

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Triboconditioning CG – lågfriktionsbehandling av kugg</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska	
Universitet/högskola/företag <b>Applied Nano Surfaces Sweden AB</b>	Avdelning/institution
Adress <b>Knivstagatan 12, 753 23 Uppsala, Sverige</b>	
Namn på projektledare <b>Linus Everlid</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>China-Euro Vehicle Technology AB (CEVT), Luleå Tekniska Universitet (LTU)</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Kugg Transmission Tribologi Lågfriktion Ytbehandling Elektrifiering EV</b>	

## Förord

Projektet finansierades av Energimyndigheten, inom ramen för programmet Fordonsstrategisk forskning och innovation (FFI), med medfinansiering av både ANS och CEVT enligt de i anslaget angivna ramarna.

Följande personer har bidragit till ett lyckat projekt:

Från ANS: Linus Everlid, Christian Kolar, Jonas Lundmark, Chao Xia, Boris Zhmud, Lena Killander.

Från CEVT: Omar Sily, Johan Hellsing.

Från LTU: Mushfiq Hasan, Marcus Björling, Roland Larsson.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	2
Summary .....	2
Bakgrund.....	3
Genomförande .....	4
Resultat .....	6
Diskussion.....	12

## Sammanfattning

Projektet har visat hur Triboconditioning CG, en mekanokemisk ytbehandlingsmetod utvecklad av ANS, kan bidra till att övervinna de utmaningar som finns för nästa generations elektriska drivlinor. I denna genomförbarhetsstudie har teknikens fördelar i glidande/rullande kontakt demonstrerats genom riggtestning. Två versioner av ytbehandlingen togs fram, varav den ena i princip eliminerade micropitting och sänkte nötningen med över 80% i jämförelse med slipade ytor i stål-stål-kontakt. Resultaten indikerar att Triboconditioning CG har god potential att höja energieffektiviteten i elektriska drivlinor, tack vare lägre friktionsförluster och förutsättningar för såväl ökad räckvidd som ökad livslängd för kuggkomponenter.

## Summary

This project has shown how Triboconditioning CG, a mechanochemical surface treatment developed by ANS, can contribute to overcoming the challenges faced by the next generation of EV transmissions. In this feasibility study, the advantages in sliding/rolling contact were demonstrated with rig testing, where two versions of the surface treatment were evaluated. One of the versions almost eliminated micro pitting and the wear was reduced with more than 80% compared to ground surfaces in steel-steel contact. The results indicate that Triboconditioning CG has the potential for increasing energy efficiency in EV transmissions, by reducing friction losses and taking steps toward increase mileage and increased lifetime for gears.

## Bakgrund

Omställningen mot fossilfritt medför stora utmaningar inom transportsektorn. Förutom kravet på hög energieffektivitet hos energibäraren krävs också effektiv kraftöverföring. Idag utgör friktionsförluster en betydande del av de totala förlusterna för elfordon och minimering av förluster i drivlinan är därför viktigt för att möjliggöra maximal räckvidd.

Ett sätt att minimera friktionsförluster är att gå över till växellådsoljor med lägre viskositet. Lägre viskositet medför dock sämre smörjfilmsuppbyggnad och därmed en högre nötningstakt för de ingående komponenterna.

Trenden i växellådsutvecklingen för elfordon går mot växellådor med allt högre varvtal. Högre varvtal innebär högre belastning på komponentytor och även detta ger sämre smörjningsförhållanden. Dessutom förväntas generellt en längre livslängd för elektriska drivlinor, jämfört med konventionella fordon. Det är därför väldigt viktigt att minimera risken för nötning och skador som uppstår på grund av utmattningsbelastning.

Allt detta ökar behovet av ytbehandlingstekniker som kan bidra till att motverka nötning och därmed öka komponenternas livslängd. Målet med detta projekt är att utveckla nästa generations ytbehandlingsmetod för kugg, med fokus specifikt på kugg för elektriska drivlinor.

Applied Nano Surfaces (ANS) har utvecklat en patenterad mekanokemisk ytbehandlingsmetod, kallad Triboconditioning, vars huvudsakliga syfte är att sänka friktion och nötning i smord kontakt. Under behandlingen förändras komponentens ytprofil samtidigt som en lågfriktionsfilm bildas på ytan. Resultatet är en slät yta med hög lastbärande förmåga och en lågfriktionskemi integrerad i komponentens yttersta skikt. Triboconditioning utförs med standardmaskiner, såsom CNC-svarvar och fräsar, och lämpar sig väl för komponenter med cylindrisk geometri (utvändig behandling av axlar och invändig behandling av ihåliga cylindrar).

