



Författare Örln Magnus Berg	Förband 4. Sjöstridsflottiljen	Kurs HSU 09-10T
Handledare Tekn. Dr. Kk Stefan Silfverskiöld, PhD Peter Bull		
Uppdragsgivare FHS/MVI/MTA	Beteckning	Kontaktman Kmd (pa) Nils Bruzelius
Nanostrukturell ytbeläggning på utsatta delar av marina drivlinor		
<p><u>Sammandrag</u></p> <p>Då marina enheter numera deltar i internationella missioner, kommer den nya och i många fall tuffare miljön som enheterna opererar i att påverka bland annat deras framdrivning.</p> <p>Den här studien avhandlar några av de nu framtagna nanostrukturella ytbeläggningarna och ger en presentation av hur de kan fungera på några marina drivlinors utsatta delar. Studien undersöker ytbeläggningarnas möjliga förmåga att utgöra ett skyddande lager som ska minska eller i bästa fall förhindra slitaget på valda delar av marina drivlinor. Som underlag till studien beskrivs i allmänna termer nanoteknik, olika anledningar till att slitaget uppstår samt något om hur ytbeläggningen kan appliceras.</p> <p>Studiens slutsats är att det med all sannolikhet går att applicera nanostrukturella ytbeläggningar och få ett mycket bättre resultat avseende hårdhet samt nötnings- och reptålighet jämfört med mikrostrukturella ytbeläggningar. Detta gäller såväl vid nytillverkning som renovering av de studerade delarna av drivlinor.</p> <p>Studien ger exempel på den militära nyttan med denna ytbeläggning samt ger förslag på fortsatt forskning.</p> <p>Nyckelord: Nanoteknik, ytbeläggning, drivlina, propellrar, vattenjet, kavitation</p>		

Nanostructure coatings on exposed parts of the naval powertrain

Abstract:

Nowadays naval units are participating in international missions, where new and in many cases tougher conditions will affect their propulsion.

This essay deals with some of the now developed nanostructure coatings and gives a presentation of how the coatings could function on some exposed parts of the naval powertrain. The essay investigates the possibility that the coatings can be used as a protective layer that will reduce or prevent wear on selected parts of the naval powertrains. As a basis for the essay, nanotechnology is described, as well as different reasons that wear occurs and application techniques for coatings

The conclusion is that nanostructured coatings can be applied and provide a much better result on hardness and wear resistance as of naval powertrains compared to micro-structural coatings, both for manufacturing and renovation.

The essay presents a few examples of the military utility of the nanostructure coatings as well as suggestions for further research.

Key words: Nanotechnology, coating, powertrain, propulsion, water jet, cavitation

Nanostrukturell ytbeläggning på utsatta delar av marina drivlinor



Foto: Dr. Kenneth Scandell, Naval Surface Warfare Center, USA

Örlogskaptten Magnus Berg

1	INLEDNING.....	3
1.1	SYFTE.....	5
1.2	PROBLEMFÖRMULERING.....	5
1.3	FRÅGESTÄLLNING.....	6
1.4	AVGRÄNSNINGAR.....	6
1.5	METOD.....	7
1.6	CENTRALA BEGREPP OCH FÖRKORTNINGAR.....	8
1.6.1	<i>Centrala begrepp.....</i>	8
1.6.2	<i>Förkortningar.....</i>	9
1.7	MATERIAL.....	10
1.8	TIDIGARE ARBETEN MED ANKNYTNING TILL DETTA ÄMNE.....	10
2	NANOTEKNIK.....	12
2.1	UPPBYGGNAD AV NANOSTRUKTUR.....	12
2.1.1	<i>Top-down.....</i>	12
2.1.2	<i>Bottom-up.....</i>	14
2.1.3	<i>Kombination av framställningstekniker.....</i>	15
2.2	SLUTSATSER KAPITEL 2.....	15
3	UTVALDA DELAR I DRIVLINOR FÖR MARINA SYSTEM.....	16
3.1	PROPELLERAXEL OCH DRIVAXEL (VATTENJET).....	17
3.2	PROPELLERBLAD OCH IMPELLRAR.....	19
3.3	SUMMERING AV KAPITEL 3.....	22
4	MÖJLIGA FÖRSLITNINGAR.....	24
4.1	SMÅ PARTIKLAR SOM SAND ETC.....	24
4.2	LAGER.....	25
4.3	KAVITATION.....	26
4.4	SLUTSATSER KAPITEL 4.....	28
5	NANOFORSKNING.....	30
5.1	NANOBELÄGGNINGAR.....	31
5.2	SPÄNNING OCH HÄRDHET.....	37
5.3	SLUTSATSER KAPITEL 5.....	39
6	TROLIGT RESULTAT AV DEN NANOSTRUKTURELLA YTBELÄGGNINGEN ..	40
6.1	RESULTAT PÅ PROPELLERAXEL OCH DRIVAXEL TILL VATTENJET.....	40
6.2	RESULTAT PÅ PROPELLERBLAD/IMPELLER TILL VATTENJET.....	42
6.3	SLUTSATSER KAPITEL 6.....	42
7	MILITÄR NYTTA MED NANOSTRUKTURERAD YTBELÄGGNING.....	43
8	SLUTSATSER OCH DISKUSSION.....	45
8.1	SVAR PÅ FRÅGESTÄLLNINGEN.....	45
8.2	FÖRSLAG PÅ FORTSÄTTA STUDIER/FORSKNING.....	46
9	SAMMANFATTNING.....	49
10	FÖRFATTARENS TACK.....	51
11	KÄLL- OCH LITTERATURFÖRTECKNING.....	52

1 Inledning

En önskvärd förmåga inom Försvarsmakten (FM) är att ha mobilitet. Mobiliteten kommer ur FM grundförmåga Rörlighet och har bärighet på grundförmågorna Skydd (exempelvis för att komma undan ett hot), Uthållighet (transportsystemen ska kunna användas över lång tid) samt Verkan (enheterna har ofta behov av att förflytta sig för att nå optimal verkan).¹ Mellan dessa förmågor finns en samverkan (och ibland växelverkan) som i sin tur ska leda till att FM får ut en effekt ur sitt handlande (se Bild 1.1). För att uppnå denna mobilitet behövs någon form av framdrivning. Det finns många sätt att driva fram försvarsmaktens olika fartyg, flyg och fordon. Gemensamt för dessa framdrivningssätt är att alla systemen har någon sorts drivlina. Det finns dock problem med drivlinorna. Bland annat finns det någon form av rörliga delar i dessa drivlinor och rörliga delar slits på ett eller annat sätt.

