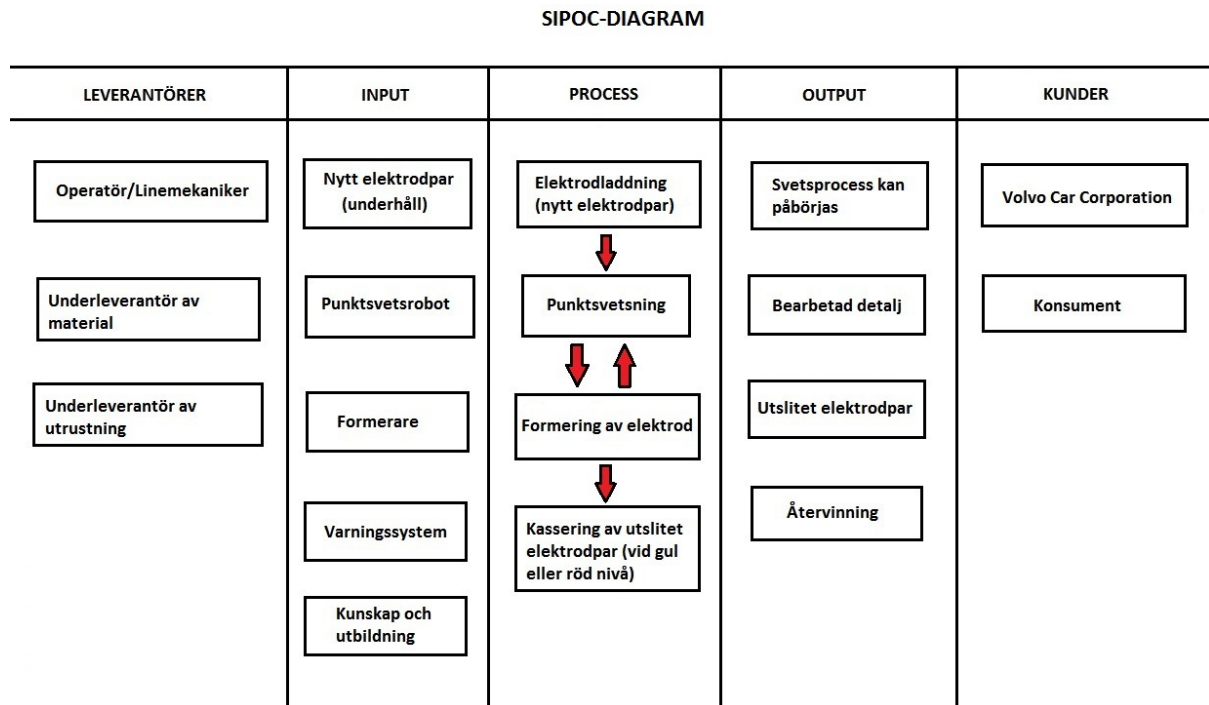
4.4 SIPOC-diagram

Ett SIPOC-diagram åskådliggörs i figur 4.4. Analysen och tankegången bakom skapande av diagrammet är enligt följande: Processen beskrivs av några enkla steg där det första steget är att en elektrodladdning utförs. För att koppla ihop det med input (alltså vad som behöver stoppas in för att få detta delsteg i processen) så krävs dels ett nytt elektrodpar men också underhåll som utförs med hjälp av tidigare kunskap inom området. Och det i sin tur kan kopplas ihop med de som levererar dessa inputs – leverantörerna. För att få ett nytt elektrodpar är det nödvändigt med en underleverantör av material och den som ligger bakom underhållet med den kunskap och utbildning som krävs är en operatör eller linemekaniker. Output (vad man får ut) är att svetsprocessen då kan påbörjas vilket är viktigt för två stakeholders (kunder); dels för VCC som konstruerar ett fordon som de senare kan sälja och få intäkter för men även för konsumenten som får sin bil tillverkad.

På samma sätt kan man koppla ihop och relatera övriga steg i processen till input, leverantörer, output och kunder. Det andra steget i processen är att punktsvetsning äger rum. Input är då att det finns en svetsrobot som utför detta och att det bakomliggande steget är att leverans sker av en underleverantör av utrustning. Output från processteget är att en bearbetad detalj erhålls, vilket gagnar både VCC och konsumenten, enligt tidigare resonemang.

Det tredje steget i processen är att elektrodparet genomgår en formering. Notera att steg 2 och 3 itereras ända tills elektrodparet har blivit helt utslitet. Formeringen kräver input i form av en formerare men även ett varningssystem (övervakningsskärm) för kontroll av formeringen och dess resultat. Dessa fysiska ting levereras från en underleverantör av utrustning. Output blir efter sista formeringen av elektrodparet att ett utslitet elektrodpar erhålls. Det hör ihop med det sista steget i processen som är kassering av utslitet elektrodpar där input är att ett

varningssystem finns som talar om att det är dags att utföra sysslan, samt att underhåll återigen genomförs med kunskap om hur detta skall göras. Leverantörerna är en operatör eller linemekaniker samt underleverantör av utrustning. En annan output är att återvinning ska utföras av det utslitna elektrodparet.

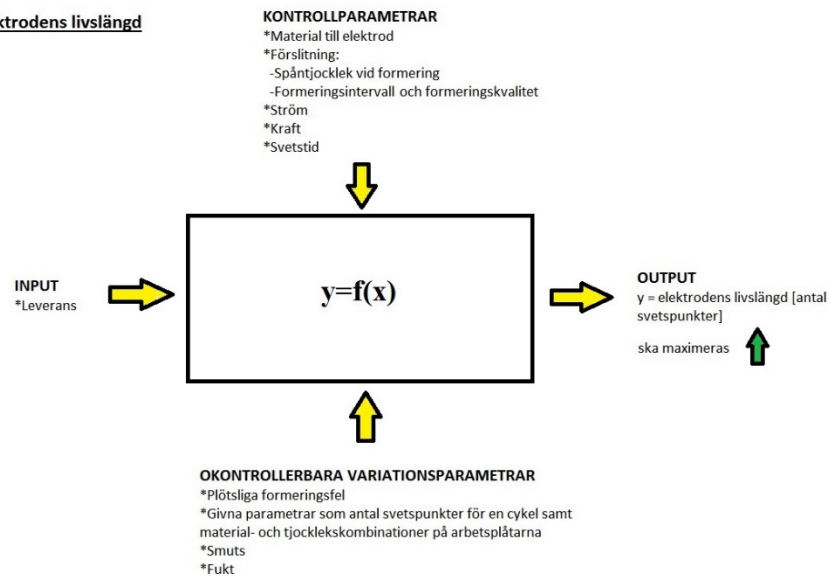


Figur 4.4. SIPOC-diagram för punktsvetsningssystemet.

Som tidigare nämdes så är SIPOC-diagrammet ett bra redskap för att avgränsa och rikta fokus vid fördelning av ett arbete. Vad går det då att ändra på och eventuellt göra förbättringar kring? Det mesta i det här fallet som leverantörer, output och kunder är sådant som är fastslaget och inte direkt går att ändra på, utan snarare är en direkt nödvändighet för att punktsvetsningsprocessen skall fungera. Däremot är input och processen i sig mer intressant att studera och sådant som en ingenjör lättare kan reglera för att erhålla bättre resultat i produktionen. Processen är å ena sidan robust på så sätt att processtegen alltid kommer vara nödvändiga att genomföra, men å andra sidan finns parametrar inom dessa delsteg hos processen som skulle kunna varieras. Exempelvis *hur* och *när* elektrodladdningen samt kassering utförs. *Hur* hör ihop med om det ska utföras manuellt eller automatiserat och *när* hör ihop med tajmingen av aktiviteten. Ska det utföras vid gul eller röd nivå? Ifall det är bättre vid gult, bör det då genomföras vid de tidiga eller senare stadierna av denna nivå? Sådana frågor kan vara aktuella att ställa, särskilt vid storskalig produktion, som hos TA på Volvo. På input-sidan kan även där tänkas göra diverse förändringar. Som hos formeraren, där man kan ändra på formeringsintervallen och hur varningssystemen fungerar där man sätter gränser för grön, gul och röd nivå. Ett annat viktigt område är kunskap och utbildning där det kan vara värt att satsa på att utbilda mer personal så att fler kan handskas med elektrodbyten och närrelaterade problem som kan uppstå i produktionen.

4.5 P-diagram

P-diagram för elektrodens livslängd



Figur 4.5.1. P-diagram för $y = \text{elektrodens livslängd}$.

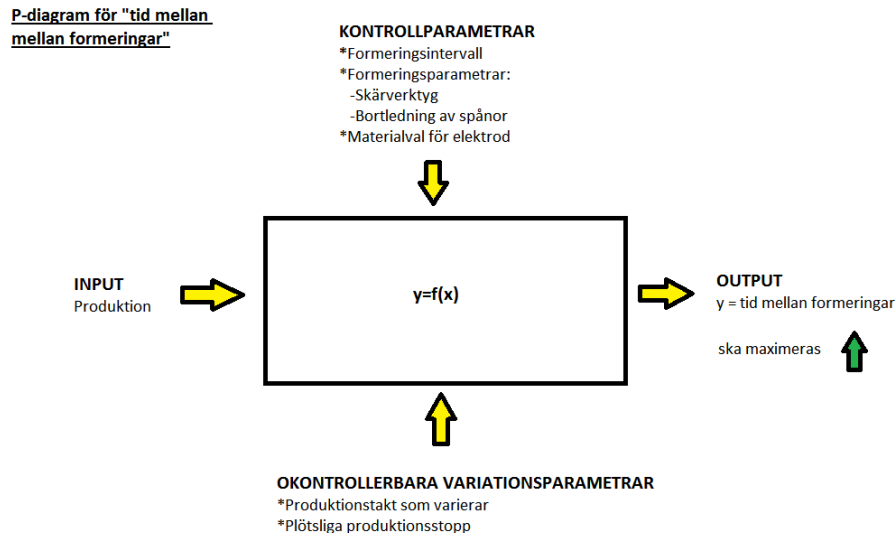
I ovanstående figur 4.5.1 visas ett p-diagram för en av de mätbara parametrarna med utdata - elektrodens livslängd, som oftast brukar mätas i antalet svetspunkter som elektroden kan utföra innan den måste bytas ut. Det är modellens output, som bör maximeras: elektroden skall ju hålla så länge som möjligt. Detta då en av målsättningarna är att få till en kostnadseffektiv produktion (alltså minska kostnaderna, vilket är ett av problemen på större nivå, som listades i bakgrundsanalysen).

Input, som är en förutsättning för att få en output, är att det finns en leverans av dessa elektroder. Kontrollparametrarna kan betraktas som de variabler (x) som ger viss utdata på output (y). De står alltså i direkt relation till varandra (en funktion). I det här fallet har vissa kontrollparametrar listats som kan ha en påverkan på elektrodens livslängd. Materialvalet hos elektroden är en sådan parameter. Beroende på vilken kopparlegering som används, så kan livslängden variera, vilket har sin förklaring i de olika materialegenskaperna. Tester som har gjorts på VCC visar på lovande resultat när det kommer till svetsnings-hållbarhet över tid vid användning av Z-trode jämfört med B-trode [12].

Förslitningen är en annan kontrollparametrar som är tätt sammankopplat med livslängden hos elektroden. Den beror i sin tur av underparametrar som spåntjocklek vid formering och formeringsintervall samt formeringskvalitet. En stor spåntjocklek vid formering innebär att förslitningen blir större på elektroden vilket över tid leder till en förminskad livslängd. Formeringsintervallet, som är frekvensen av utförda formeringar, är ett annat exempel på en kontrollparameter. Om formering utförs väldigt ofta, så kommer det att leda till en högre förslitning och lägre livslängd. Formeringskvaliteten är också viktig, för blir resultatet bristfälligt så måste återformerings utföras, vilket också bidrar till ökad förslitningen och lägre livslängd.

Ström, kraft, och svetstid är tre andra viktiga faktorer som har en inverkan på elektrodens förslitning. Deras värden vid processen får varken vara för stora eller små, utan ska ligga på rätt nivå, så att elektrodförslitningen inte blir för stor. I p-diagrammet finns också några

okontrollerbara variationsparametrar. De sker med olika variation i processen och är svåra att ha någon kontroll eller styra över. Exempelvis smuts och fukt i omgivningen som möjligen kan påverka livslängden, eller att oförutsägbara formeringsfel sker, vilket kräver återformering och påverkar livslängden.