ANS har sedan 2018 arbetat med utvecklingen av en uppdaterad maskinprocess för att möjliggöra behandling av andra typer av geometrier, bland annat kugg. Under 2019 gjordes de första prototypbehandlingarna av kuggdetaljer och sedan dess har processen fortsatt utvecklas. Den nya metoden har fått namnet Triboconditioning CG (TCG) och utöver fördelarna med traditionell Triboconditioning genererar TCG även ökade tryckspänningar i ytan, vilket är fördelaktigt i syfte att motverka både micropitting och nötning. Dessutom har det påvisats att TCG-behandlingen bidrar till minskade akustiska emissioner, vilket även det ses som en stor fördel för just elfordon, eftersom missljud från transmissionen får ett större genomslag i elfordon än i fordon med förbränningsmotor.

Denna genomförbarhetsstudie är ett samarbete mellan ANS och CEVT, som arbetar med utvecklingen av nästa generations elektrifierade drivlinor. Samarbetet möjliggör därför vidare utveckling av processen, med fokus på prestandabehov för framtidens drivlinor för elfordon. Luleå Tekniska Universitet (LTU) är en del

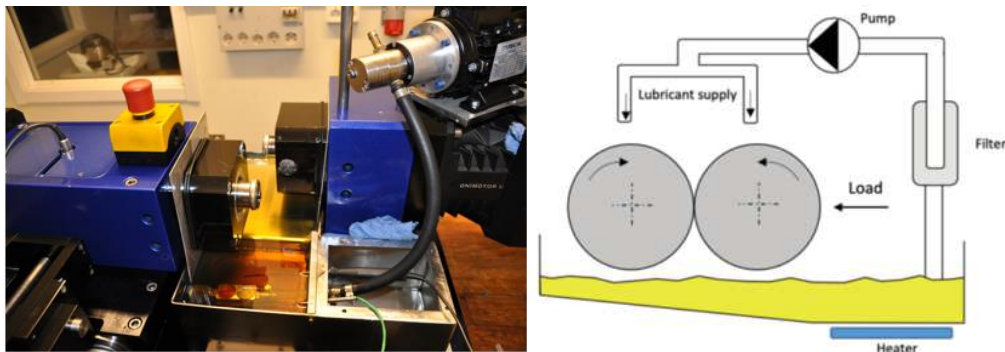
av projektet som konsult och ansvarar för riggtestning. Utifrån riggtestningen finns möjligheten att generera data för modellsimulering för att förutse hur t.ex. verkningsgraden kan påverkas som följd av ytbehandlingen. Detta kan sedan ligga till grund för fullskalig transmissionstestning.

Projektet finansierades av Energimyndigheten, inom ramen för programmet Fordonsstrategisk forskning och innovation (FFI) med medfinansiering av både ANS och CEVT. Projektet pågick från oktober 2020 till maj 2021.

## Genomförande

Projektet inleddes med grundutveckling av ytbehandlingsprocessen, i syfte att hitta lämpliga kombinationer av processvätska, verktyg och processparametrar för behandling av komponenter till riggtestning. En matris med olika verktygs-material och -geometrier samt varierade processparametrar användes för behandling av provstavar. Dessa analyserades med avseende på genererad ytfinhet och -profil. Som komplement gjordes även nötningstester i en testrigg i ANS tribolab. Två lovande processvarianter valdes sedan ut för behandling av discar till riggtestningen. I testriggen, som är av typen twin-disc, går två discar mot varandra, varav den ena ringen har krökt och den andra platt ytterdiameter. Totalt behandlades fyra par discar, tre par med version 1 och ett par med version 2 av ytbehandlingen.