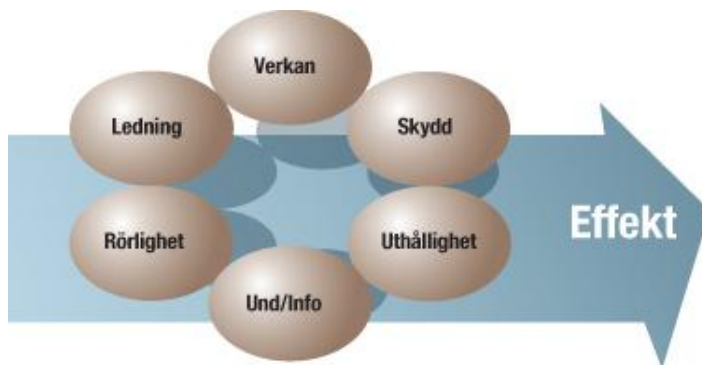


Bild 1.1 FM grundförmågor²

”... Fartygen, som är del av en internationell styrka, opererar under denna period nära kusten. Kusten består av många sandrevlar i anslutning till alla de flodmynningar som finns. I samband med de översvämningar som är anledningen till den internationella marina styrkans närvaro, har partikelhalten i kustvattnen ökat dramatiskt, i synnerhet vid flodmynningarna. Det fullkomligen väller ut sand och lerpartiklar med flodernas vatten, vilket ger en ljusbrun färg i havet. Att patrullera vecka efter vecka i dessa smutsiga och varma vatten påverkar

¹ Försvarsmakten, 2005. *Doktrin för gemensamma operationer (DGemO)*, ff. 60-61

² *Ibid.* s. 61

propelleraxlar, propellar och vattenjetaggregaten negativt. Det blir en form av sandblästring samt att smutspartiklar lyckas tränga in i bussningar och lager. Vid inspektioner gjorda av stödfunktionens arbetsdykare på plats i basområdet, har det konstaterats betydande nötnings- och repskador på propelleraxlarna och impellerbladen. Det har även så här i slutet av den långa missionen uppdagats en markant ökning av erosion orsakat av kavitation...³

FM går idag mot ett försvar som har allt färre tekniska system, men där varje system ska leva länge och framförallt användas mycket under sin livslängd, vilket scenariot ovan vill påvisa. För att få lång livslängd på framdrivningssystemen behöver de bland annat någon form av skydd mot yttre påverkan. Ett sådant skydd skulle kunna vara ballistiskt skydd mot yttre våld, vilket är viktigt att ha på militära system som ska kunna operera i miljöer där risken för kinetiskt våld alltid ska finnas med i riskbedömningarna. Det hjälper dock inte som skydd mot slitage, utan andra medel måste tillkomma. Någon form av inkapsling för att skydda framdrivningssystemet mot miljöpåverkan som smutspartiklar från vatten, is, vind eller mark kan på ett mycket effektivare sätt minimera slitaget och behovet av underhåll samt öka uthålligheten. Det är med andra ord önskvärt för FM att få låg underhållskostnad samt korta underhållstider, vilket innebär att hög ”Mean time between failure” (MTBF) är eftersträvarsamt, med lång ”uptime” med systemet igång och kort ”downtime” som är fartygets (systemets) tid för underhåll och reparation. Mer om detta i kapitel 7 *Militär nytta med nanostrukturerad ytbeläggning*.

Det är här som tekniken med nanostrukturella ytbeläggningar kommer in och kanske kan ha stor betydelse. Detta berör såväl mark-, flyg- som marina system, men studien avgränsas till att behandla marina framdrivningssystem. Det är möjligheterna med nanoteknologi på dessa framdrivningssystem studien ska utreda i det här självständiga arbetet.

³ Scenario uppiktat av författaren för att belysa en tänkt situation där svenska fartygsförband kan komma att operera i framtiden och där problem för framdrivning kan uppstå.

1.1 Syfte

Redan i mitt SA 2009 (C-uppsats) skrev jag om nanoteknik och ytbeläggningar, då var inriktningen självrengörande ytbeläggningar på elektrooptiska (EO) sensorer huvudsakligen avsedda för marint bruk.⁴

Denna studie syftar till att utreda om och hur man med nanoteknik kan förbättra skyddet mot slitage eller skador på de marina drivlinornas mer utsatta delar.

Resultatet av studien bör kunna ge en insyn till hur stor nytta Marinen kan få av den här nya tekniken och vad det innebär för framtida anskaffningar av materiel.

För att nå dit kommer studien att följa upp kunskaperna som finns om nanostrukturella ytbeläggningar nationellt och internationellt för att se var forskningsfronten befinner sig och hur och var utvecklingen sker. Studien kommer att svara på vilka möjligheter det finns att utnyttja tekniken för att få driftsäkrare och tillgängligare drivlinor som dessutom kan erhålla en längre livslängd och därmed effektivare livscykelkostnad (Life cycle cost, LCC)⁵. Studien kommer inte på något sätt att förklara en drivlinas alla ingående delar eller hur de fungerar.

1.2 Problemformulering

I försvarspropositionen (Prop. 2008/09:140)⁶ och i Försvarets utvecklingsplan (FMUP)⁷ står det bland annat att Försvarets strategiska mål är att utveckla en insatsorganisation som ska kunna verka nationellt och internationellt. Samtliga insatsförband i FM ska kunna verka i en internationell miljö och en expeditionär förmåga ska fortsätta att utvecklas. Det innebär att FM förband ska kunna verka i operationsområden i närområdet men även utanför närområdet som ligger långt utanför våra egna landområden och

⁴ Berg, M., 2009. *Självrengörande ytbeläggning i nanostruktur - är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?* Försvarshögskolan, Stockholm

⁵ INCOSE, 2010. *Systems Engineering Handbook*, Version 3.2

⁶ Regeringskansliet *Regeringens proposition 2008/09:140 Ett användbart försvar*, s. 8 m.fl.

⁷ HKV *Försvarets Utvecklingsplan 2011-2020 (FMUP 2011)* s. 8

farvatten. Flertalet av de områden där FM opererar internationellt idag, innebär oftast högre temperatur i luften och större sannolikhet att det flyger små sand- eller jordpartiklar i luften från den torra markytan över land och hav. För de marina enheterna innebär den expeditionära insatsen att nya klimatologiska och geografiska faktorer måste kunna klaras av. Det innebär varmare vatten, högre salthalt och mycket höga halter av småpartiklar som sand och lera i de vatten där fartygen kommer att operera. FM styrkor kan också utsättas för extremt kalla miljöer där isbildning kan åstadkomma problem för fartyg. För att ta sig fram i dessa miljöer och åtnjuta sin mobilitet ställs nya och hårdare krav på att drivlinorna måste fungera över tiden med så korta avbrott som möjligt för underhåll.

FM måste med andra ord hitta lösningar för att se till att yttre påverkan i form av miljöfaktorer renderar så litet slitage som möjligt på drivlinorna för att på så sätt hålla nere underhållstid och kostnader.

1.3 Frågeställning

Studien behöver besvara frågorna:

- 1) Vilken påverkan har nanostrukturell ytbeläggning på de delar av marina drivlinor jag valt i studien?
- 2) Kan en nanostrukturell ytbeläggning appliceras på äldre drivlinor som inte har den från början och vilka kriterier måste då vara uppfyllda?

1.4 Avgränsningar

- Studien avser endast utreda de delar av drivlinor som finns i FM (Marinens) fartyg (båt och/eller skepp), dock inte drivlinor på sväware.
- Den nanostrukturella ytbeläggningen ska kunna vara applicerad på delar av drivlinornas mest utsatta delar.
- Studien kommer inte presentera någon detaljerad ekonomisk redovisning, varken kostnader för att belägga ytan, för beläggningen i sig.