Figur 4.5.2. P-diagram för $y = \text{tid mellan formeringar}$.

Ett p-diagram för en annan parameter – tid mellan formeringar – demonstreras i figur 4.5.2. Det är en parameter som teoretiskt bör maximeras, för om tiden mellan formeringar är liten så innebär det att fler formeringar utförs per tidsenhet med resultatet att stopptiderna i produktionen ökar. Detta då formering är ett tidskrävande moment som orsakar stopp i tillverkningsprocessen. Men tiden mellan formeringar kan inte heller vara för stor, för då formerar man elektroderna för sällan, vilket ger negativt utslag på svetsresultatet. Det handlar om att hitta en balans där formeringarna utförs med så pass bra formeringsresultat, så att formeringar inte ska behöva utföras lika ofta och med bibehållen svetskvalitet.

Två kontrollparametrar som har med formeringsresultatet att göra är skärverktyget som används i formeraren samt bortledningen av spånor. Skärverktyget har stor inverkan på formeringsresultatet, och leds spånorna bort genom kraftfullare anordningar, så bidrar det till bättre förutsättningarna att utföra bra formeringar. Vilket formeringsintervall man sätter upp har direkt inverkan på tiden mellan formeringar. Med materialval för elektroden menas att det att vissa kopparlegeringar generellt förslits mindre och därmed inte behöver formeras lika ofta. Då ökar tiden mellan formeringar.

Input är att en produktion är given och den kan variera beroende på hur marknaden ser ut i dagsläget (hög eller lågkonjunktur). Det är en okontrollerbar parameter, då det inte är lätt att som enskilt företag styra dessa trender. Om produktionstakten är hög medför det att många bilar tillverkas och elektroderna används då konstant och måste gå in på formering oftare än när produktionstakten är låg då färre bilar produceras. Vid det senare exemplet är det så att fler luckor uppstår i produktionen och på dessa ställen utförs inte någon svetsning för tillfället. Samma sak gäller vid plötsliga produktionsstopp av andra anledningar. Då ökar tiden mellan formeringar, fast av fel anledningar. Man vill ha en produktion som går på maximal kapacitet, *samtidigt* som tiden mellan formeringar ökas.

5. Resultat

5.1 Stickprovsmätning av produktionsparametrar i fabrik

Antalet plåtar och den totala tjockleken hos de enskilda robotarna var:

Robot 1 = 2 plåtar (cirka 3mm)

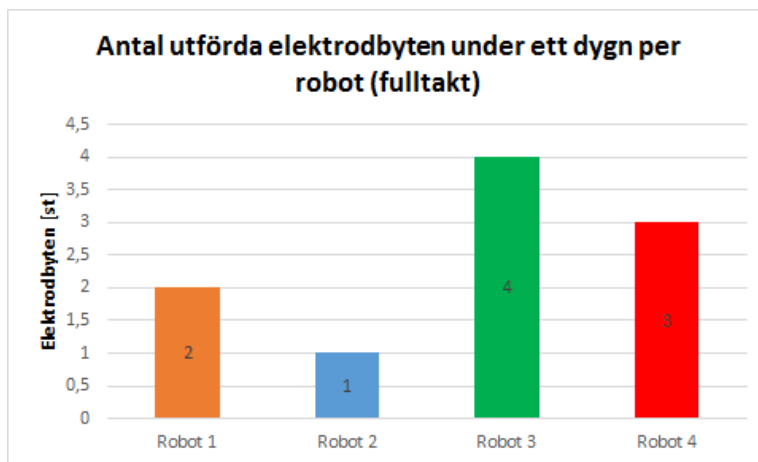
Robot 2 = 2 plåtar (cirka 3mm)

Robot 3 = 2 plåtar (cirka 3mm)

Robot 4 = 3 plåtar (cirka 5mm)

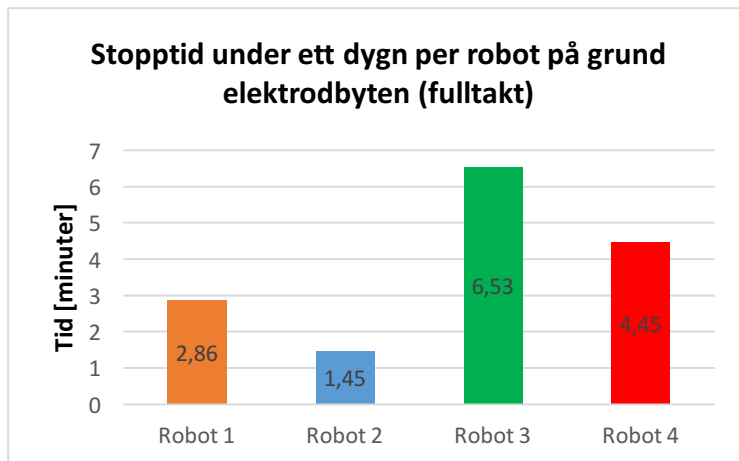
5.1.1 Röd nivå – fulltakt

De värden som presenteras i nedanstående diagram är framtagna utifrån beräkningar som har gjorts med hjälp av insamlad data från stickprovsmätningen (se bilaga E), vid fulltaksproduktion, då elektroderna bytts ut vid röd nivå (dvs. då de blivit helt utslitna).



Figur 5.1.1.A. Elektrodbyten under ett dygn för fyra olika robotar.

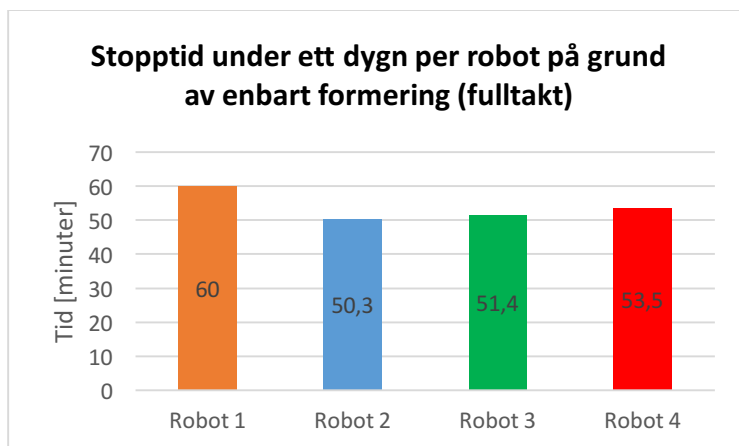
I ovanstående figur 5.1.1. A visas antalet utförda elektrodbyten under ett dygn för de fyra robotarna. Elektrodförbrukningen är som högst för robot 3 och robot 4 med fyra respektive tre elektrodbyten. Den genomsnittliga elektrodförbrukningen (medelvärde för de 4 robotarna) under ett dygn är 2,5 elektrodpar per robot. Under ett arbetsår (räknat över 253 arbetsdagar) motsvaras detta av $253 \cdot 2,5 = 633$ elektrodpar eller 1265 elektroder per robot. För 1000 robotar (hela TA) blir det då $1000 \cdot 1265 = 1265000$ förbrukade elektroder per år.



Figur 5.1.1.B. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av elektrobyten.

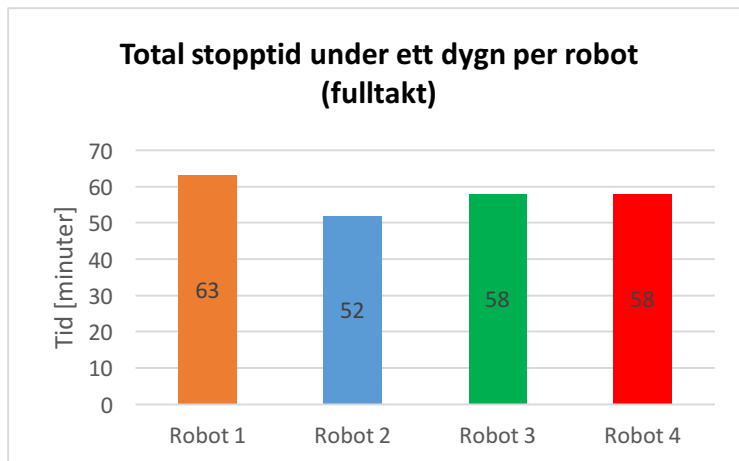
Ett annat diagram, se *figur 5.1.1.B*, visar stopptiden under ett dygn för robotarna på grund av utförda elektrobyten. Stopptiden är störst för robot 3 som ligger på 6,53 minuter.

Medelvärde för stopptiden pga. elektrobyten för de 4 robotarna är 3,82 minuter.



Figur 5.1.1.C. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av formering.

Stopptiden under ett dygn för de fyra robotarna enbart på grund av utförda formeringar åskådliggörs i *Figur 5.1.1.C*. Robot 1 har störst stopptid på grund av formeringar där stopptiden ligger på 60 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. formeringar för de 4 robotarna är 53,8 minuter.

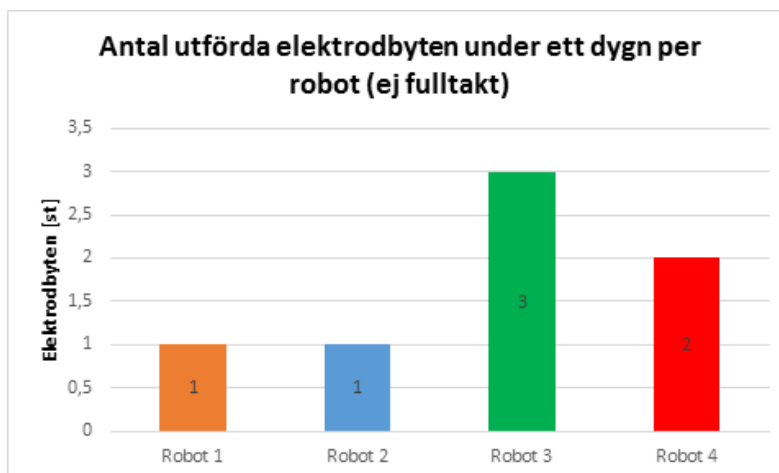


Figur 5.1.1.D. Total stopptid under ett dygn för fyra olika robotar.

Se figur 5.1.1. D för ett sammanfattande diagram över den totala stopptiden under ett helt dygn orsakat av elektrodbyten och formeringar. Den totala stopptiden är störst för robot 1 där stopptiden ligger på 63 minuter. Medelvärde för den totala stopptiden för de 4 robotarna är 57,8 minuter.

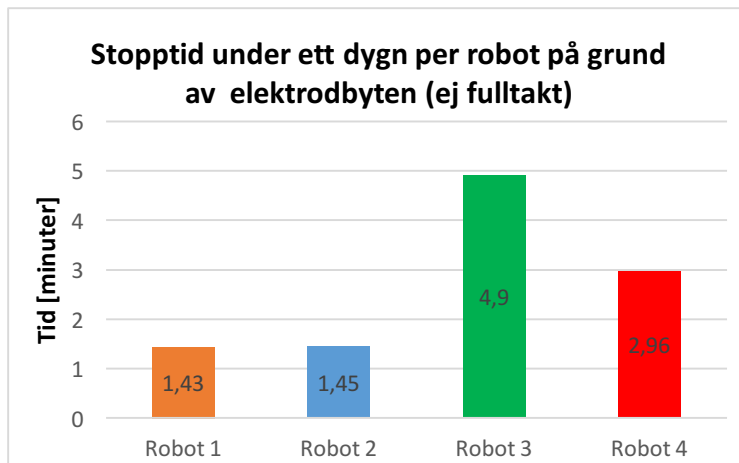
5.1.2 Röd nivå – ej fulltakt

De värden som presenteras i nedanstående diagram är framtagna utifrån beräkningar som har gjorts med hjälp av insamlad data från stickprovsmätningen (se bilaga F), vid icke-fulltaksproduktion, då elektroderna bytts ut vid röd nivå (dvs. då de blivit helt utslitna).