Riggtestningen utfördes under ett examensarbete på Masternivå, på avdelningen för Maskinelement vid LTU. I testriggen, fig. 1, kan kontakten mellan discarna varieras från ren glidning till ren rullning. Materialspecifikation för provkomponenter och smörjvätska som använts under projektet presenteras i tab. 1. Testningen var uppdelad i tre faser, tab. 2. I den första fasen utvärderades olika förhållanden mellan glidning och rullning (slide-to-roll-ratio, SRR). I övrigt valdes testvillkoren för att efterlikna de förutsättningar som förväntas gälla för kugg i kommande elektriska drivlinor. I den andra fasen jämfördes discar slipade till olika ytfinheter och i den tredje fasen utvärderades effekten av ANS ytbehandling. I samtliga faser utvärderades nötningsvolym och andel mikrosprickor i ytan (micropitting), med hjälp av SEM och topografiavbildning med optisk interferometri.



Figur 1. Twin-disc-riggen hos LTU (vänster) och en schematisk bild över provningsprincipen (höger).

Tabell 1. Specifikation av provmaterial och smörjmedel.

Specimen		Lubricant	
Diameter	52 mm	Kinematic viscosity @100°C	6,2 mm <sup>2</sup> /s
Thickness	10 mm	Kinematic viscosity @40°C	27,8 mm <sup>2</sup> /s
Material	100Cr6	Test temperature	80°C
Lay direction	Transverse		

Tabell 2. Testmatris för twin-disc testningen.

Fas	Test	SRR	Krökt disc		Platt disc	
			Slipning	Ytbehandling	Slipning	Ytbehandling
1	1	Test för att hitta lämpliga körparametrar				
	2	SRR 1	Ra1	-	Ra1	-
	3	SRR 2	Ra1	-	Ra1	-
	4	SRR 3	Ra1	-	Ra1	-
	5	Repetition av test 4				
2	6	SRR 2	Ra1	-	Ra2	-
	7	SRR 2	Ra1	-	Ra3	-
	8	SRR 2	Ra3	-	Ra3	-
	9	Repetition av test 8				
3	10	SRR 2	Ra3	TCG 1	Ra3	-
	11	SRR 2	Ra3	TCG 1	Ra3	TCG 1
	12	Repetition av test 11				
	13	SRR 2	Ra3	TCG 2	Ra3	TCG 2

## Resultat

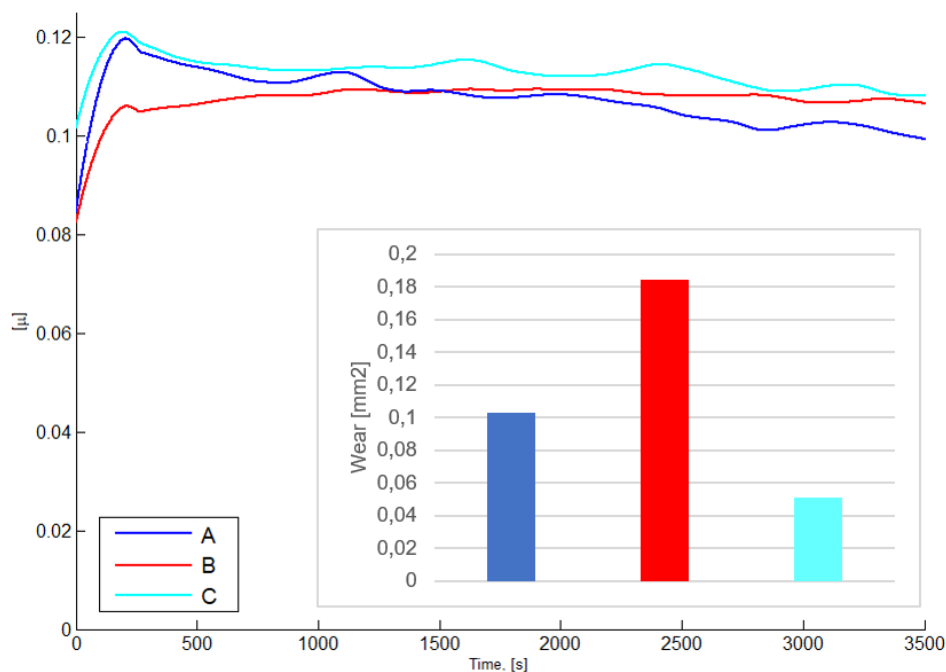
Huvuddelen av arbetet var uppdelad i två block, processutveckling och riggtestning. Resultaten redovisas därför i två sektioner nedan.