- Eventuella galvaniska strömningar som kan uppstå när nanobeläggningarna har applicerats kommer ej tas hänsyn till

1.5 Metod

Denna studie har huvudsakligen genomförts som en litteraturstudie för att inhämta allmän kunskap om nanoteknik, de utvalda delarna i marina drivlinor och dess problemområden samt att inhämta vad som finns skrivet om nanostrukturella ytbeläggningar. Dessutom är studien en komparativ studie där jag jämför olika forskningsresultat av nanostrukturella ytbeläggningars egenskaper mot dagens mikrostrukturella beläggningars egenskaper vid samma kemiska sammansättning.

Utöver litteratur har information inhämtats genom samtal, intervjuer och mejlväxling.

Studien är indelad enligt följande:

Kapitel 1 inleds med en beskrivande bakgrund om olika drivlinor i generella termer för att belysa studiens problemområde. Därefter presenteras syfte, problem, frågeställningar samt avgränsningar. Här finns även med några centrala begrepp och förkortningar för att lättare förstå efterföljande textmassa.

Kapitel 2-4 beskriver bakgrundfakta, där kapitel 2 handlar om nanoteknik i allmänhet och framställning av nanostruktur, där de två olika framställningssätten ”Top-down” och ”Bottom-up” beskrivs mer noggrant. Kapitel 3 ger teknisk information och beskriver de delar av drivlinor som jag avser behandla i studien. Kapitel 4 avhandlar min syn på möjliga anledningar till slitage av de delar jag beskrivit i kapitel 3.

Kapitel 5 beskriver ett utsnitt av den nanoforskning som bedrivs med anknytning till nanostrukturella ytbeläggningar som kan användas på drivlinor. I kapitel 6 knyts kapitel 2-5 ihop och beskriver vad som är det troliga resultatet av en

nanostrukturerad ytbeläggning på respektive del av drivlinan som tas fram i kapitel 3 och 4.

I kapitel 7 tas resultatet från studien och knyter an det med den militära nytta FM skulle kunna ha av dessa ytbeläggningar.

Produkten av empirin från kapitel 2 – 7 resulterar vidare i kapitel 8 som innefattar viktiga slutsatser, diskussion samt förslag till fortsatta studier inom ämnesområdet. Studien avslutas i kapitel 9 med en sammanfattning.

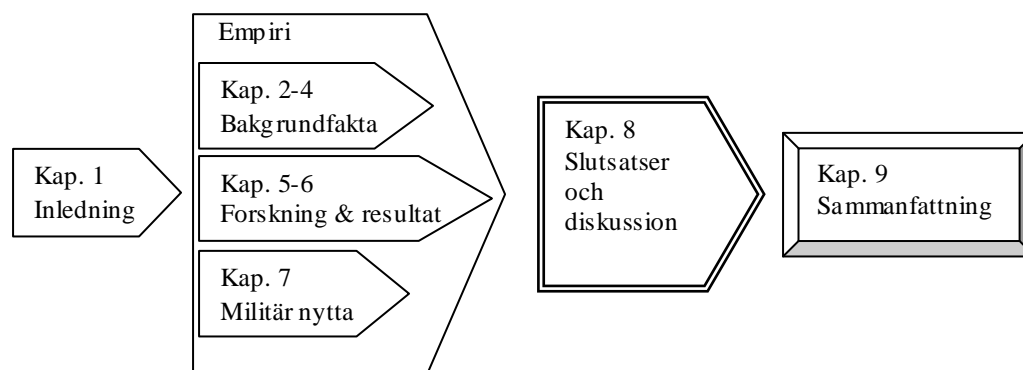


Bild 1.2 Beskrivning av flödet i studien samt kapitelindelning.

1.6 Centrala begrepp och förkortningar

1.6.1 Centrala begrepp

Nanoteknik eller nanoteknologi som det också benämns, är sedan ett antal år tillbaka allmänt definierat som ett område där man har kontroll på ett materials struktur och att partiklarna i materialet finnas i storleksspannet mellan 1-100 nm. Inom EU har en särskild forskargrupp från EU:s Joint Research Center, föreslagit att denna definition avseende nanomaterial ska gälla juridiskt åtminstone inom EU.⁸ Dock finns det fortfarande något avvikande definitioner i litteraturen, vilket bland annat kan läsas i EU-rapportens tabell A1 (avskriven nedan i Tabell 1.1).

⁸ Lövestam, G, et al, 2010. *Considerations on a Definition of Nanomaterial for Regulatory Purposes*. European Commission, Joint Research Center, Luxemburg

Table A1 Overview of nanoscales used in existing working definitions.	
All scales refer to at least one dimension except for the UK (DEFRA) which refers to 'at least two dimensions'.	
Organization/Country	Nanoscale
ISO-CEN	Approximately 1 nm to 100 nm
OECD	Typically between 1 nm and 100 nm
EU SCENIHR	In the order of 100 nm or less
EU SCCP	In the order of 100 nm or less
EU (Cosmetic Products)	1 nm to 100 nm
EU (Novel Foods)	In the order of 100 nm or less
ACC	Typically between 1 nm and 100 nm
Australia (NICNAS)	Typically between 1 nm and 100 nm
Canada	1 nm to 100 nm
Denmark	In the 1-100 nm range
The UK	Less than 100 nm
The UK (DEFRA)	Up to 200 nm (in two or more dimensions)
US-EPA	Generally, but not exclusively, below 100 nm and above 1 nm

Tabell 1.1 Tabell A1 visar översiktligt några olika definitioner som använts i västvärlden.⁹

Nanostrukturell ytbeläggning avser oftast en tunn beläggning eller film, vilken kan appliceras på en yta och där ge olika egenskaper.

1.6.2 Förkortningar

Å	Ångström (10^{-10} meter)
nm	Nanometer (10^{-9} meter)
µm	Mikrometer (10^{-6} meter)
Pa	Pascal (storhet för tryck)
HV	Vickershårdhet (mätmetod av hårdhet på material)
HVOF	High velocity oxygen Fuel (Höghastighets flamsprutning)
LCC	Life Cycle Cost
MTBF	Mean Time Between Failure
SEM	Scanning electron microscope (svepelektronmikroskop) ¹⁰
TEM	Transmission electron microscope (transmissionselektronmikroskop) ¹¹

Tabell 1.2 Förkortningar förekommande i studien.

⁹ Ibid. sida 33

¹⁰ <http://www.ne.se/elektronmikroskop> hämtad 2010-11-13

¹¹ Ibid.

1.7 Material

Litteraturen för studien består huvudsakligen av böcker och artiklar på engelska avseende nanoteknik och nanostrukturella ytbeläggningar. Det har varit viss brist på litteratur som har kunnat kopplas till studiens ämne, vilket troligtvis beror på att det är ett förhållandevis nytt område av denna teknik studien tittar på och att forskarna befinner sig i framkanten på denna forskning. I och med att forskningen kring nanostrukturella ytbeläggningar är relativt ny, kan det innebära att slutsatserna som dras av det använda materialet har en begränsad hållbarhet, föranlett av eventuella kommande teknikgenombrott. En hel del information om till exempel propellerutformning, impellrar och kavitation har sökts och hittats via Internet.