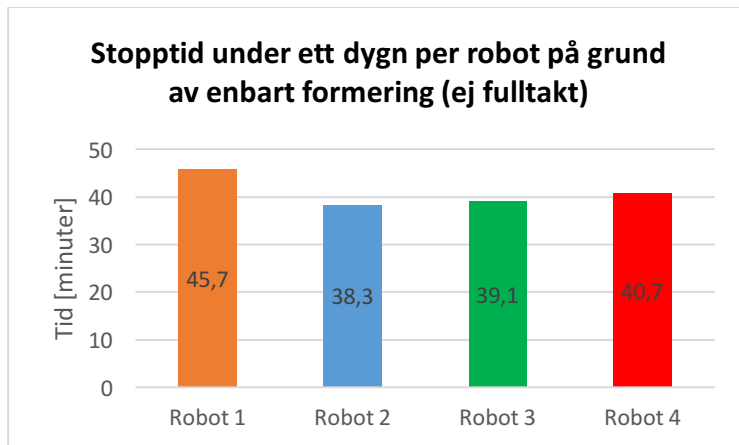
Figur 5.1.2.A. Elektrodbyten under ett dygn för fyra olika robotar.

I ovanstående figur 5.1.2.A visas antalet utförda elektrodbyten under ett dygn för de fyra robotarna. Elektrodförbrukningen är som högst för robot 3 och robot 4 med tre respektive två elektrodbyten. Den genomsnittliga elektrodförbrukningen (medelvärde för de 4 robotarna) under ett dygn är 1,75 elektrodpar per robot. Under ett arbetsår (räknat över 253 arbetsdagar) motsvaras detta av $253 \cdot 1,75 = 443$ elektrodpar eller 886 elektroder per robot. För 1000 robotar blir det då $1000 \cdot 886 = 886000$ förbrukade elektroder per år.



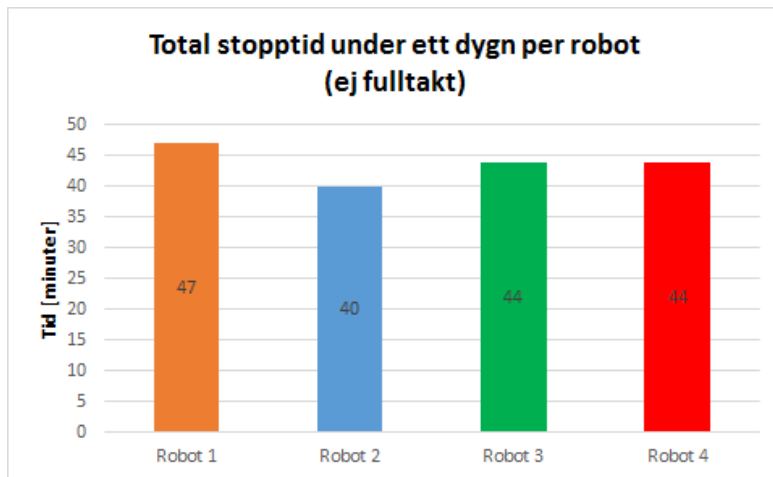
Figur 5.1.2.B. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av elektrodbyten.

Ett annat diagram, se *figur 5.1.2.B*, visar stopptiden under ett dygn för robotarna på grund av utförda elektrodbyten. Stopptiden är störst för robot 3 som ligger på 4,9 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. elektrodbyten för de 4 robotarna är 2,68 minuter.



Figur 5.1.2.C. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av formering.

Stopptiden under ett dygn för de fyra robotarna enbart på grund av utförda formeringar åskådliggörs i *Figur 5.1.2.C*. Robot 1 har störst stopptid på grund av formeringar där stopptiden ligger på 45,7 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. formeringar för de 4 robotarna är 40,95 minuter.

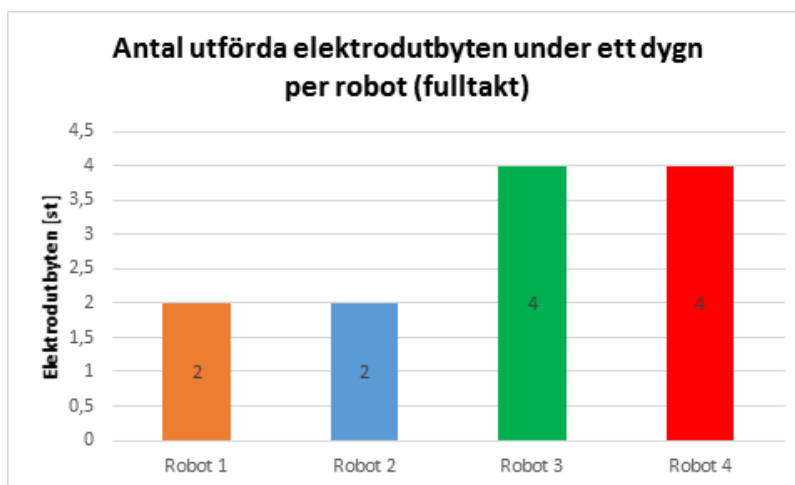


Figur 5.1.2.D. Total stopptid under ett dygn för fyra olika robotar.

Se figur 5.1.2. D för ett sammanfattande diagram över den totala stopptiden under ett helt dygn orsakat av elektrodbyten och formeringar. Den totala stopptiden är störst för robot 1 där stopptiden ligger på 47 minuter. Medelvärdet för den totala stopptiden för de 4 robotarna är 43,8 minuter.

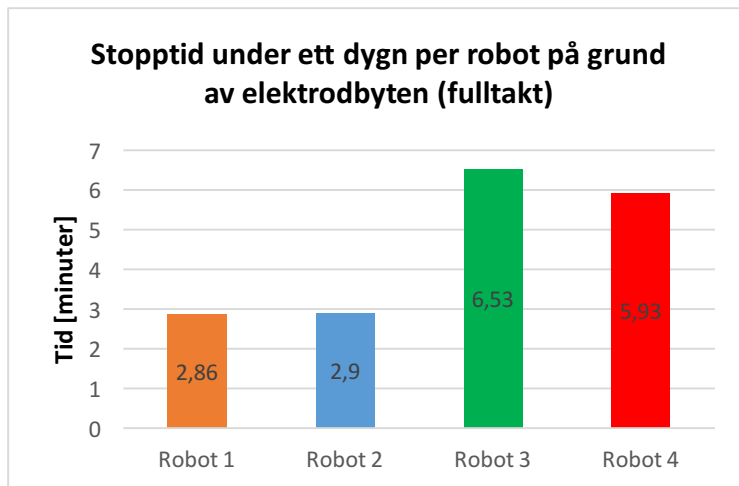
5.1.3 Gul nivå – fulltakt

De värden som presenteras i nedanstående diagram är framtagna utifrån beräkningar som har gjorts med hjälp av insamlad data från stickprovsmätningen (se bilaga G), vid fulltaksproduktion, då elektroderna bytts ut vid gul nivå (dvs. då de blivit delvist utslitna).



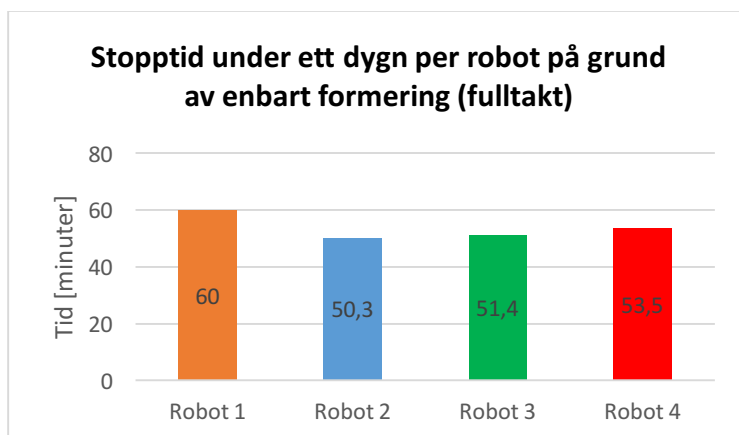
Figur 5.1.3.A. Elektrodbyten under ett dygn för fyra olika robotar.

I ovanstående figur 5.1.3.A visas antalet utförda elektrodbyten under ett dygn för de fyra robotarna. Elektrodförbrukningen är som högst för robot 3 och robot 4 där fyra stycken elektrodbyten utförs för både robotar under ett dygn. Den genomsnittliga elektrod-förbrukningen (medelvärdet för de 4 robotarna) under ett dygn är 3 elektrodpar per robot. Under ett arbetsår (räknat över 253 arbetsdagar) motsvaras detta av $253 \cdot 3 = 759$ elektrodpar eller 1518 elektroder per robot. För 1000 robotar blir det då $1000 \cdot 1518 = 1518000$ förbrukade elektroder per år.



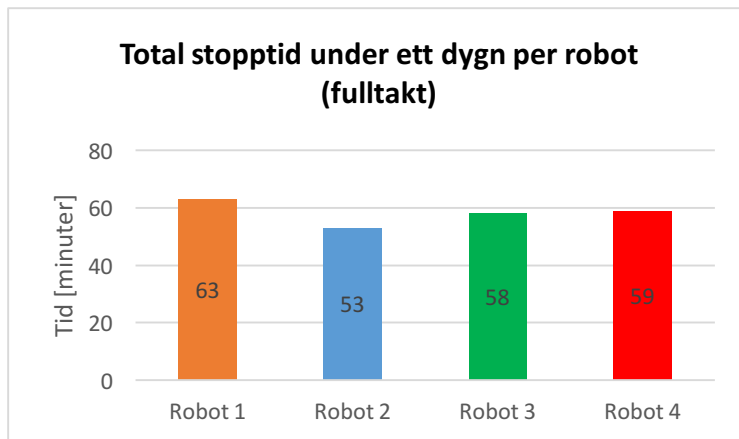
Figur 5.1.3.B. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av elektrobyten.

Ett annat diagram, se *figur 5.1.3.B*, visar stopptiden under ett dygn för robotarna enbart på grund av utförda elektrobyten. Stopptiden är störst för robot 3 som ligger på 6,53 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. elektrobyten för de 4 robotarna är 4,55 minuter.



Figur 5.1.3.C. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av formering.

Stopptiden under ett dygn för de fyra robotarna enbart på grund av utförda formeringar åskådliggörs i *Figur 5.1.3.C*. Robot 1 har störst stopptid på grund av formeringar där stopptiden ligger på 60 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. formeringar för de 4 robotarna är 53,8 minuter.

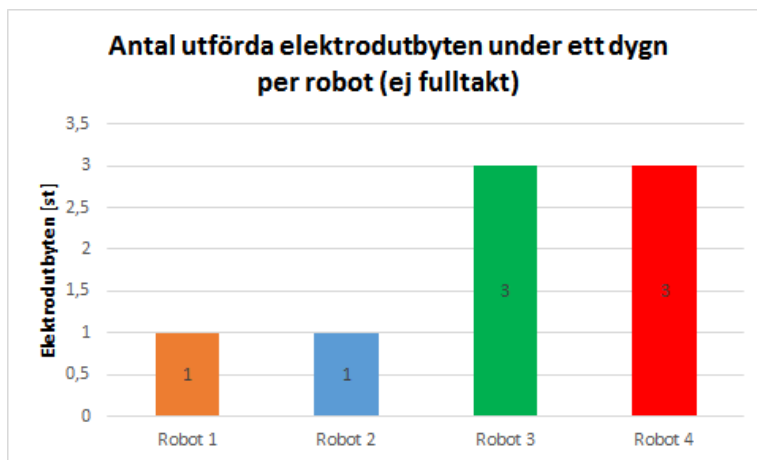


Figur 5.1.3.D. Total stopptid under ett dygn för fyra olika robotar.

Se figur 5.1.3. D för ett sammanfattande diagram över den totala stopptiden under ett helt dygn orsakat av elektrodbyten och formeringar. Den totala stopptiden är störst för robot 1 där stopptiden ligger på 63 minuter. Medelvärdet för den totala stopptiden för de 4 robotarna är 58,3 minuter.