### Processutveckling

Under processutvecklingen hos ANS användes provstavar för att utvärdera olika varianter av TCG-behandlingen. Provstavarna utvärderades genom ytfinhetsanalys, samt tribotestning för att utvärdera friktion och nötning. Här redovisas några exempel från testmatrisen. Analyserna inkluderade jämförelse mellan behandling med olika verktygsmaterial, tab. 3, fig. 2, och behandlingar med samma verktygsmaterial men där processparametrarna varierades, tab. 4, fig. 3.

Tabell 3: Ytfinhetsdata före och efter behandling med olika verktygsmaterial.

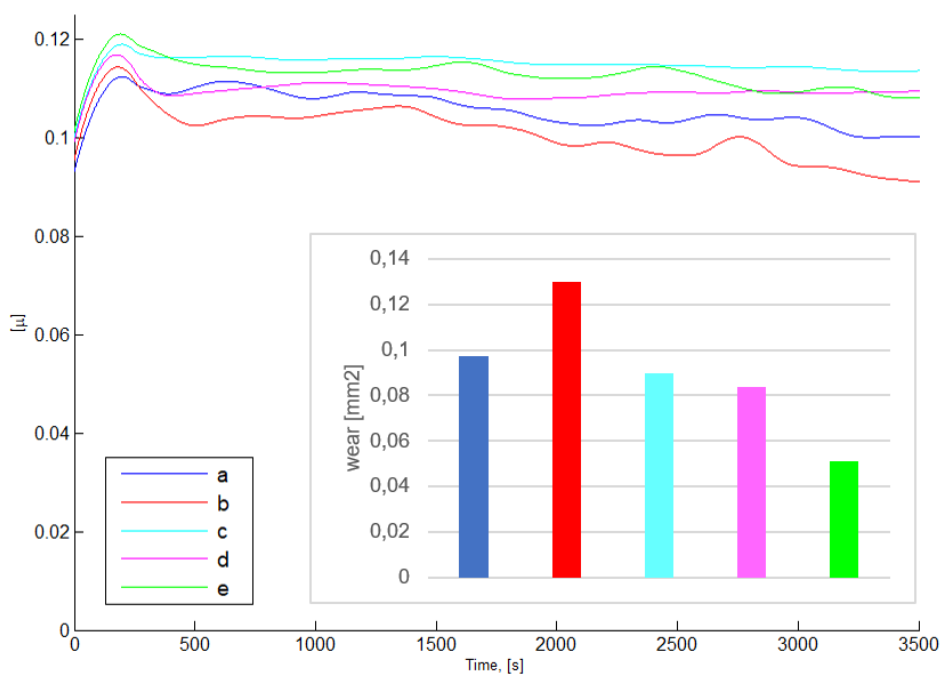
	A		B		C	
	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter
Ra	0,190	0,070	0,188	0,133	0,182	0,059
Rz	1,755	0,479	1,462	1,134	1,578	0,703
Rpk	0,131	0,098	0,139	0,102	0,159	0,065
Rvk	0,454	0,112	0,379	0,290	0,343	0,112



Figur 2: Friktions- och nötningdata efter tribotest. Jämförelse mellan behandling med olika verktygsmaterial.

Tabell 4: Ytfinhetsdata före och efter behandling med varierade processparametrar (a-e avser olika processinställningar).

	<b>a</b>		<b>b</b>		<b>c</b>		<b>d</b>		<b>e</b>	
	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter
Ra	0,195	0,096	0,175	0,099	0,200	0,070	0,182	0,076	0,182	0,059
Rz	1,528	0,777	1,403	0,726	1,483	0,540	1,330	0,563	1,578	0,703
Rpk	0,137	0,094	0,188	0,076	0,194	0,070	0,165	0,068	0,159	0,065
Rvk	0,395	0,178	0,282	0,174	0,388	0,092	0,277	0,135	0,343	0,112