Samtal, intervjuer och mejlväxling har skett med Boris Zhmud på Applied Nano Surfaces (ANS), Jens Tornblad på Rolls-Royce (Kamewa), Fredrik Hyllengren och Lars Lindgren på Försvarets materielverk (FMV: AK Gem respektive AK Sjö), Magnus Palm på SP Sveriges Tekniska forskningsinstitut, Docent Olle Grinder på PM Technology AB (Docent i materialteknik vid KTH), Peter Granstam, Exova, Dr. L. T. Kabacoff på Office of Naval Research (ONR), Dr. Kennet Scandell på Naval Surface Warfare Center (NSWC) samt Steven Savage på Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Med Steven (FOI) har jag diskuterat ämnesval samt FOI syn på möjligheter att utnyttja nanotekniken på det sätt jag utreder i studien i syfte att få en mer vetenskaplig grund för studien och för att stämna av att jag inte tolkat litteraturen felaktigt.

1.8 Tidigare arbeten med anknytning till detta ämne

Det finns en tidigare C-uppsats i FHS regi som avhandlar ämnesområdet nanostrukturella ytbeläggningar och det är min egen uppsats ”Självsanerande ytbeläggning i nanostruktur – är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?”¹²

¹² Berg, M, 2009. *Självsanerande ytbeläggning i nanostruktur - är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?* Försvarshögskolan, Stockholm

På andra universitet och högskolor finns det ett antal forskningsprojekt som har en tydlig anknytning till detta ämne och samt en del ny och pågående forskning om nanostrukturella ytbeläggningar. Bland annat har det 2005 släppts en rapport från University of Connecticut av Eric H Jordan och Maurice Gell¹³ beskrivande resultat från forskning kring nanostrukturer kontra mikrostrukturer av Aluminium-Titan och dess beteende avseende drag- och tryckspänning samt förmåga att tåla nötnings- och repskador.

Dessutom har det nyligen (2009) släppts resultat från forskning kring nanostrukturer av Aluminium-Titan och dess beteende avseende drag- och tryckspänning under fyrpunktsbelastning genomförd på Rutgers University USA av A. Ignatov et al (2009).¹⁴

Ett tidigare, för andra forskare och min studie, viktigt försök rapporterades 2003 från University of California av E.J. Lavernia avseende beteende hos nanostrukturerade ytbeläggningar applicerade med termisk sprutning ("Thermal Spraying").¹⁵

¹³ Jordan, E.H.; Gell, M. 2005, *Nano Crystalline Ceramic and Ceramic Coatings Made by Conventional and Solution Plasma Spray*. In *Nanomaterials Technology for Military Vehicle Structural Applications* (pp. 9-1 – 9-20). Meeting Proceedings RTO-MP-A VT-122, Paper 9. Neuilly-sur-Seine, France: RTO.

¹⁴ Ignatov, A et al 2009, *Microscopic Strain Mapping in Nanostructured and Microstructured Alumina-Titania Coatings Under 4-point Compressive and Tensile Bending*, Rutgers University, Piscataway, New Jersey

¹⁵ Lavernia, E.J, 2003, *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings Using Thermal Spraying*, University of California, Davis

2 Nanoteknik

Detta kapitel ger en generell introduktion till vad nanoteknik är samt presenterar de områden forskarna idag vet att nanoteknik kan användas inom.

2.1 Uppbyggnad av nanostruktur

Nanoteknik som är definierat till området 1-100 nm (se 1.6.1 Centrala begrepp) är något extremt litet. Att ha kontroll över, eller rättare sagt kunna kontrollera, något så smått är en avancerad teknik i sig själv med all ny mätutrustning som behövs. Exempel på utrustning beskrivs i kapitel 5.1 *Nanobeläggningar*. För att bättre förstå inom vilken storleksdimension nanotekniken opererar, så är diametern på en DNA-sträng mellan 2-12 nm, diametern på röda och vita blodkroppar befinner sig inom 2 000-5 000 nm och tjockleken på ett vanligt papper är cirka 100 000 nm. Rent generellt kan man säga att nanoteknik är en form av materialteknik fast med väldigt små strukturer i materialet.

Nanoteknik erbjuder nya dimensioner med möjlighet till att tillverka mycket små produkter, men också möjlighet till att skapa ändrade egenskaper på material. Begreppet nanoteknik är inte så gammalt. Det startade egentligen 1989 när Don Eigler vid IBM:s forskningslaboratorium, Silicon Valley, Kalifornien, USA, tog en bild på sin skrift "IBM" som han lyckats skriva med hjälp av 35 xenonatomer. Bilden förstorades upp 50 miljoner gånger för att skriften skulle vara synlig.¹⁶

För att på maskinell väg komma ner till nanostrukturer används huvudsakligen två olika framställningstekniker som allmänt benämns "Top-down" och "Bottom-up".

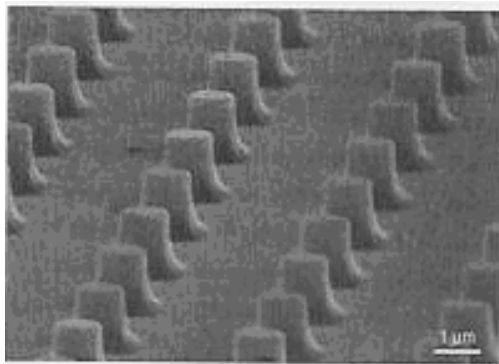
2.1.1 Top-down

Top-down innebär att man använder så kallad makro- eller mikroteknik (det som används till vardags) och omsätter den i nanoformat. Det innebär att nanostrukturen framställs i processer genom att skala ner, minimera eller genom någon form av malning. Processerna för att möjliggöra detta går dock från

¹⁶ Vetenskapsrådet, *Där guld glimmer blått*; sida 10

precisionsarbete till ultra precisionsarbete.¹⁷ Det finns många exempel på att forskarna numera kan bygga extremt små men fungerande maskiner, så kallade MEMS (micro electro mechanical systems) eller NEMS (nano electro mechanical systems) som det står i viss litteratur, med hjälp av Top-down som framställningsteknik. Dessa MEMS/NEMS kan ha olika utseenden och bland annat har försök gjorts för att få maskiner i storlek med små insekter och utseendemässigt även likna dessa. Vid Berkeleyuniversitetet i USA har ett projekt drivits för att få fram en mekanisk fluga (micromechanical flying insect, MFI).¹⁸ Spännvidden över vingarna är inte mer än 25mm, men vad jag förstår av litteraturen så är denna MFI fullt fungerande.

Top-down teknik kan användas för att få fram olika ytor på material. Processen kan till exempel användas om man vill få en yta som består av mycket små taggar (se Bild 4.6). Det är på så sätt möjligt att få funktioner som är vattenavstötande (hydrofob) eller till och med extremt vattenavstötande (superhydrofob) likt en Lotusblomma.^{19,20}



Skalstrecket representerar
1 μm

Bild 4.6 Maskinellt framtagen mikrospikeyta²¹

¹⁷ Ramsden, J, *Nanotechnology*, sid 72

¹⁸ FOI, Jan-Ivar Askelin, *Framsyn nr 2-2002, Storheten sitter i litenheten*

¹⁹ Blossey, R, 2003. *Self-cleaning surfaces – virtual realities*, i artikelserien *nature materials VOL 2, may 2003*, artikel, sid 302

²⁰ Berg, M, 2009. *Självsanerande ytbeklägning i nanostruktur - är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?* Försvarshögskolan, Stockholm. Kapitel 4.1

²¹ Bilden är skannad från artikeln *Self-cleaning surfaces – virtual realities*, (Villeneuve d'Ascq 2003) av Ralf Blossey. Författaren till artikeln har i sin tur tagit bilden från Bico, J., Marzolin, C. & Quéré, D. *Pearl drops. Europhys. Lett.* **47**, 220-226 (1999).