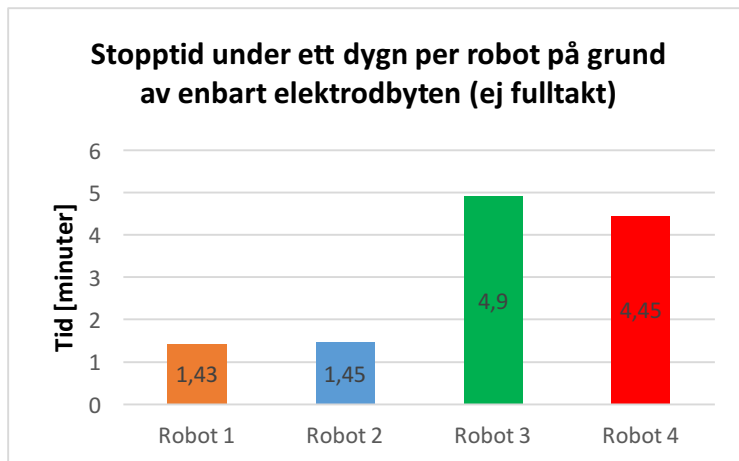
5.1.4 Gul nivå – ej fulltakt

De värden som presenteras i nedanstående diagram är framtagna utifrån beräkningar som har gjorts med hjälp av insamlad data från stickprovsmätningen (se bilaga H), vid icke-fulltaktsproduktion, då elektroderna bytts ut vid gul nivå (dvs. då de blivit delvist utslitna).



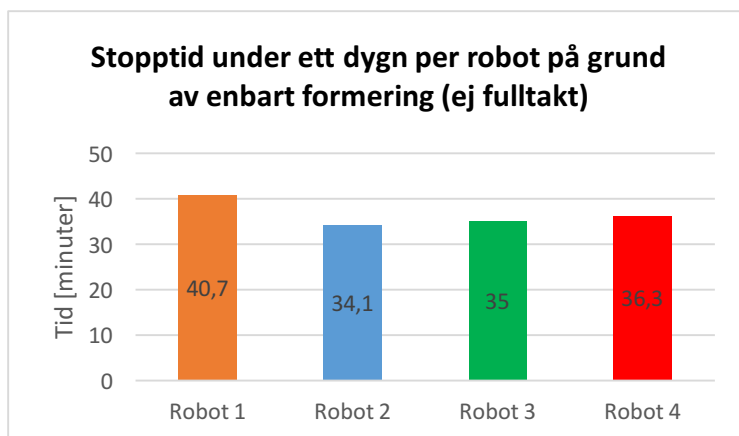
Figur 5.1.4.A. Elektrodbyten under ett dygn för fyra olika robotar.

I ovanstående figur 5.1.4.A visas antalet utförda elektrodbyten under ett dygn för de fyra robotarna. Elektrodförbrukningen är som högst för robot 3 och robot 4 där tre stycken elektrodbyten utförts för både robotar. Den genomsnittliga elektrodförbrukningen (medelvärdet för de 4 robotarna) under ett dygn är 2 elektrodpar per robot. Under ett arbetsår (räknat över 253 arbetsdagar) motsvaras detta av $253 \cdot 2 = 506$ elektrodpar eller 1012 elektroder per robot. För 1000 robotar blir det då $1000 \cdot 1012 = 1012000$ förbrukade elektroder per år.



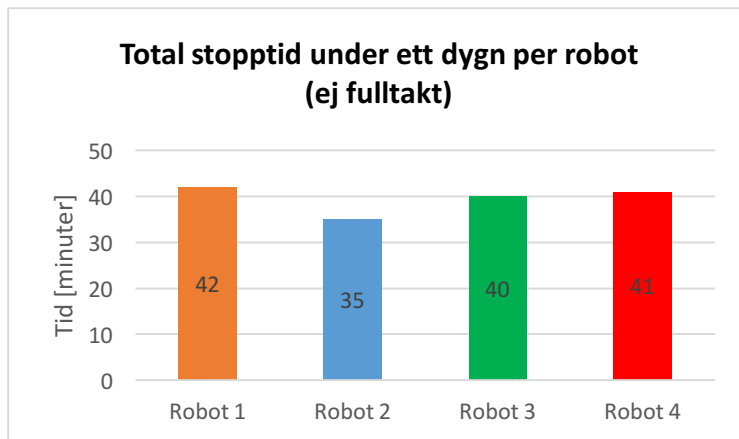
Figur 5.1.4.B. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av elektrobyten.

Ett annat diagram, se *figur 5.1.4.B*, visar stopptiden under ett dygn för robotarna enbart på grund av utförda elektrobyten. Stopptiden är störst för robot 3 som ligger på 4,9 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. elektrobyten för de 4 robotarna är 3.05 minuter.



Figur 5.1.4.C. Stopptid för fyra olika robotar under ett dygn på grund av formering.

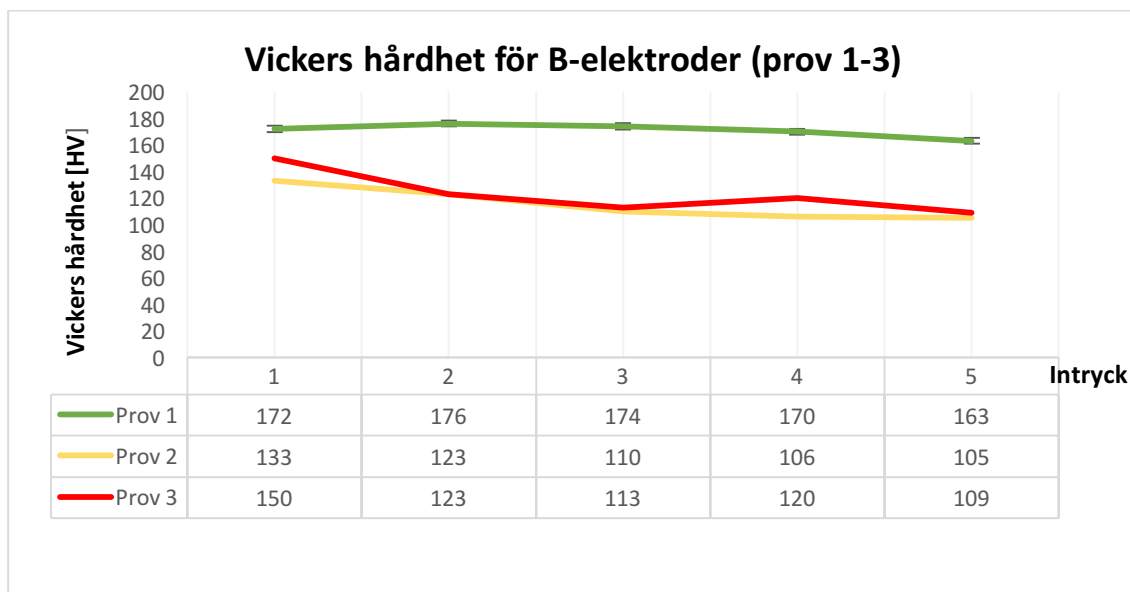
Stopptiden under ett dygn för de fyra robotarna enbart på grund av utförda formeringar åskådliggörs i *Figur 5.1.4.C*. Robot 1 har störst stopptid på grund av formeringar där stopptiden ligger på 40,7 minuter. Medelvärde för stopptiden pga. formeringar för de 4 robotarna är 36,5 minuter.



Figur 5.1.4.D. Total stopptid under ett dygn för fyra olika robotar.

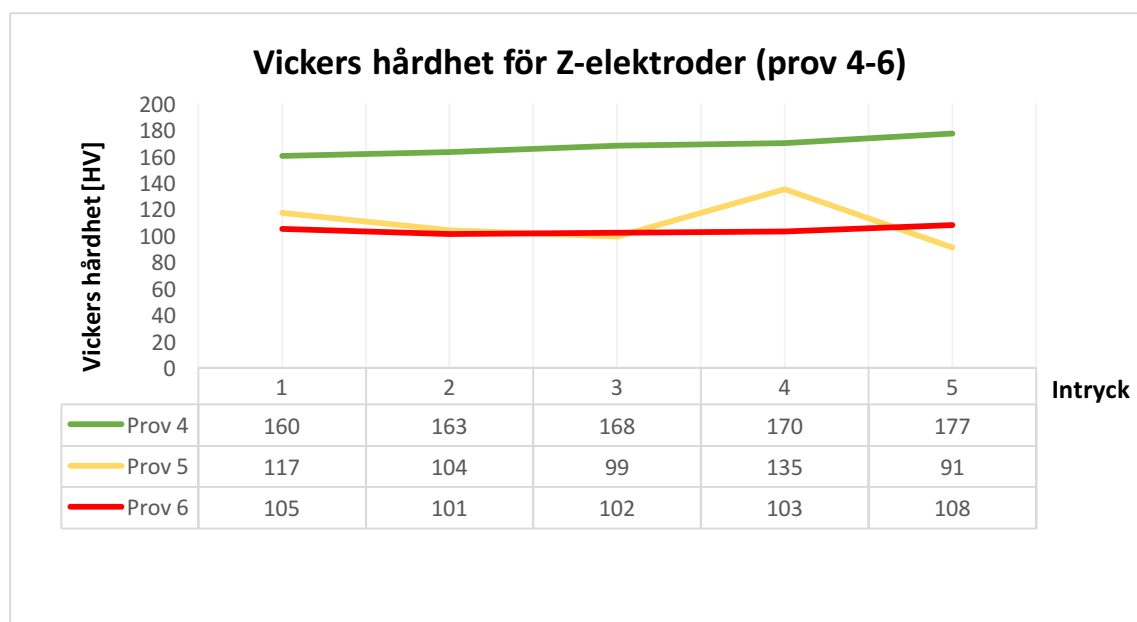
Se figur 5.1.3. D för ett sammanfattande diagram över den totala stopptiden under ett helt dygn orsakat av elektrodbyten och formeringar. Den totala stopptiden är störst för robot 1 där stopptiden ligger på 42 minuter. Medelvärde för den totala stopptiden för de 4 robotarna är 39,5 minuter.

5.2 Hårdhetsmätningar av B- och Z-elektroder



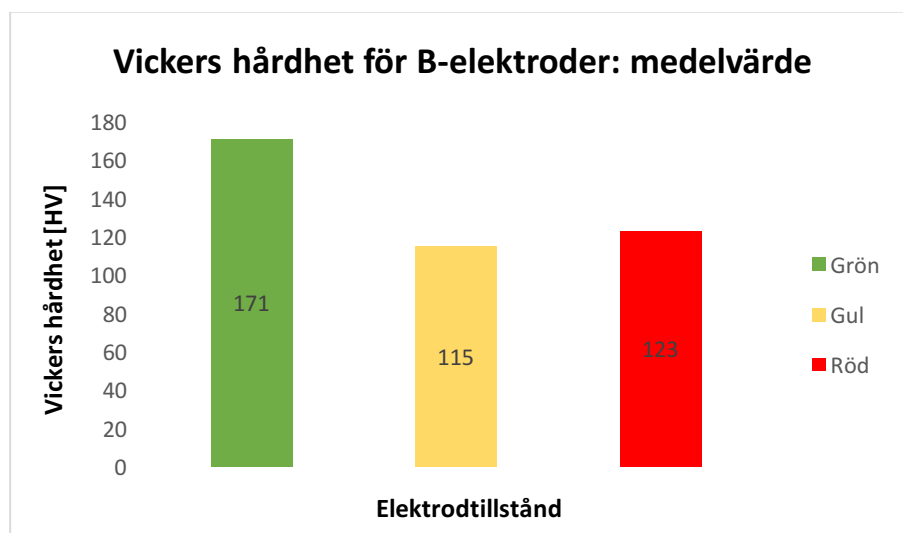
Figur 5.2.1. Graf med hårdhetskurvor för prov 1-3 (B-elektroder).

I ovanstående figur 5.2.1 visas de resultat som erhöles från prov 1-3 för B-elektroder. Grafen visar hårdheten som funktion av intrycket, där intryck 1 är vid toppytans periferi och intryck 5 är närmast toppytans centrum. Se figur 3.4.2. Den gröna kurvan är för B-elektroden som var helt ny, den gula kurvan för B-elektroden som var delvist utsliten och den röda kurvan är för B-elektroden som var helt utsliten. Hårdheten är genomgående högst för B-elektroden som är helt ny (prov 1), där intervallet på hårdheten för de 5 intrycken ligger mellan 163-174 HV.