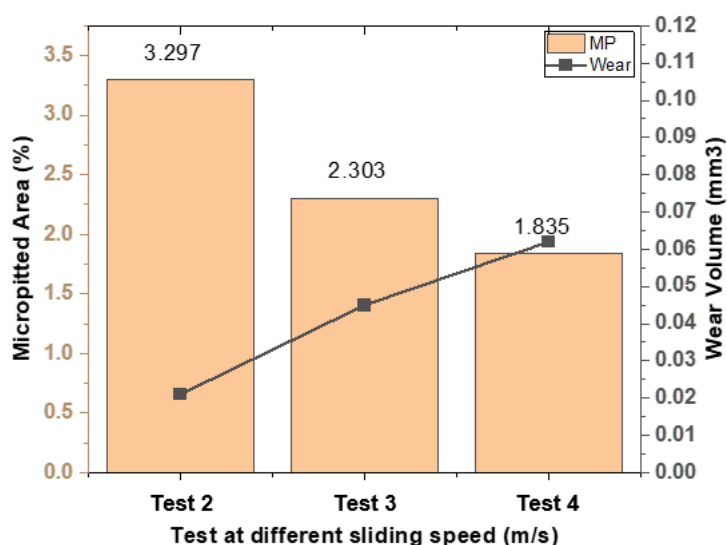
Figur 3: Friktion- och nötningsdata efter tribotest. Jämförelse mellan behandling med varierade processparametrar.

### Twin-disc testning

Under fas 1 provades lämpliga testparametrar fram och därefter utvärderades skillnaden mellan olika SRR (slide-to-roll ratios), tab 5, fig. 4. Det till synes omvända förhållandet mellan nötningsvolym och observerade mikrosprickor förklaras av att många mikrosprickor försvinner då material avverkas genom nötning.

Tabell 5. Testplan, twin-disc testning fas 1.

Test	Krökt disc		Plan disc		$P_{max}$ [GPa]	$\mu_{slide}$ [m/s]	SRR
	Slipning	Ytbehandling	Slipning	Ytbehandling			
2	Ra1	-	Ra1	-	2,00	-0,79	-0,259
3	Ra1	-	Ra1	-			
4	Ra1	-	Ra1	-			



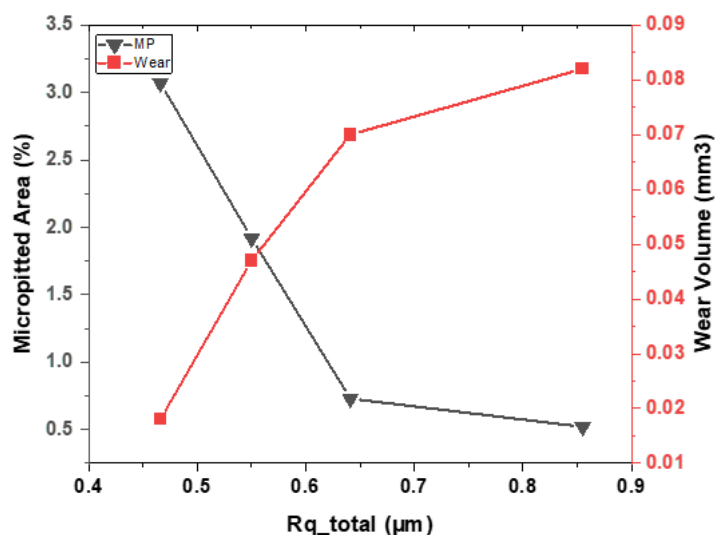
Figur 4. Micropitting och nötningsvolym efter genomfört test (fas 1).



I fas 2 utvärderades discar slipade till olika ytfinheter - Ra1, Ra2 och Ra3, vilka motsvarar Ra-värden på ca 0,3, 0,4 samt 0,5  $\mu\text{m}$ , tab. 6. Resultaten visar att nötningen ökar då det kombinerade Rq-värdet för de två discarna ökar, fig. 5.

Tabell 6. Testplan, twin-disc testning fas 2.

Test	Krökt disc		Plan disc		$p_{\text{max}}$ [GPa]	$\mu_{\text{slide}}$ [m/s]	SRR
	Slipning	Ytbehandling	Slipning	Ytbehandling			
2	Ra1	-	Ra1	-	2,00	-1,09	-0,357
6	Ra1	-	Ra2	-			
7	Ra1	-	Ra3	-			
8	Ra3	-	Ra3	-			



Figur 5. Micropitting och nötningsvolym efter genomfört test (fas 2).