Exempel på produkter framställda med Top-down teknik är

- Mikro- och nanoelektronik komponenter
- MEMS och NEMS
- Nanostrukturer som ytbeläggningar, olika membran, beläggningar på solceller
- Nanofibrer framställda genom "electro spinning"

2.1.2 Bottom-up

Den andra tekniken är uppbyggnad (Bottom-up). Med den tekniken bygger man upp strukturen atom för atom eller molekyl för molekyl och får därigenom fram nya egenskaper.²² I viss litteratur jämföras detta med en process för "själv-sammansättning" (self-assembly²³), vilket exempelvis kan innebära att ett visst material med känd sammansättning och struktur appliceras på ett underlag (som också har känd sammansättning) och sedan låter man materialet fästa och strukturera sig med underlaget. Beroende på vilket material man använder, kan man få både hydrofobiska och hydrofila (vattenutdragande) egenskaper.²⁴

I vissa applikationer är Bottom-up i nuläget en långsam process, men fördelarna är många vilket borgar för att denna framställningsprocess kommer att utvecklas.

T.ex. kan det framställas:

- Nanokompositer som kolnanofiber/nanorör, vilka bl.a. har hög elektrisk ledningsförmåga och tål höga temperaturer.
- Nanostrukturer som ytbeläggningar
- Biologiska processer
- Nanomedicin

²² Frank Simonis & Steven Schilthuizen, *Nanotechnology innovation opportunities for tomorrow's defence*

²³ Ramsden, J, *Nanotechnology*, sida 77

²⁴ Berg, M, 2009. *Självsanerande ytbeläggning i nanostruktur - är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?* Försvarshögskolan, Stockholm. Kapitel 4.1

2.1.3 Kombination av framställningstekniker

Ett bra exempel är hur man kan mala ner en metall, t.ex. aluminium, till pulver (små nanopartiklar), vilket är en Top-down process. Därefter konsoliderar man pulvret igen, vilket är en Bottom-up process, och får en annan struktur på aluminiumet som ger nya egenskaper, vilket har gjorts av ett japanskt forskarlag.²⁵ I det här fallet ökar livslängden på det nanostrukturella aluminiumet genom att utmattningskurvan för metallen planar ut och aluminiumet får en definierad utmattningshållfasthet och kan utsättas för belastning i många fler cykler än mikrostrukturellt aluminium, med andra ord har det skapats nya tillämpningar för materialet.²⁶

2.2 Slutsatser kapitel 2

Nanotekniken är relativt ny och genom att det handlar om så små dimensioner är det inte helt lätt att arbeta med, men utvecklingen går framåt på bred front i hela världen. Båda processerna Top-down och Bottom-up kan användas vid framtagning av material med nya egenskaper, vilket i sig skapar nya förutsättningar för vad som kan framställas och hur det kan användas.

²⁵ Ohtera, K. et al, 1997, *Development of new nanostructure aluminum alloys "GIGAS" with high strength and superplasticity*, Japan. Artikel publicerad i *Materia Japan (Japan)*. Vol. 36, no. 6, pp. 634-636. 1997, ISSN 1340-2625

²⁶ Information inhämtad vid diskussioner med Docent Olle Grinder på PM Technology AB

3 Utvalda delar i drivlinor för marina system

Studien avhandlar hur och om nanostrukturella ytbeläggningar kan skydda mot nötnings- och repskador på valda utsatta delar av olika marina drivlinor. För att kunna välja ut dessa delar av drivlinor behöver till att börja med ordet drivlina definieras. I litteraturen är definitionen relativt samstämmig, vilket ses i exemplen nedan.

Definition på drivlina enligt nationalencyklopedin:

***drivlina**, drivsystem, maskinteknisk term för det som tillsammans driver ett fordon. Hit hör motorn, kopplingen, växellådan, drivaxeln, batteriet m.m.²⁷*

Definition på drivlina enligt Terminologicentrum:

I motorsammanhang används drivlina synonymt med drivsystem som då ofta omfattar allt som tillsammans driver fordonet, dvs. motorn, kopplingen, drivaxeln, växellådan, batteriet etc. Drivlina är en mer maskinteknisk term, medan drivsystem ofta används i elmotorsammanhang.²⁸

Ovanstående definitioner innebär att benämningen drivlina blir omfattande och ganska komplext att hantera som en helhet. Det blir därför nödvändigt att begränsa studien till de delar där jag är av uppfattningen att den nanostrukturella ytbeläggningen kan göra nytta.

Uttrycks drivlina som en komponent för framdrivning av ett fartygssystem, skulle det kunna benämnas som ett system av system. Då kommer detta system ha en egen definierad livscykel, eller om man så vill, en egen livslängd. Denna kan, men behöver inte, vara sammankopplad med det totala fartygssystemets livscykel. En drivlinas livscykel är beroende av många olika saker, bland annat spelar materialval, utnyttjandegrad, miljö i vilken framdrivningssystemet används, komponentsammansättning, gränssytor mellan olika komponenter, m.m. in i livslängden. På ytterligare detaljnivå har olika delsystem i drivlinan (exempelvis propelleraxeln) sin egen livscykel. Om de mest utsatta delarna i drivlinan kunde

²⁷ <http://www.ne.se/lang/drivlina/1807303> hämtad 2010-10-20

²⁸ <http://www.tnc.se> hämtad 2010-10-18

förses med nanostrukturell ytbeläggning så att de inte slits lika mycket, ökar förmodligen dess livslängd och därmed kanske även hela drivlinans livslängd. Dessutom kan det finnas en möjlig ekonomisk vinst i och med detta, då underhållskostnaderna torde nedgå. När det gäller drivlinor så är det alltid förknippat med underhåll och underhåll kostar pengar. Antingen måste delar bytas ut relativt ofta eller förses med externa produkter för att fungera, exempelvis smörjmedel till glidlager. Om nu nanostrukturella ytbeläggningar kunde hjälpa till att minska dessa underhållskostnader och öka livslängden på drivlinorna (minskad LCC), blir det intressant för FM vid anskaffning av nya system.

För studien kommer, som nämnts ovan, ett begränsat antal delar av en drivlina studeras, där en nanostrukturell yta kan anses ge någon form av effekt. Dessa delar är propelleraxel och drivaxel till vattenjet (kapitel 3.1), propellar samt impeller till vattenjetaggregat (kapitel 3.2). Dessutom studeras områden runt dessa delar då omgivningen kan påverkas av drivlinan eller beroende på utformning påverka själva drivlinan.

3.1 Propelleraxel och drivaxel (vattenjet)

Propelleraxeln på fartyg (båt eller skepp) är länken mellan motor eller växel och propellern i de fall fartygen har propeller som framdrivningsalternativ. I de fall det är vattenjetdrift på fartyget får propelleraxeln representeras av drivaxeln till impellern. Propelleraxeln finns både utvändigt och inombords i ett fartyg.