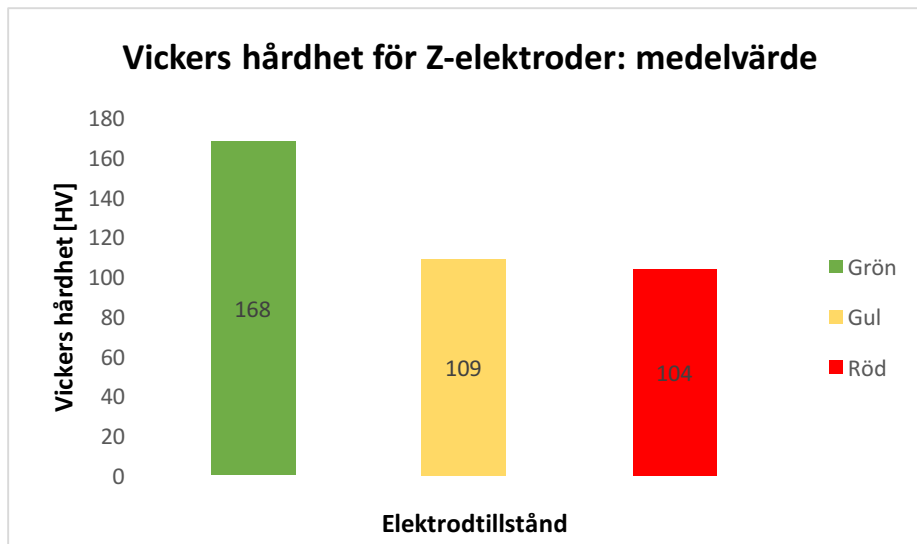


Figur 5.2.2. Graf med hårdhetskurvor för prov 4-6 (Z-elektroder).

Resultaten för Z-elektrodena (prov 4-6) visas i figur 5.2.2. Från dessa grafer kan man se ett snarlikt resultat som i förgående grafer; nämligen att större hårdhetsvärden erhålls för den gröna kurvan än för den gula och röda kurvan. Alltså är hårdheten som störst för Z-elektroden som är helt ny, där intervallet på hårdheten för de 5 intrycken ligger mellan 160-177 HV.



Figur 5.2.3. Stapeldiagram med medelvärden för B-elektrodernas hårdhet (prov 1-3).



Figur 5.2.4. Stapeldiagram med medelvärden för Z-elektrodernas hårdhet (prov 4-6).

Medelvärden för de 5 intrycken hos B- och Z-elektroderna vid de olika tillstånden (grön, gul och röd nivå) visas i *figur 5.2.3* respektive *figur 5.2.4*. Det är ett sammanfattande resultat som presenteras i form av stapeldiagram. Vad som framgår av dessa diagram är att hårdheten för både B- och Z-elektroden är som störst när elektroden är helt ny (grön nivå). Hårdheten sjunker markant (med ungefär 40-60 HV) när elektroden nått gul och röd nivå. Vid direkt jämförelse av medelvärdet av hårdheten för B- och Z-elektroderna kan man se att B-elektroderna har genomgående högre hårdhet vid de tre tillstånden. Skillnaden är dock minimal vid grön nivå, där differensen endast ligger på 3 HV. För gul och röd nivå är differensen lite större med skillnader på 6 HV respektive 19 HV. För att se de ifyllda tabellerna, med fullständig data, som användes för att skapa graferna och stapeldiagrammen som presenterats i detta delavsnitt, se bilaga I.

En möjlig förklaring till varför hårdheten sjunker så pass mycket för de elektroder som har förslitits kan vara för att kopparelektroderna vid svetsning ständigt utsätts för temperaturer ovanför smältpunkten. I och med dessa höga temperaturer blir materialet mjukare och deformationer uppstår lättare. Materialet i elektroden har alltså över tid "förlorat" sina hårdhetsegenskaper på grund av värme-behandlingsprocesserna (se avsnitt 2.4.1).

6. Slutsats och diskussion

6.1 Stickprovsmätning av produktionsparametrar i fabrik

I nedanstående avsnitt används begrepp som röd nivå och gul nivå. Med röd nivå menas då elektroderna byts ut vid röd nivå (då de är helt utslitna) och gul nivå innebär att elektroderna byts ut vid gul nivå (då de är delvist utslitna).

6.1.1 Elektrodförbrukning

En generell slutsats man kan dra utifrån data som presenteras i avsnitt 5.1 om elektrodförbrukningen (antal utförda elektrodbyten per robot) är att den är högre vid gul nivå än vid röd nivå. Detta gäller för både fulltakt och icke-fulltakt. Att utföra elektrodbyten vid röd- respektive gul nivå har olika konsekvenser i form av för- och nackdelar vid de olika produktionstakterna. De siffror som presenteras nedanför är en uppskattning som utfördes baserat på stickprovsmätningen. Fördelningen över alla robotar i fabriken kan vara över- eller underskattade vilket har sin orsak i att stickprovsmätningen utfördes på ett få antal testrobotar. Men det är ändå ett fall som indikerar hur elektrodförbrukningen kan skilja sig åt mellan de olika produktionstakterna och nivåerna (gul och röd).

Fulltakt

Den genomsnittliga elektrodförbrukningen för en robot vid fulltakt (röd nivå) är **2,5** elektrodpar under ett dygn, medan det vid gul nivå är **3** elektrodpar under samma tillstånd och tidsperiod.

Under ett arbetsår över 253 arbetsdagar svarar detta för röd nivå mot 633 elektrodpar eller 1265 elektroder per robot. För 1000 robotar (hela TA) blir det då **1 265 000** förbrukade elektroder per år.

Vid gul nivå blir motsvarande värden under ett helt år att 759 elektrodpar eller 1518 elektroder förbrukas per robot. För 1000 robotar (hela TA) blir det då **1 518 000** förbrukade elektroder per år.

Skillnaden mellan gul och röd nivå vid fulltakt under ett år är **253 000** elektroder, vilket är det antal elektroder man kan spara in under ett år ifall man byter ut elektroderna vid röd nivå istället för gul nivå vid fulltakt, som motsvarar en minskning på **17 %** i elektrodförbrukning.

Det är alltså mer gynnsamt för Volvo Cars att vid fulltakt byta ut elektroderna vid röd nivå, istället för gul nivå, ur elektrodförbrukningsperspektiv. Eftersom att man vid fulltakt har en produktionslina som ständigt är igång, så är det mer fördelaktigt att utföra elektrodbyten vid röd nivå. Detta då strategiska elektrodbyten (se avsnitt 4.1), som används vid icke-fulltakt, inte blir aktuella längre då de inte kan utföras på samma sätt vid fulltakt.

Då produktionslinan vid elektrodbyte (fulltakt) stoppas upp på samma sätt med liknande stopptider vid gul och röd nivå, så kan man lika gärna utnyttja elektroderna mer och byta ut dem vid röd nivå istället för gul nivå. Vid icke-fulltakt var det ju så att man hellre utförde elektrodbytet vid gul nivå istället för röd nivå, då luckor kunde utnyttjas så att produktionsbandet inte behövde stanna upp på samma sätt som vid röd nivå, där stopptiderna blev större.

Icke-fulltakt

Enligt samma beräkningsmetodik är den genomsnittliga elektrodförbrukningen vid icke-fulltakt (röd nivå) **1,75** elektrodpar under ett dygn vilket motsvarar 443 elektrodpar eller 886 elektroder per arbetsår för en robot. För 1000 robotar (hela TA) blir det då **886 000** förbrukade elektroder per år.

För gul nivå är den genomsnittliga elektrodförbrukningen för en robot **2** elektrodpar under ett dygn vilket är lika med 506 elektrodpar eller 1012 elektroder under ett arbetsår. För 1000 robotar (hela TA) motsvaras det av **1 012 000** förbrukade elektroder per år.

Skillnaden vid icke-fulltakt är **126 000** elektroder och är alltså det antal elektroder man kan spara in under ett år ifall man byter ut elektroderna vid röd nivå istället för gul nivå. vilket motsvarar en minskning på **12 %** i elektrodförbrukning.

Teoretiskt är det mer gynnsamt för Volvo Cars att vid icke-fulltakt byta ut elektroderna vid röd nivå, istället för gul nivå, ur elektrodförbrukningsperspektiv. Men nackdelen med att bytet utförs vid röd nivå istället för gul nivå är att det strategiska bytet som utförs av linemekaniker i dagsläget (icke-fulltakt) inte utnyttjas. När röd nivå nås uppstår ett stopp i produktionen.

Med andra ord innebär det att roboten går in i ett serviceläge eftersom att elektrodbyte krävs och just då kan det vara så att produktionslinan är igång, vilket orsakar stopp på grund av elektrodbyte. I dagsläget (gul nivå) planerar linemekanikern in sitt elektrodbyte, och utför detta då det uppstår luckor i produktionen och därmed slipper man långa stopp orsakat av elektrodbyten.

Här gäller det för Volvo Cars att överväga vad som är mest värdefullt: att minimera tappet av karosser orsakat av stopptid på grund av elektrodbyten (byta vid gul nivå) eller att spara in mer elektroder (byta vid röd nivå).

Detta innebär att med förbättringsförslag vid byte kring gul nivå under icke-fulltakproduktion så kan både elektrodförbrukningen minskas samtidigt som man kan minimera produktionsstopp förorsakat av elektrodbyten. Mer om förbättringsförslaget kan man läsa i avsnitt 6.4.

Felkällor

Ovanstående slutsatser har sin grund i stickprovsmätningen som utfördes för att få en så rättvis bild som möjligt över den genomsnittliga elektrodförbrukningen som alla svetsrobotar i karosfabriken hade. Fyra robotar ingick som urvalspopulation i denna mätning och valdes utifrån lämplighet för representation av alla robotar, i enlighet med stickprovsmetoden som användes. En möjlig felkälla är dock att för få robotar undersökts och analyserats. Kanske kan det ha varit så att fler robotar som täcker in fler områden och egenskaper skulle kunna ha behövts för att få ett bättre och mer verkligt resultat. Detta då andelen robotar som undersöktes är en liten del av den totala mängden robotar som finns. Genom att öka antalet robotar som undersöks kan man täcka in spridningen som finns bättre. Trots allt så användes en bra metod (se avsnitt 3.3) under arbetets gång för att täcka in dessa variationer och med vägledning och utnyttjande av linemekanikernas erfarenheter erhöles ett resultat som bör vara någorlunda riktigt med verkligheten.

Ytterligare en felkälla är att elektrobyten vid gul nivå görs av en linemekaniker eller operatör utifrån erfarenhet och uppskattning. Elektrobyten vid gul nivå utförs därför inte vid samma tillfälle varje gång, vilket medför variationer i resultaten. Särskilt kan detta ha en inverkan i och med att olika linemekaniker utför bytena; där vissa byter ut elektroderna tidigare och andra byter ut dem senare. Dessutom kan vår närvaro under elektrobytet ha påverkat linemekanikerns omdöme för när elektrobytet skulle utföras på så sätt att de känt sig benägna att utföra bytet tidigare/senare på grund av yttre övervakning.

Vid beräkningar för alla robotar (1000 stycken, vilket i sig är en uppskattning på det totala antalet robotar i fabriken) så kan det vara värt att nämna att TA är en typisk bilfabrik och att siffrorna kan vara generella för en karosfabrik. Risken med stickprov är att man överskattar eller underskattar verkligheten om man multiplicerar det genomsnittliga resultaten från stickproven med antalet robotar.

Allt detta kan mer eller mindre ha haft en inverkan på resultatet och därmed slutsatserna som drogs. Trots möjliga tänkbara felkällor uppskattades resultatet som trovärdigt då insamlingsmetoderna samt insamlade data från dessa verkade vara logiska enligt linemekaniker och underhållare.

6.1.2 Stopptid orsakat av elektrobyten och formering

Genom att studera avsnitt 5.1 där olika diagram för stopptider visas, kan en första konklusion dras, nämligen att: för både röd- och gul nivå är stopptiden högre vid fulltakt än vid icke-fulltakt. Detta gäller för stopptid på grund av elektrobyten, stopptid på grund av formering samt den totala stopptiden (som är stopptiden pga. elektrobyten+formeringar).

Vid jämförelse av stopptiden pga. elektrobyten vid fulltakt- och icke-fulltakt, på röd nivå, så är skillnaden av medelvärdet för de 4 robotarna **1,14** minuter (69 sekunder) under ett dygn. För gul nivå är motsvarande skillnad **1,5** minuter (90 sekunder). Det är en viss differens på stopptiden även om den är liten. Det maximala värdet för stopptiden hos en robot uppgick till 6,53 minuter under ett dygn.