I fas 3 av twin-disc testningen utvärderades effekten av ANS ytbehandling TCG. Inför testningen utfördes ytanalys av de TCG-behandlade discarna, tab. 7. Version 2 av ytbehandlingen (TCG2) har större påverkan på samtliga ytfinhetsparametrar. TCG-behandlade discar testades i tre olika kontaktsituationer och jämfördes mot obehandlade discar med olika ytfinhet, tab. 8. TCG version 1 testades både mot behandlad och obehandlad motgående disc, medan TCG version 2 endast utvärderades i ett test där båda discarna var behandlade.

Tabell 7. Ytfinhetsdata före och efter ANS ytbehandling.

	TCG 1		TCG 2	
	Före	Efter	Före	Efter
Sq	0,611	0,577	0,545	0,230
Sa	0,477	0,439	0,434	0,182
Ssk	-0,533	-0,837	-0,180	-0,444
Sp	2,085	1,385	1,965	0,637
Sv	3,283	2,688	2,238	1,168
Sdq	0,059	0,048	0,053	0,013

Tabell 8. Testplan, twin-disc testing fas 3.

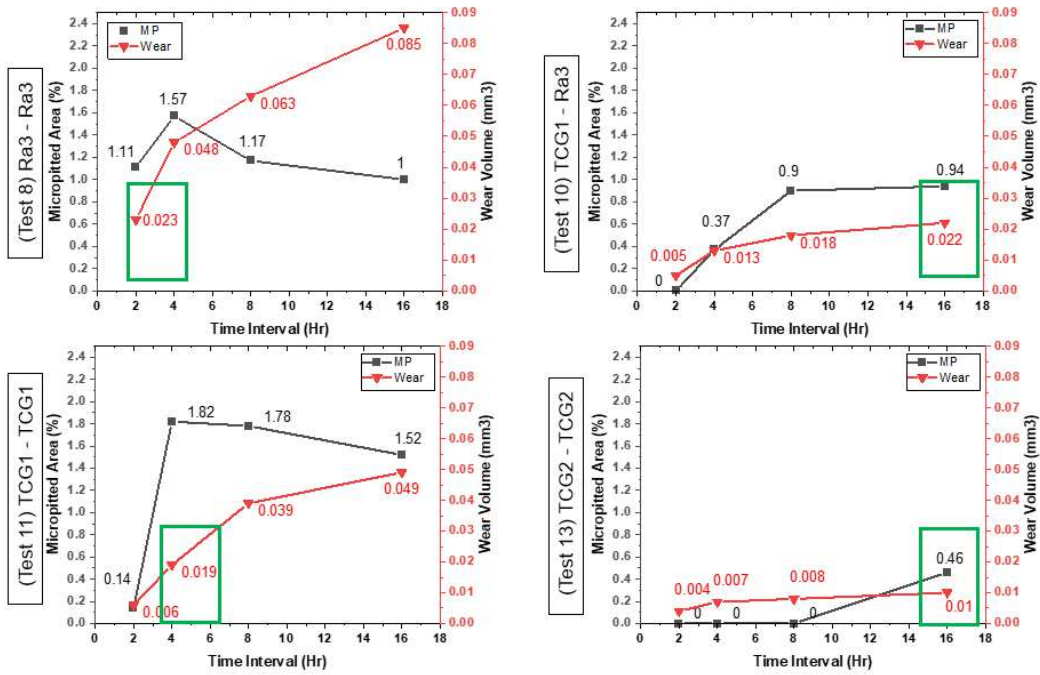
	Krökt disc		Plan disc		$p_{max}$ [GPa]	$\mu_{slide}$ [m/s]	SRR
	Slipning	Ytbehandling	Slipning	Ytbehandling			
2	Ra1	-	Ra1	-	2,00	-1,09	-0,357
8	Ra3	-	Ra3	-			
10	Ra3	TCG 1	Ra3	-			
11	Ra3	TCG 1	Ra3	TCG 1			
13	Ra3	TCG 2	Ra3	TCG 2			

Under fas 3 stoppades testet efter 2, 4, 8 och slutligen 16 timmar. Vid alla dessa tidpunkter analyserades ytorna med avseende på nötningsvolym och micropitting, fig. 6, 7.