Hur mycket som sticker ut i vattnet beror på design av fartyget och är ofta beroende av hur många propellar fartyget har. Om fartyget endast har en propeller, sticker den oftast ut ytterst lite och är normalt placerad centralt i akterskeppet, exempelvis ser det ut så på HMS Visborg och svenska ubåtar. Med två eller fler propellar placeras axlarna längre ut mot sidorna, ofta med längre utvändiga axlar som följd. Ett bra exempel på detta är korvett av Stockholmsklass vilken har tre axlar. (Se Bild 3.1).



Bild 3.1 HMS Stockholm. Propelleraxel (3 st.) med axelbärare och propeller²⁹

Om det är långa axlar behövs axelbärare med lager för att hålla propelleraxeln rak vid propellern. Detta för att axeln inte ska komma i svängning när propellern roterar. I gränssytan mellan fartyget och vattnet behövs också lager, i detta fall för att hålla tätt in till fartyget. Beroende på motorns placering i fartyget kan det behövas lager även inombords om det är långa avstånd. Enligt Sjöfartverkets författningssamling (SjöSF) får avståndet mellan lager inte överstiga 50 gånger diametern på axeln.³⁰ Drivaxeln till impellern återfinns huvudsakligen inombords i fartyget, dock sticker en del av drivaxeln ut i vattentrumman innan den kopplas ihop med impellern. Även för drivaxeln behövs det flera lager om avstånden är långa. Olika lager beskrivs mer utförligt i kapitel 4.2 *Lager*.

De delar av en propelleraxel som finns utanför fartygets skrov utsätts för betydligt besvärligare miljö än de mer skyddade delarna inombords. Det kan vara beväxning med havstulpaner och alger eller mängder av partiklar i vattnet som påverkar negativt. Partiklar som exempelvis sand eller partiklar från lera kan skapa problem vid kustnära uppträdande utanför flodmynningar, vilket jag antydde redan i inledningen. Detta behandlas i kapitel 4.1 *Små partiklar som sand etc.* Skadorna uppstår då i de så kallade lagerlägen som finns, dvs. där axeln roterar i ett lager.

²⁹ <http://sv.wikipedia.org/wiki/Stockholmsklass> hämtad 2010-11-30

³⁰ SJÖSF 2008:81 Bilaga 1 punkt 15.1.2 s. 93

Propelleraxlarna kan tillverkas i lite olika material. Det vanligaste materialvalet för svenska propelleraxlar är kolstål benämnt CK45³¹ och för drivaxlar till vattenjet är det rostfritt stål.³² Rostfritt stål finns i olika kvaliteter som Martensitiskt-, Ferritiskt- och Austenitiskt rostfritt stål. En vanlig kvalitet är Martensit-austenitiska rostfria stål som är magnetiska och hårdbara.³³ Det rostfria stålet behandlas och uppnår ett så kallat tillstånd som kan vara glödgat, seghärdat eller släckglödgat.³⁴ Drivaxlar brukar vara släckglödgade. Ett problem med rostfria axlar är att de är dyra att bearbeta samt att det tar relativt lång tid att svarva i det materialet. För att minska den magnetiska signaturen används idag även kolfiberaxlar, där endast axlarnas lagerlagen är av rostfritt stål då stålet har bättre resistens mot slitage.³⁵

3.2 Propellerblad och impellrar

Idag används olika typer av propellrar på våra fartyg. Det gäller såväl materialval som utformning av propellerbladen. Det är vanligt att bladen och eller hela propellern är gjord av någon form av bronslegering (ex. nickel aluminium - brons³⁶ (NiAl-brons)) eller rostfritt stål för våra fartyg. Utformningen av bladen blir mer och mer av så kallad ”skew back” princip (se Bild 3.2) och bladen kan både vara fasta (fast pitch) eller vridbara (variabel pitch, kontrollerbar pitch eller uttrycket ”skevringsbara”) för att uppnå bästa effekt (se Bild 3.3 och 3.4). Skillnaden mellan fasta- och ”skevringsbara” blad är att för fasta propellrar måste man via ett backslag byta rotationsriktning på propelleraxeln och på så sätt kunna genomföra backmanöver med fartyget. För de ”skevringsbara” propellrarna ändrar man vinkeln på bladen i förhållande till axeln och kan då behålla rotationsriktning på axeln även vid backmanövrar. Framdrivningen med propellrar sker genom att det uppstår en tryckskillnad mellan dess fram- och baksida när propellrarna roterar i vattnet.

³¹ <http://www.metalravne.com/selector/steels/ck45.html> hämtad 2010-11-29

³² Information från Jens Tornblad (Rolls-Royce)

³³ http://sv.wikipedia.org/wiki/Rostfritt_st%C3%A5l hämtad 2010-11-22

³⁴ Sundström, B. Institutionen för hållfasthetslära KTH, 1999, *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*, s. 374

³⁵ Information från Lars Lindberg (FMV)

³⁶ ”brons, legering av koppar och andra metaller, vanligen tenn.” <http://www.ne.se/brons> hämtad 2010-11-12

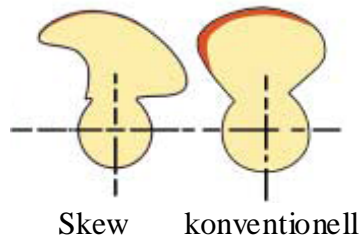


Bild 3.2 Visar skillnad i generell utformning av propellerblad. Genom att dra ut bladens topp ”Skewing” kan man reducera ner vibrationer och ljud till ett minimum.³⁷



Bild 3.3 Fembladig variabel pitch propeller från Wärtsilä Lips Defence, designad för fregatt³⁸



Bild 3.4 Sjubladig fast propeller på ubåt (skiss)³⁹

Propellrar återfinns också som bogpropeller placerad i fören på många av fartygen i FM. Bogpropellern sitter i en tvärgående tunnel och kan därför inte användas vid hög fart, då vattengenomströmningen blir för dålig. Bogpropellern är avsedd

³⁷ <http://www.dieselduck.ca/machine> hämtad 2010-10-20

³⁸ http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/marine_news/2003_1/gangler.pdf hämtad 2010-11-10

³⁹ <http://www.kocku.ms.se/produkter-tjanster/marin-teknik/kraft-och-framdrivning> hämtad 2010-11-10

att användas vid olika manövrar och då huvudsakligen vid förtöjnings- och losskastningsmanövrar.

Ett problem som roterande propellrar medför är kavitation. Kavitationen ger upphov till både hydroakustisk signatur för fartygen samt kan ge skador på propellerblad och impellrar. Kavitation beskrivs mer utförligt i kapitel 4.3 *Kavitation*.

Impellrar sitter placerade i slutet av den vattentrumma på fartygets undersida där vattnet kommer in och med impellerns hjälp sedan trycks ut längst bak genom en dysa (placering av impeller är inringad på Bild 3.6 och 3.7). Det kan liknas vid en pump i dess enkla funktion. Impellrar liknar mer turbinblad än propellerblad och bildar en eller flera ringar av impellerblad utformade för att effektivast möjligt suga in vatten i trumman och framförallt trycka ut vatten bakåt (Bild 3.5.).