När man väger ”stopptiderna på grund av formeringar” mot varandra, vid fulltakt- och icke-fulltakt så är tidsskillnaden desto större. Vid användning av elektroder tills röd nivå, så skiljer det **12,85** minuter i stopptid mellan fulltakt- och icke-fulltakt under ett dygn. För gul nivå är motsvarande värde **17,3** minuter. Den totala stopptiden på grund av formeringar under ett dygn är mycket högre än stopptiden på grund av elektrobyten. Den ligger mellan 40-60 minuter per dygn, beroende på om det är fulltakt eller icke-fulltakt. Detta att ställa i relation till stopptiden på grund av elektrobyten under ett dygn som högst var sju minuter.

Vid estimering så drogs slutsatsen att en kaross produceras varannan minut vid fulltakt och vid icke-fulltakt blir produktionsmängden en kaross var tredje minut. Hur mycket den totala stopptiden motsvarar i antalet karosser som skulle kunna ha tillverkats är då:

- Fulltakt, röd nivå (57,8 minuter i total stopptid under ett dygn)
- Fulltakt, gul nivå (58,3 minuter i total stopptid under ett dygn)
- Icke-fulltakt, röd nivå (43,8 minuter i total stopptid under ett dygn)
- Icke-fulltakt, gul nivå (39,5 minuter i total stopptid under ett dygn)

Genom att kolla på ovanstående data kan man se att stopptiden är högre vid fulltakt än vid icke-fulltakt (ungefär 20 minuter mer vid fulltakt). Dessa minuter motsvarar tid då man skulle

kunna ha producerat karosser, men inte gjort det på grund av att linan står stilla (ett hinder). Som helhet ser vi att stopptiden varierar mellan cirka 40-60 minuter beroende på produktionstakt, detta är höga värden och man vill inom produktion minimera dessa stopptider så mycket som möjligt.

Att det vid fulltakt (oavsett gul eller röd nivå) nästan uppstår en hel timme i total stopptid varje dag innebär att man går miste om ett stort antal karosser. Då större delen av den totala stopptiden upptas av formeringarna så visar det på att formeringstiden, som förvisso är nödvändig för att säkerställa kvalitet, också är en rejäl kostnadsslukare.

6.2 Hårdhetsmätningar av B- och Z-elektroder

Den tydligaste slutsatsen som kan dras från hårdhetsmätningarna som utfördes på B- och Z-elektroden är att hårdheten sjunker markant med förslitningen av elektroderna. Detta gäller för både B- och Z-elektroden. Vid grönt tillstånd (då elektroden är helt ny) är alltså hårdheten högre än vid gult och rött tillstånd (då elektroden är delvist utsliten respektive helt utsliten). Detta med ungefär 40-60 HV. En möjlig förklaring till varför hårdheten sjunker så pass mycket kan vara för att kopparelektroden vid svetsning ständigt utsätts för temperaturer ovanför smältpunkten som ligger på cirka 1000 grader Celsius. I och med dessa höga temperaturer blir materialet mjukare och deformationer uppstår lättare. Materialet i elektroden har alltså över tid "förlorat" sina hårdhetsegenskaper på grund av värmebehandlingsprocesserna (se avsnitt 2.4.1).

Jämförelse mellan B- och Z-elektroden visar att B-elektroden har genomgående högre hårdhet vid de tre tillstånden. Skillnaden är dock minimal vid grön nivå, där differensen endast ligger på 3 HV. För gul och röd nivå är differenserna lite större med skillnader på 6 HV respektive 19 HV. Att B-elektroden är hårdare än Z-elektroden stämmer överens med teorin, se tabell 1 (avsnitt 2.2.3).

Enligt teorin och tidiga tester så visade ju Z-elektroden på lovande resultatet när det kommer till svetsningshållbarhet över tid vid jämförelse med B-elektroden. Men vad innebär då dessa resultat och kan någon koppling göras till dessa påståenden? Hårdhetsresultatet i sig säger inte så mycket. Det som kan konstateras är att det i så fall inte är hårdheten som är det som gör Z-elektroden till ett bättre alternativ än B-elektroden, utan att det troligen är andra faktorer som är den bakomliggande anledningen. Exempelvis mikrostrukturen i och med att det är känt att B- och Z-elektroden har olika legeringssammansättningar.

6.4 Förbättringsförslag

Den första preciseringen av frågeställningen hade att göra med dagens mätsystem och vilka tänkbara förändringar som skulle kunna göras för att uppnå bättre effektivitet i produktionen. Den andra handlade om hur man ska undvika problem som kan uppstå när man övergår från icke-fulltakt till fulltakt i produktionen. Några sådana förslag som kan kopplas ihop till preciseringsfrågorna förklaras och diskuteras här mer i detalj.

Övervakningssystemet med skärmarna vid varje robot är en del av dagens mätsystem där elektrodslitningen kan övervakas. Ett sätt att utnyttja elektroderna längre och få ned antal elektrodbyten är att reglera på gränsen för gul nivå, så att den ligger närmare röd nivå. I dagsläget så är gränsen för gul nivå vid 3,5 mm (avverkning i höjddled) för ett stort antal av robotarna på TA och röd nivå ligger på 5 mm. Det är en marginal på 1,5 mm.

När elektrodparet har skiftat från grön till gul nivå så utför linemekanikern antingen elektrodbytet direkt eller så låter han elektrodparet slitas ut lite mer och kommer tillbaka senare för att uträtta elektrodbytet. Att elektrodslitaget maximalt når upp till 4 mm (i vissa fall någon millimeter mer) när elektrodbyten görs vid gul nivå är en slutsats som kunde dras, dels genom observation vid fabriksbesök men även genom samtal och verifiering med linemekaniker på plats.

Vad innebär då detta i praktiken? Om elektrodbytena oftast genomförs i intervallet 3,5-4 mm så medför det att det återstår minst 1 mm av elektrodparet som inte utnyttjas, vilket inte är effektivt ur ett förbrukningsperspektiv. En lösning skulle kunna vara att minska på marginalen mellan gul och röd nivå, exempelvis genom att justera om så att gul nivå istället inträffar vid 4 mm. På så sätt kan man skifta intervallet så att elektrodbyten vid gul nivå istället sker vid 4-4,5 mm och därmed drar man nytta av elektroderna mer. Detta bidrar inte till några risker då man fortfarande håller sig under 5 mm vid byte och det enda man gör är att man ändrar intervallet. Allt annat sker på liknande sätt som tidigare.

Detta förslag har tillämpats på vissa robotar på karosfabriken, där det visar på lovande resultat. Denna förändring har några klara fördelar i dagsläget, vilka är:

- Linemekanikern kan fortfarande utföra strategiska elektrodbyten, vilket bidrar till att stopptid orsakat av elektrodbyten vid röd nivå minimeras.
- Elektrodförbrukningen minimeras, vilket bidrar till användning av färre antal elektroder samtidigt som man utför fler svetspunkter med samma elektrodpar.

En av slutsatserna om elektrodförbrukningen var att ifall man byter ut elektroderna vid röd nivå istället för gul nivå, vid icke-fulltakt, så kunde man spara in 126 000 elektroder under ett år eller minska elektrodförbrukningen med 12 %. Här är det värt att poängtera att det handlar om ett teoretiskt maximalt värde. Förvisso skulle man kunna spara in så många elektroder, men man undviker att köra ned elektroderna till denna nivå, eftersom att det blir för kostsamt. Detta i och med att stopptiderna blir stora då roboten går in i ett serviceläge vid röd nivå som måste avhjälpas innan produktionen kan återupptas.

Formeringarna som utförs frekvent med den utrustning som används (formerare och lasermätare) hör också ihop med mätsystemet som nämns i första preciseringen av frågeställningen. För att få ned den totala stopptiden (tid pga. elektrodbyten+tid pga. formeringar), är det viktigt att försöka hitta sätt att få ned formeringstiden som i princip utgör det mesta av stopptiden (stopptid pga. elektrodbyten liten i relation). Här skulle tänkbara justeringar kunna verkställas som att ändra på formeringsintervallet så att formeringar inte utförs lika ofta för att minska på den totala formeringstiden. Genom att studera produktionslinorna så kunde det konstateras att det vanligtvis var 2 karosser som behandlas av en robot innan en formering genomgicks. Då skulle man istället kunna låta den roboten svetsa en eller två karosser till innan formering. Problemet med det är att svetsresultatet kan bli sämre om man formerar för sällan.

Det handlar hela tiden om ett samspel där man har en avvägning mellan produktionsstopp och kvaliteten på utförda svetsar. I vissa fall kan det bli så att mer fokus läggs på kvaliteten, och för att säkerställa denna med alla möjliga medel, så formerar man väldigt ofta; kanske alldeles för ofta – vilket leder till fler produktionsstopp.

Eventuellt skulle användning i större utsträckning av elektroder med andra legeringar (som Z-elektroder) kunna användas istället för dagens elektroder (B-elektroder). Särskilt om framtida undersökningar stärker det faktum att Z-elektroderna håller bättre långsiktigt, och därmed inte behöver formeras lika ofta som B-elektroderna.

Det skulle vara mer fördelaktigt ifall man kan säkerställa att formeringsresultaten blir bra och robusta, så att mindre återformeringar behöver utföras, som är moment vilka leder till ökad stopptid. Om formeringarna hela tiden kan utföras med god kvalitet kanske det inte heller blir nödvändigt att lika ofta utföra extra kontrollmätningar efter formeringar, vilket leder till att man även här kan spara in tid i slutändan.

Ett problem som uppstod vid formeringsprocessen var ju att spånor lätt samlas i formeraren vilket har inverkan på formeringsresultatet. Bortledning av spånor genom kraftfullare damsugaranordningar, eller genom att ändra position på formeraren (vertikalt) så att spånorna med hjälp av gravitationen ramlar ned på golvet, istället för att samlas i formeraren skulle kunna vara sådana möjliga lösningar. Men då måste dessa detaljer ändras för varje formare i fabriken, vilket gör det till en kostnadsfråga.

Vid övergång till fulltakt blir det svårt att undvika problem, som tidigare kanske inte var ett bekymmer vid icke-fulltakt. Detta i och med att både elektroförbrukningen och stopptiderna blir högre vid fulltakt till följd av fler producerade bilar. Därför är ovanstående förslag och resonemang viktiga att ta ställning till, särskilt om man redan nu vet att dessa problem kommer att uppstå i framtiden.

7. Förslag till vidare arbete

Exempel på vad som kan göras på områdesfältet för att utvidga arbetet är bland annat:

- Göra stickprovsmätningar med fler antal robotar för mer noggrant resultat. Som tidigare nämnt så är en möjlig felkälla att för få robotar undersökts och analyserats. Det är väldigt tidskrävande att samla in den information som krävs, då man får avvakta långa tidsperioder (flera timmar) innan ett elektrodbyte utförs för en robot. Om fler robotar som täcker in fler områden och egenskaper tas med i undersökningarna så kan det leda till ännu bättre och mer verkliga resultat.
- Undersöka vad som krävs för att införa ett helt automatiserat punktsvetsnings-system hos VCC, som skrevs om i avsnitt 2.6, där det automatiserade systemet ”Smartdress” togs upp. Fördelen att elektrodbytena genomförs automatiskt och därmed elimineras momentet då en operatör är tvungen att gå in och göra det. Samtidigt är systemet dynamiskt och adaptivt vid bedömning av formeringsintervall och enbart den elektrod i elektrodparet som är utslitet byts ut, inte hela elektrodparet. Analys behövs dock på vad kostnaderna skulle bli för att implementera ett sådant system.
- Verkställa fler tester av Z-elektrodernas långlivsbeteende i produktion för att komma fram till om de är ett bättre alternativ än de elektroder som används i störst utsträckning idag (B-elektroderna).
- Utredda andra tänkbara förbättringsmått och deras inverkan på produktionen, enligt avsnitt 4.2, vilket kan täcka in flera års studier och arbete.