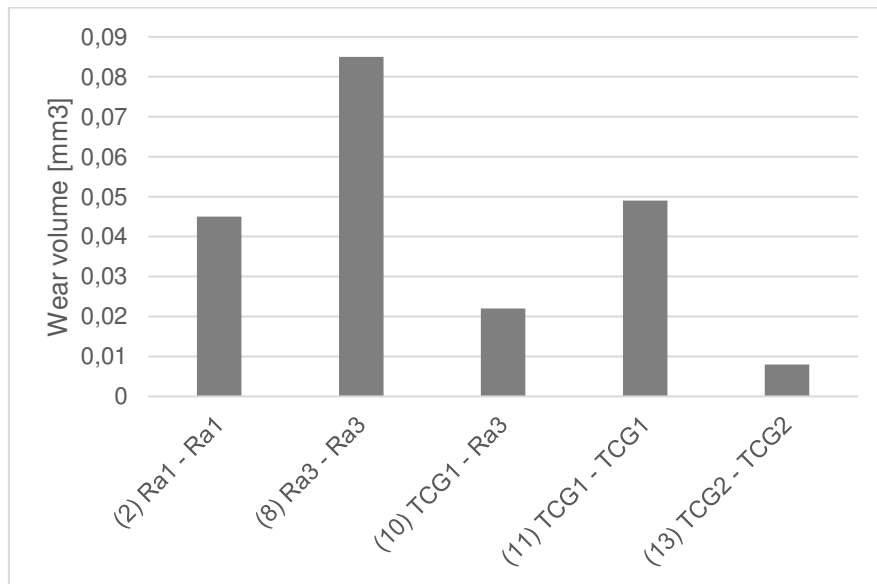
I det fall där en TCG1-behandlad disc går mot en obehandlad disc, test 10, minskar nötningsvolymen med 74% jämfört med test 8 och med 50% jämfört med test 2. Dessutom har initieringen av mikrosprickor fördröjts, inga mikrosprickor observerades efter de första två timmarna.

I det fall där båda discarna är behandlade med TCG1, test 11, fås högre nötning. Jämfört med test 8 observeras dock betydligt mindre mikrosprickor efter 2 timmar och nötningsvolymen efter slutfört test är 42% lägre.

TCG2 mot TCG2 ger en nötningsminskning på 91% jämfört med test 8 och 82% jämfört med test 2. Ingen micropitting observeras under de första 8 timmarna och den nivå som observerades efter 16 timmar kan anses försumbar.



Figur 6. Micropitting och nötning efter 2, 4, 8, 16 timmar (fas 3).



Figur 7. Nötningens volym efter genomfört test (fas 3).

## Diskussion

Resultaten visar att ANS ytbehandling Triboconditioning CG kan bidra till att fördröja micropitting och minska nötning i rullande/glidande kontakt avsevärt. Efter behandling med TCG version 2 förhindras micropitting i princip helt och hållet. Anledningen till att TCG version 2 presterar bättre än version 1 kan förklaras av att version 2 ger en större påverkan på samtliga uppmätta ytfinhetsparametrar. I jämförelse med de slipade discarna så ger TCG-behandlingen en mer negativ Skewness. Detta är en stor fördel eftersom det ger bättre förutsättningar för en god oljefilmsuppbyggnad. Utöver ytfinhetsförändringen bildas även en tribofilm på ytan, som hjälper till att minska friktionen och skyddar mot nötning.

Denna genomförbarhetsstudie har visat att TCG-behandlingen ger goda förutsättningar för att öka livslängden för kuggkomponenter, vilket kommer vara viktigt i framtidens elektriska drivlinor. Detta kan kopplas till en bättre resursanvändning och därmed högre energieffektivitet. Dessutom möjliggör TCG-behandlingen en övergång till smörjoljor med lägre viskositet, vilket betyder minskade friktionsförluster. Ytbehandlingen bidrar till bättre oljefilmsuppbyggnad både tack vare de genererade ytparametrarna och den tribofilm som bildas på ytan, vilken hjälper till att sänka friktionen ytterligare samtidigt som ytorna separeras och på så sätt motverkas även nötning.

Nästa steg är att applicera tekniken på faktiska kuggkomponenter. Den grundprocess som tagits fram under detta projekt har visat väldigt god potential men behöver fortsatt optimeras för behandling av specifika detaljer. Projektparterna planerar för en fortsättning i ett nytt projekt, för att arbeta vidare med processutveckling mot kuggbehandling och test i fullskalig transmissionsrigg. Därifrån kommer satsningen mot kommersialisering av Triboconditioning CG att fortsätta.