Bild 3.5 Exempel på impeller till vattenjet⁴⁰

Framdriften sker genom den reaktionskraft som skapas när vattnet accelererar ut genom dysan. Backmanöver sker genom att fälla ner en skopa (kan konstrueras på olika sätt) vilken får vattenströmmen att ledas framåt (Bild 3.6 och 3.7). Oavsätt framfart eller backmanöver roterar impellrarna åt samma håll för att suga in vatten och trycka ut vattnet och då kan det bildas för impellern skadlig kavitation, dock inte i samma omfattning som för propellrar, enligt Lars Lindgren (FMV: AK Sjö).

⁴⁰ <http://polarispwcknowledge.shorturl.com/first-things-to-do/keeping-your-polaris-pwc-on-the-water/jet-pump> hämtad 2010-10-12

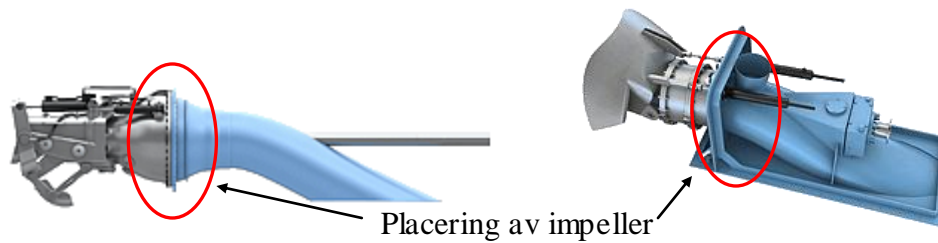


Bild 3.6 Kamewa S3-series Rostfritt stål⁴¹

Bild 3.7 Kamewa FF-series Aluminium konstruktion⁴²

Det viktiga är att fartygen inte går utanför sina så kallade kraftuttagskurvor på drivlinan. Om ett fartyg med tre vattenjetaggregat under långa perioder ligger med maximalt gaspådrag på två aggregat för att uppnå en viss fart istället för att ha alla tre aggregaten uppstartade och i drift kan det innebära att dessa två suger mer vatten än dimensionerat i förhållande till fartygets framfart genom vattnet. Detta skapar i sin tur förändrade vattenströmningar runt impellrarna och kan ge upphov till kavitation och därmed skador.⁴³ Se kapitel 4.3 *Kavitation*.

3.3 Summering av kapitel 3

FM fartyg är huvudsakligen propellerdrivna eller vattenjetdrivna, (svävare är inte medtagna i denna studie enligt kapitel 1.4 *Avgränsningar*). Drivlinorna på dessa fartyg omfattar enligt definitionen av drivlina, flera delar som motor, växel, drivaxel mm. De delar jag avser utreda nanostrukturella beläggningar på är propelleraxel och drivaxel till vattenjet, propellrar samt impellrar till vattenjet. Samtliga dessa delar har en egen livscykel som eventuellt går att påverka så att det blir mer motståndskraftiga mot slitage och därmed få en bättre uthållighet och driftsäkerhet.

På ett fartyg finns en eller flera propelleraxlar eller drivaxlar vilka bärs upp på olika ställen av ett eller flera lager. Vid dessa så kallade lagerlägen kan repskador uppstå.

⁴¹ http://www.rolls-royce.com/marine/products/propulsors/waterjets/Stainless/kamewa_s3.jsp
hämtad 2010-11-10

⁴² http://www.rolls-royce.com/marine/products/propulsors/waterjets/Aluminium/kamewa_ff.jsp
hämtad 2010-11-10

⁴³ Information från Jens Tornblad (Rolls-Royce) under samtal 2010-11-29

Propellerblad kan vara olika utformade och ha fast eller variabel pitch vilket medger olika möjligheter till framdrivning. Dock medför propellrarnas rotation i vattnet att det uppstår kavitation, vilket skapar vissa problem och skador.

Impellrar till vattenjetaggregaten är en förutsättning för att kunna suga in vatten i en trumma och sedan trycka ut vattnet genom en dysa. Genom en skopa bakom dysan regleras vattnets riktning vilket möjliggör backmanöver. Även med de roterande impellrarna uppstår kavitation, dock avsevärt mycket mindre än med propellrar.

4 Möjliga förlitningar

Detta kapitel tar upp de områden där jag efter samtal med materialtekniska experter på FMV och Rolls-Royce (Kamewa), uppfattat vara de allvarligaste problemområdena avseende slitage och som dessutom är kostnadsdrivande.

4.1 *Små partiklar som sand etc.*

Sandpartiklar eller andra små partiklar har alltid varit något som FM enheter har utsatts för, oavsett vapenslag. Men exponeringen för detta har i och med utlandsmissioner ökat dramatiskt. För de marina enheterna kan problem uppstå på grund av den högre halten av sandpartiklar och annat skräp som kan finnas i vattenmassorna nära kuster med sandstränder eller där det är relativt grunda vatten över sandbotten. Sanden rivs upp av vågrörelserna och far runt i vattnet, men faller till botten vid lugnare väder. Utanför flodmynningar kan halten av sand-, ler- och andra partiklar markant öka, inte minst i samband med översvämningar. Då följer partiklarna och även större föremål med vattendragen ut. Förutom alla partiklar i vattnet kan sand sugas upp genom trumman till impellarna på vattenjetdrivna fartyg.

Sandpartiklarna kan variera i storlek beroende på miljö. Definitionen av sand enligt nationalencyklopedin är:

*sand, partiklar med en diameter av omkring 0,1–2 mm. Med sand menas även sorterade jordarter som mest består av sandpartiklar.*⁴⁴

Problemet med dessa små partiklar är att de kan tränga in i lager och där skapa repskador på propelleraxlar och själva lagret (mer om lager i kapitel 4.2 Lager). Dessutom kan sandpartiklarna få en icke önskvärd blästrande funktion när de sugas upp i vattenjetaaggaten, vilket kan orsaka materialnötning av impellrar och på dysa, skopa samt trummans insida.

⁴⁴ <http://www.ne.se/sand>, hämtad 2010-11-15

4.2 Lager

Lager finns i olika former och har, som nämnts i kapitel 3, lite olika syften. Genom att lagret ofta skall omfatta en roterande del, exempelvis en axel av någon form, måste den roterande delen kunna glida lätt, det vill säga det skall vara låg friktion. De vanligaste lagertyperna är kullager, rullager och glidlager.

Vanliga typer av lager på våra fartyg är glidlager och vattensmorda lager. För att uppnå den eftertraktade låga friktionen i ett glidlager används olika sorters fett och oljor med varierande viskositet⁴⁵, som sprutas in i lagret för att skapa en hydrodynamisk smörjfilm mellan den fasta lagerdelen och den roterande axeldelen. Oljan eller fettets trycks in i lagret via en nippel och fylls på maskinellt eller manuellt varefter substansen försvinner. Fettet och oljan ger en vattenavvisande (syftande till vattentät) och glatt yta vilket gör det lätt att glida i lagret. Problemet är att substansen samtidigt är ”klibbig” och därmed tacksam för små partiklar att fastna i. Därför behöver det finnas ett litet övertryck i lagret för att undvika inträngning av smuts. De största problemen uppstår när axeln inte roterar. Då är det större risk för att partiklar kan tränga in. Vid uppstart kommer det sedan bli repor på axeln om den inte är skyddad, innan partiklarna malts ner och försvunnit om axeln. Problemen med de vattensmorda lagren är att det kan komma in partiklar genom de håll som skall släppa in vatten. I lagret finns ett material som har låg friktion och det i kombination med vattnet ger den ”smörjande” effekten.