Referenser

- [1] Karim Chawqui (Produktionsledare, Volvo Cars Torslanda, TA) intervjuad den 28 juni 2016.
- [2] Andersson, O (2013) *Process planning of resistance spot welding*, Upplaga 6. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- [3] Rutqvist, A. (2005) *An investigation of electrode degradation mechanisms to improve the electrode usage when spot welding*, Goteborg: Chalmers tekniska högskola. (Examensarbete inom Institutionen för material och tillverkningsteknik).
- [4] Zhang, H. och Senkara, J. (2006) *Resistance welding: fundamentals and applications*, Boca Raton, Fla: CRC Press.
- [5] E. W. Kim och T. W. Eagar (1988) *Parametric Analysis of Resistance Spot Welding Lobe Curve*. Detroit, Michigan, USA: SAE International Congress and Exposition.
- [6] 2001, Spot Weldability *Quality and Performance*, PowerPoint presentation, Gateway Coalition. www.gatewaycoalition.org (2016-07-23).
- [7] Kopparelektroder, Senor Metals. www.directindustry.com (2016-06-10).
- [8] Edstraco AB, *Elektrodmaterial av kopparlegeringar för motståndssvetsning*. Tumba, Sverige.
- [9] Technical Committee ISO/TC 44, *Welding – Materials for resistance welding electrodes and ancillary equipment. ISO 5182:1978*.
- [10] ALB-group (2009) <http://www.alb-copperalloys.com> (2016-06-23)
- [11] Luvata (2016) <http://www.luvata.com/sv/About-Luvata/Sweden/Produkt-kategorier/Specialprodukter/Svetsning/> (2016-06-01)
- [12] Andersson, O (2016) *Electrode evaluation – student thesis proposal*, opublicerad PowerPoint presentation, Volvo Cars.
- [13] KTH (2004) *Fasomvandlingar och rekristallisation*, föreläsningsmaterial från: http://www.met.kth.se/utbildning/4H1063_2004/kommlect-10.pdf (2016-06-10)
- [14] G.E. Schmidt, Inc. (2013) *Issue: Expulsion (Burn-Through)*, <http://www.geschmidt.com/weld-help-issue-expulsion-burn-through/> (2016-06-20)
- [15] L. George, Michael., Rowlands, David., Price, Mark., Maxey, John. (2005) *Lean six sigma pocket toolbox*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-144119-0.
- [16] Von Regius, Bernd. (2006) *Qualität in der Produktenwicklung – Vom Kundenwunsch bis zum Fehlerfreien Produkt*, Hanser Verlag, Munchen, Germany. ISBN 3-446-22109-3.
- [17] Mani Charde, N. (2014) *Effects of electrode deformation of resistance spot welding on 304 austenitic stainless steel weld geometry*, Kuala Lumpur: University of Malaya.
- [18] Smartdress (2016) <http://www.smartdress-project.eu>. (2016-06-23)

Bilagor

Bilaga A - Kvalitativa intervjufrågor (VOC)

1. Upplever ni det som ett problem att elektroder behöver bytas ut ofta? Leder detta till att ni behöver köpa in stora mängder elektroder?
2. Upplever ni att processen för att byta ut elektroder är krävande/jobbig att utföra ofta?
3. Upplever ni bytestiden som ett problem för produktionen?
4. Hur skulle den tid som läggs på elektrodbyten kunna utnyttjas istället?
5. Vad för konsekvenser medför elektrodbyten för produktionen? Blir den lidande på något sätt?
6. Händer det att robotarna krånglar vid elektrodbyten och vad behöver göras då?
7. Upplever ni att det är problematiskt att elektroderna formeras efter varje robotcykel, dvs. uppstår det problem vid formering av elektroder?
8. Vilka brister eller problem ser ni i systemet som finns i dagsläget?
9. Känner ni att det finns ett behov av ett effektivare system i dagsläget? Vad tycker ni behöver förbättras för att få ett optimalt system?

Bilaga B - Kvantitativa intervjufrågor

1. Vilket företag tillverkar och levererar elektroderna till Volvo?
2. Hur stor är livslängden för en elektrod?
3. Vilket material består dagens elektroder utav?
4. Hur stor är förslitningen/geometriförändringen på elektroderna vid formering? Finns det någon skillnad mellan de olika formerarna?
5. Hur stor är ström- och spänningsstyrkan vid svetsning?
6. Hur stora krafter och vilket tryck uppstår vid svetsning?
7. Hur stor är spåntjockleken vid svetsning?
8. Finns det särskilda ytjämnhetskrav vid svetsning?
9. Hur höga temperaturer kan uppstå vid svetsning?
10. Vilket kylmedium och vilken grad av kylning (avsvälningstid) används vid svetsning?
11. Hur lång tid tar det att formera en elektrod?
12. Hur lång tid tar det att byta ett elektrodpar?
13. Vilket material består plåtarna som svetsas av?
14. Vad för krav finns det på den färdiga plåten efter svetsning (svetskvalitet)?

Bilaga C - Instruktioner för hårdhetsmätning

INSTRUKTION FÖR HÄRDEHETS MÄTNING (Lab 3, M2)

1. Stoderna ska vidstå bilden av hårdhetsmätaren.
2. Tag bort i sken. Använda det härskade eller det normaliserade.
3. Sätt provet på provbordet. Sätt på lampen (sladd och knapp bakom apparaten).
4. Fokusera provet (titta på skärmen) och rätten. Se upp så att Du inte kör in provet i objektivilinen.
5. Sätt provet nu så, att om Du skruvar på mikrometerskruven så går Du från periferin och in mot centrum.
6. Skruva på mikrometerskruven så att provkanten är mitt i bilden. Detta är $x = 0$.
7. Lågg på rätt last och knapparna på höger sida. Normalisrat 5 kp, hårdhet 10 kp.
8. Steg nu in 0.2 mm (dessa motsvarar 20 skaldelar på mikrometerskruven). Här gör Du ditt första hårdhetsintryck genom att föra spaken åt höger och sedan alltså. När spaken har kommit i ändläget vänta i 5 sek. (räkna till 5) innan Du sedan för den tillbaka till ursprungsläget. Var försiktig när Du drar tillbaka spaken så att inte provet rubbas ut läge. Anledningen till att man måste gå in en bit från kanten innan det första intrycket görs är, att provet annars kan tipa.
9. Avläs diagonalens längd på hårdhetsintrycket. Tag medelvärde på de två diagonalerna med tre siffrors noggrannhet. Hårdheten får Du sedan genom att gå in i tabell (finns i plastficka någonstans vid apparaten). OBS! Se till att Du väljer rätt tabell. Detta beror på vilken last Du har valt.
10. Steg nu in mot centrum med 0.2 mm:s mellanrum. För att hårdhetsintrycken inte skall påverka varandra måste Du dessutom stega fram och tillbaka i sidled så som vidstående figur visar.
11. Aveluta när Du 3 gånger i rad har erhållit samma hårdhetsvärde. Du kan också kontrollera att Du har nått ned till materialets bulkvärde genom att jämföra hårdheten med ett värde erhållit i centrum av provet.

Hårdhetsmätare

På denna skärn får Du upp en förstorad bild av hårdhetsintrycket.

Med denna linjal mäter Du diagonalen på hårdhetsintrycket.

Spets med diamant för hårdhetsintrycket.

Objektiv

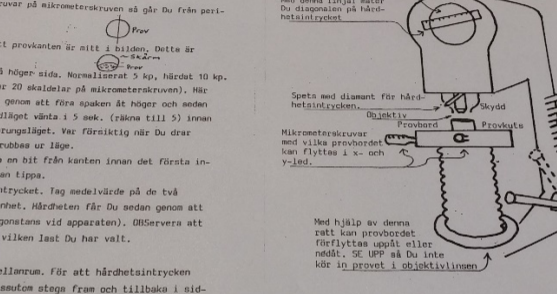
Provskiva

Mikrometerskruven med vilken provbordet kan flyttas i x- och y-led.

Den last som skall läggas på diamanten leddas genom att tryckas in någon av dessa knappar.

Genom att föra denna spak åt vänster kommer Du att skifta objektivet mot spetsen, och diamanten kommer att göra ett intryck i provet. Spaken vänder sakt och stannar så av sig själv och stannar så i ändläget. FÖR sedan tillbaka spaken till ursprungsläget. FÖRSTÄLLT så att inte provet rubbas.

Med hjälp av denna ratt kan provbordet flyttas uppåt eller nedåt. SE UPP så Du inte kör in provet i objektivilinen.



0.1 mm

Bilaga D - Omvandlingstabell för Vickers HV20

Vickers HV 20										
										F = 196,1 N ≈ 20 kp
Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,13	2194	2160	2128	2096	2066	2036	2006	1976	1948	1920
0,14	1892	1866	1840	1814	1788	1764	1740	1716	1694	1670
0,15	1649	1627	1605	1584	1564	1544	1524	1505	1486	1467
0,16	1449	1431	1413	1396	1379	1362	1346	1330	1314	1299
0,17	1283	1268	1254	1239	1225	1211	1197	1184	1171	1158
0,18	1145	1132	1120	1107	1095	1084	1072	1061	1049	1038
0,19	1027	1017	1006	996	985	975	965	956	946	937
0,20	927	918	909	900	891	883	874	866	857	849
0,21	841	833	825	818	810	802	795	788	780	773
0,22	766	759	753	746	739	733	726	720	713	707
0,23	701	695	689	683	677	672	666	660	655	649
0,24	644	639	633	628	623	618	613	608	603	598
0,25	593	588	584	579	575	571	566	562	557	553
0,26	549	544	540	536	532	528	524	520	516	513
0,27	509	505	502	498	494	490	487	483	480	476
0,28	473	470	466	463	460	457	453	450	447	444
0,29	441	438	435	432	429	426	423	420	418	415
0,30	412	409	407	404	401	399	396	394	391	388
0,31	386	383	381	379	376	374	371	369	367	365
0,32	362	360	358	356	353	351	349	347	345	343
0,33	341	339	337	335	333	331	329	327	325	323
0,34	321	319	317	315	313	312	310	308	306	305
0,35	303	301	300	298	296	294	293	291	289	288
0,36	286	285	284	282	280	278	277	275	274	273
0,37	271	269	268	267	265	264	262	261	260	258
0,38	257	256	254	253	252	250	249	248	246	245
0,39	244	243	241	240	239	238	237	235	234	233
0,40	232	231	230	228	227	226	225	224	223	222
0,41	221	220	218	217	216	215	214	213	212	211
0,42	210	209	208	207	206	205	204	203	203	202
0,43	201	200	199	198	197	196	195	194	193	192
0,44	191	191	190	189	188	187	187	186	185	184
0,45	183	182	182	181	180	179	178	178	177	176
0,46	175	175	174	173	172	172	171	170	169	169
0,47	168	167	166	166	165	164	164	163	162	162
0,48	161	160	160	159	158	158	157	156	156	155
0,49	155	154	153	153	152	151	151	150	150	149
0,50	148	148	147	147	146	145	145	144	143	143
0,51	143	142	142	141	140	140	139	139	138	138
0,52	137	137	136	136	135	135	134	134	133	133
0,53	132	132	131	131	130	130	129	129	128	128
0,54	127	127	126	126	125	125	124	124	124	123
0,55	123	122	122	122	121	120	120	120	119	119
0,56	118	118	117	117	117	116	116	115	115	115
0,57	114	114	113	113	113	112	112	111	111	111
0,58	110	110	110	109	109	108	108	108	107	107
0,59	107	106	106	106	105	105	104	104	104	103
0,60	103	103	102	102	102	101	101	101	100	100
0,61	100	99,3	99,0	98,7	98,4	98,0	97,7	97,4	97,1	96,8
0,62	96,5	96,2	95,9	95,6	95,3	94,9	94,6	94,3	94,0	93,7
0,63	93,4	93,2	92,9	92,6	92,3	92,0	91,7	91,4	91,1	90,8
0,64	90,6	90,3	90,0	89,7	89,4	89,2	88,9	88,6	88,3	88,1
0,65	87,8	87,5	87,2	87,0	86,7	86,5	86,2	85,9	85,7	85,4
0,66	85,1	84,9	84,6	84,4	84,1	83,9	83,6	83,4	83,1	82,9
0,67	82,6	82,4	82,1	81,9	81,6	81,4	81,2	80,9	80,7	80,4
0,68	80,2	80,0	79,8	79,5	79,3	79,0	78,8	78,6	78,4	78,1
0,69	77,9	77,7	77,5	77,2	77,0	76,8	76,6	76,3	76,1	75,9
0,70	75,7	75,5	75,3	75,0	74,8	74,6	74,4	74,2	74,0	73,8
0,71	73,6	73,4	73,2	73,0	72,8	72,5	72,3	72,1	71,9	71,7
0,72	71,5	71,3	71,2	71,0	70,8	70,6	70,4	70,2	70,0	69,8
0,73	69,6	69,4	69,2	69,0	68,8	68,7	68,5	68,3	68,1	67,9
0,74	67,7	67,5	67,4	67,2	67,0	66,8	66,6	66,5	66,3	66,1
0,75	65,9	65,8	65,6	65,4	65,2	65,1	64,9	64,7	64,6	64,4
0,76	64,2	64,0	63,9	63,7	63,5	63,4	63,2	63,0	62,9	62,7
0,77	62,6	62,4	62,2	62,0	61,9	61,8	61,6	61,4	61,3	61,1
0,78	61,0	60,8	60,7	60,5	60,3	60,2	60,0	59,9	59,7	59,6
0,79	59,4	59,3	59,1	59,0	58,8	58,7	58,5	58,4	58,2	58,1

HV 20



Bilaga E – Stickprovsmätning vid fulltakt (röd nivå)

	Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4
STICKPROVSMÄTNING FULLTAKT				
Punkter innan formering	50/51	48/52	41/57	47/48
Antal formeringar innan elektrodbyte (Röd nivå)	153	168	83	98
Totalt antal punkter innan elektrodbyte	7803	8400	3859	4704
Antal karosser per A-skift	240	240	240	240
Antal karosser per B-skift	233	233	233	233
Antal karosser per C-skift	163	163	163	163
Punkter per kaross	26	25	25	24
Totalt antal punkter för A-skift	6240	6000	6000	5760
Totalt antal punkter för B-skift	6058	5825	5825	5592
Totalt antal punkter för C-skift	4238	4075	4075	3912
Summa antal punkter (A+B+C-skift)	16536	15900	15900	15264
Antal elektrodbyten för A skift	0 (1.25)	0 (1.4)	1 (0.64)	1 (0.82)
Antal elektrodbyten för A+B-skift	1 (0.63)	1 (0.71)	3 (0.32)	2 (0.41)
Antal elektrodbyten för A+B+C-skift	2 (0.47)	1 (0.53)	4 (0.24)	3 (0.31)
Antal elektrodbyten under ett dygn (A+B+C-SKIFT)	2	1	4	3
Bytestid för elektrod	30s	32s	38s	33s
Total bytestid per dygn (A+B+C-skift)	60s	32s	152s	99s
Formeringstid utan mätning	6s	8s	7s	7s
Total formeringstid utan mätning per dygn (A+B+C-skift)	982s	1272s	1136s	1125s
Formeringstid med mätning	16s	11s	12s	13s
Total formeringstid med mätning per dygn (A+B+C-skift)	2620s	1749s	1947s	2089s
Antal karosser som passerar för varje cykel	2	2	2	2
Antal karosser som passerar innan varje formering	2	2	2	2
Formeringstid med mätning efter byte	56s	55s	60s	56s
Formeringstid med mätning efter byte per dygn (A+B+C-skift)	112s	55s	240s	168s
Total stopptid per dygn (A+B+C-skift)	3774s (63 min)	3108s (52 min)	3475s (58min)	3481s (58 min)

Bilaga F – Stickprovsmätning vid icke-fulltakt (röd nivå)

STICKPROVSMÄTNING EJ FULLTAKT	Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4
Punkter innan formering	50/51	48/52	41/57	47/48
Antal formeringar innan elektrodbyte (Röd nivå)	153	168	83	98
Totalt antal punkter innan elektrodbyte	7803	8400	3859	4704
Antal karosser per A-skift	154	154	154	154
Antal karosser per B-skift	173	173	173	173
Antal karosser per C-skift	157	157	157	157
Punkter per kaross	26	25	25	24
Totalt antal punkter för A-skift	4004	3850	3850	3696
Totalt antal punkter för B-skift	4498	4325	4325	4152
Totalt antal punkter för C-skift	4082	3925	3925	3768
Summa antal punkter (A+B+C-skift)	12584	12100	12100	11616
Antal elektrodbyten för A-skift	0 (1.95)	0 (2.18)	1 (1.00)	0 (1.27)
Antal elektrodbyten för A+B-skift	1 (0.92)	0 (1.03)	2 (0.47)	1 (0.60)
Antal elektrodbyten för A+B+C-skift	1 (0.62)	1 (0.69)	3 (0.32)	2 (0.40)
Antal elektrodbyten under ett dygn (A+B+C-skift)	1	1	3	2
Bytestid för elektrod	30s	32s	38s	33s
Total bytestid per dygn (A+B+C-skift)	30s	32s	114s	66s
Formeringstid utan mätning	6s	8s	7s	7s
Total formeringstid utan mätning per dygn (A+B+C-skift)	748s	968s	864s	856s
Formeringstid med mätning	16s	11s	12s	13s
Total formeringstid med mätning per dygn (A+B+C-skift)	1994s	1331s	1482s	1590s
Antal karosser som passerar för varje cykel	2	2	2	2
Antal karosser som passerar innan varje formering	2	2	2	2
Formeringstid med mätning efter byte	56s	55s	60s	56s
Formeringstid med mätning efter byte per dygn (A+B+C-skift)	56s	55s	180s	112s
Total stopptid per dygn (A+B+C-skift)	2828s (47min)	2386s (40 min)	2640s (44min)	2624s (44min)

Bilaga G – Stickprovsmätning vid fulltakt (gul nivå)

STICKPROVSMÄTNING FULLTAKT	Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4
Punkter innan formering	50-51	48-52	41-57	47-48
Antal formeringar innan elektrodbyte (Gul nivå)	124	128	72	73
Totalt antal punkter innan elektrodbyte	6324	6400	3528	3504
Antal karosser per A-skift	240	240	240	240
Antal karosser per B-skift	233	233	233	233
Antal karosser per C-skift	163	163	163	163
Punkter per kaross	26	25	25	24
Totalt antal punkter för A-skift	6240	6000	6000	5760
Totalt antal punkter för B-skift	6058	5825	5825	5592
Totalt antal punkter för C-skift	4238	4075	4075	3912
Summa antal punkter (A+B+C-skift)	16536	15900	15900	15264
Antal elektrodbyten för A skift	1 (1.0)	1 (1.1)	1 (0.59)	1 (0.61)
Antal elektrodbyten för A+B-skift	2 (0.51)	1 (0.54)	3 (0.29)	3 (0.31)
Antal elektrodbyten för A+B+C-skift	2 (0.38)	2 (0.40)	4 (0.22)	4 (0.23)
Antal elektroder under ett dygn (A+B+C-SKIFT)	2	2	4	4
Bytestid för elektrod	30s	32s	38s	33s
Total bytestid per skift	60s	64s	152s	132s
Formeringstid utan mätning	6s	8s	7s	7s
Total formeringstid utan mätning per skift	982s	1272s	1136s	1125s
Formeringstid med mätning	16s	11s	12s	13s
Total formeringstid med mätning per skift	2619	1749s	1947s	2089s
Antal karosser som passerar för varje cykel	2	2	2	2
Antal karosser som passerar för formering	2	2	2	2
Formeringstid med mätning efter byte	56s	55s	60s	56s
Formeringstid med mätning efter byte per dygn (A+B+C-skift)	112s	110s	240s	224s
Totalt (Per skift)	3773s (63 min)	3195s (53 min)	3475s (58 min)	3570s (59 min)

Bilaga H – Stickprovsmätning vid icke-fulltakt (gul nivå)

STICKPROVSMÄTNING EJ FULLTAKT	Robot 1	Robot 2	Robot 3	Robot 4
Punkter innan formering	50-51	48-52	41-57	47-48
Antal formeringar innan elektrodbyte (Gul nivå)	124	128	72	73
Totalt antal punkter innan elektrodbyte	6324	6400	3528	3504
Antal karosser per A-skift	154	154	154	154
Antal karosser per B-skift	171	171	171	171
Antal karosser per C-skift	106	106	106	106
Punkter per kaross	26	25	25	24
Totalt antal punkter för A-skift	4004	3850	3850	3696
Totalt antal punkter för B-skift	4446	4275	4275	4104
Totalt antal punkter för C-skift	2756	2650	2650	2544
Summa antal punkter (A+B+C-skift)	11206	10775	10775	10344
Antal elektrodbyten för A skift	0(1.58)	0(1.66)	1(0.92)	1(0.95)
Antal elektrodbyten för A+B-skift	1(0.75)	1(0.79)	2(0.43)	2(0.45)
Antal elektrodbyten för A+B+C-skift	1(0.56)	1(0.59)	3(0.33)	3(0.33)
Antal elektroder under ett dygn (A+B+C-SKIFT)	1	1	3	3
Bytestid för elektrod	30s	32s	38s	33s
Total bytestid per dygn (A+B+C-skift)	30s	32s	114s	99s
Formeringstid utan mätning	6s	8s	7s	7s
Total formeringstid utan mätning per skift	666s	862s	770s	762s
Formeringstid med mätning	16s	11s	12s	13s
Total formeringstid med mätning per skift	1775s	1185s	1319s	1415s
Antal karosser som passerar för varje cykel	2	2	2	2
Antal karosser som passerar för formering	2	2	2	2
Formeringstid med mätning efter byte	56s	55s	60s	56s
Formeringstid med mätning efter byte per dygn (A+B+C-skift)	56s	55s	180s	168s
Totalt (Per skift)	2521s (42min)	2128s (35min)	2383s (40min)	2444s (41min)

Bilaga I – data för hårdhetsmätningar

PROV 4, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	Z-elektrod	grön	0,49	0,475	155	164	160
test 2	Z-elektrod	grön	0,48	0,475	161	164	163
test 3	Z-elektrod	grön	0,465	0,475	172	164	168
test 4	Z-elektrod	grön	0,47	0,465	168	172	170
test 5	Z-elektrod	grön	0,46	0,455	175	179	177
							medelvärde av test 1-5: 168
PROV 5, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	Z-elektrod	gul	0,57	0,555	114	120	117
test 2	Z-elektrod	gul	0,6	0,595	103	105	104
test 3	Z-elektrod	gul	0,585	0,64	108	91	99
test 4	Z-elektrod	gul	0,52	0,53	137	132	135
test 5	Z-elektrod	gul	0,625	0,65	95	88	91
							medelvärde av test 1-5: 109
PROV 6, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	Z-elektrod	röd	0,6	0,59	103	107	105
test 2	Z-elektrod	röd	0,6	0,615	103	98	101
test 3	Z-elektrod	röd	0,625	0,585	95	108	102
test 4	Z-elektrod	röd	0,6	0,6	103	103	103
test 5	Z-elektrod	röd	0,6	0,575	103	112	108
							medelvärde av test 1-5: 104
PROV 1, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	B-elektrod	grön	0,47	0,46	168	175	172
test 2	B-elektrod	grön	0,465	0,455	172	179	176
test 3	B-elektrod	grön	0,465	0,46	172	175	174
test 4	B-elektrod	grön	0,475	0,46	164	175	170
test 5	B-elektrod	grön	0,47	0,485	168	158	163
							medelvärde av test 1-5: 171
PROV 2, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	B-elektrod	gul	0,56	0,5	118	148	133
test 2	B-elektrod	gul	0,545	0,555	125	120	123
test 3	B-elektrod	gul	0,56	0,605	118	101	110
test 4	B-elektrod	gul	0,58	0,605	110	101	106
test 5	B-elektrod	gul	0,605	0,585	101	108	105
							medelvärde av test 1-5: 115
PROV 3, HV20	elektrotyp	tillstånd	horisontell diagonal [mm]	vertikal diagonal [mm]	HV (horisontell diagonal)	HV (vertikal diagonal)	medelvärde av HV horisontell och vertikal
test 1	B-elektrod	röd	0,5	0,495	148	151	150
test 2	B-elektrod	röd	0,52	0,585	137	108	123
test 3	B-elektrod	röd	0,57	0,575	114	112	113
test 4	B-elektrod	röd	0,555	0,555	120	120	120
test 5	B-elektrod	röd	0,6	0,57	103	114	109
							medelvärde av test 1-5: 123