Ett annat problem som kan uppstå är rostbildning i lagerlägen. Inombords kommer rosten oftast efter att högttryckstvätt har använts för att göra rent i utrymmen där axeln finns. Det höga trycket gör att vattnet pressas in mellan axel och lager. Hinner det sedan gå en tid innan maskinerna används kommer korrosion att uppstå, det vill säga det börjar rosta. Rosten skapar då en ojämn yta som sliter på

⁴⁵ ”viskositet, mått på hur trögflytande en fluid (gas eller vätska) är. Exempelvis har sirap större viskositet än vatten. Viskositet härrör från inre friktion och motverkar hastighetsförändringar mellan skikt för fluid i rörelse.” Källa: <http://www.ne.se/viskositet> hämtad 2010-11-19

lagret när axeln roterar. Det innebär att det blir otätt och fler partiklar kan komma in och leder slutligen till att axeln kan skadas. Blir skadorna för omfattande kan axeln behöva bytas, med följd att fartyget troligtvis måste dockas in och tillgängligheten på fartyget minskas.

4.3 Kavitation

Kavitet är benämning på en hålighet, således är kavitation en beskrivning på att det uppstår hålrum. En definition på detta är enligt nationalencyklopedin:

”kavitet, hålighet, hålrum, fackterm inom flera områden, bl.a. om mikrometerstora hålrum som bildas i kristallina material vid plastisk deformation. Kan utgöra förstadier till brott⁴⁶

När propellrar eller impellrar roterar i vattnet uppstår det kavitation. Kavitation uppenbarar sig i form av gas-, eller om man så vill, ångblåsor på propeller- och impellerbladen. Ångblåsor på propellerblad syns tydligt på Bild 4.1.



Bild 4.1 Kavitation vid utprovning av en fartygspropeller. Kavitationsblåsorna bildar spiralformade banor som följer strömningslinjerna i vätskan efter propellen.⁴⁷

Blåsorna uppstår när propellern roterar och det bildas strömningar i vattnet. När strömningshastigheten ökar sjunker trycket i vattnet och blir lägre än vattnets ångtryck. I och med detta kokar vattnet och blåsor uppstår. Man kan med andra ord säga att kavitation innebär att vattnet kokar alldeles invid bladet. När så vattnets tryck ökar igen faller blåsorna samman, dvs. de imploderar. Vid

⁴⁶ <http://www.ne.se/kavitet> hämtad 2010-11-10

⁴⁷ <http://sv.wikipedia.org/wiki/Kavitera> hämtad 2010-10-20

implosionen genererar vattnet en jetström mot propellerbladet, vilket visas på Bild 4.2. Det kan liknas vid en mekanisk påverkan på ytan av bladet.

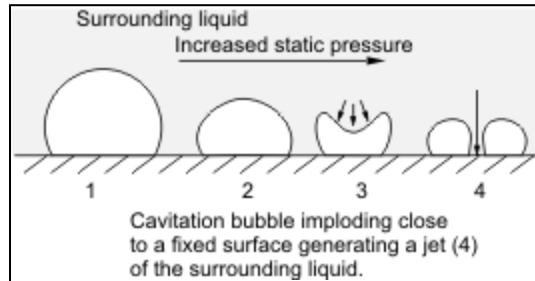


Bild 4.2 Implosion av ångblåsa⁴⁸

Kavitationsblåsorna ger då upphov till skador på bladen, ofta vid bladroten och som ett band en bit in från ytterkanten på bladet. Skadorna blir mycket små hål (kaviteter) i godset eller ytbeläggningen på bladet som med tiden blir större och större. Det beskrivs som att godset eroderar bort.⁴⁹ Beroende på hur mycket kavitation som uppstår och hur länge det fortgår samt materialets eller ytbeläggningens brottgräns, blir skadorna mer eller mindre allvarliga. Konsekvensen kan dock bli hål rakt genom godset med bladbrott som följd om propellern/bladet inte byts i tid. Byte av propeller innebär då indockning av fartyget och minskad tillgänglighet under en period.

Bogpropellrar klarar sig inte heller från kavitation. Det är snarare ett stort problem just för bogpropellrar. En anledning till att omfattande kavitation uppstår för bogpropellrar kan vara tunnelns utformning, på grund av hur vattenströmningarna går i den trånga tunneln. Det finns exempel på erosionsproblem på bogpropeller gjord av aluminium, där försök nu görs med att ytbehandla med specialgjord epoxi, där bladen måste slipas ner i godset för att sedan byggas upp med epoxin.⁵⁰ Kan kanske en nanostrukturell ytbeläggning vara ett effektivare alternativ?

⁴⁸ <http://sv.wikipedia.org/wiki/Kavitation> hämtad 2010-10-20

⁴⁹ <http://www.marin.nl/web/Issues/Propulsion/Cavitation.htm> hämtad 2010-11-15

⁵⁰ Information från Lars Lindgren, FMV AK Sjö under telefonsamtal 2010-11-16

Kavitation uppstår i alla vattentyper, om det är söt-, brack- eller saltvatten spelar ingen roll. Men ett fysikaliskt förhållande som är intressant med tanke på att FM nu opererar, och sannolikt ska fortsätta operera, utanför vårt närområde och i varmare vatten, är att vattentemperaturen har inverkan på kavitation. Tabell 4.1 nedan visar att ju högre temperatur vattnet har desto högre är ångtrycket. Det innebär att trycket i varmt vatten snabbare sjunker under ångtryckgränsen, som i sin tur innebär att kavitation uppstår tidigare. Operationer i varmare vatten ökar med andra ord risken för skador beroende av den kavitation som uppstår. Eftersom FM ska öka sin expeditionära förmåga blir det således allt viktigare att skydda de för kavitationsskador utsatta delarna.

Temperatur vatten (°C)	Ångtryck vatten (kPa)
5	0,9
10	1,2
15	1,7
20	2,3
25	3,2
30	4,3

Tabell 4.1 Vattentemperatur och ångtryck⁵¹

4.4 Slutsatser kapitel 4

Det finns olika anledningar till att det blir förslitningar på de delar av marina drivlinor som är utvalda i denna studie. Olika partiklar som sand kan orsaka nötningskador genom en blästrande effekt på skopa och dysa som kan komma att behöva bytas. Partiklarna kan även, om de tränger in mellan lager och propelleraxlar; orsaka repskador på axlarna. Korrosion på axlarna, särskilt i lagerlägen kan skada både lager och axlar. I förlängningen innebär det att axlarna måste plockas ur och inspekteras samt eventuellt repareras, vilket troligtvis innebär indockning av fartyget. Att docka in och torrsätta fartyg är både kostsamt

⁵¹ http://www.engineeringtoolbox.com/cavitation-d_407.html hämtad 2010-11-10

ur ett tidsperspektiv och ett ekonomiskt perspektiv. Dessutom minskar tillgängligheten på fartyget under en period, vilket kan skapa problem för verksamheten. Ett exempel på det är HMS Trossö uppkomna behov av reparation av propelleraxellager i inledningen av missionen i Adenviken 2009 (Marinens insats i EU NAVFOR 01 (ME01)).⁵² Om en nanostrukturell ytbeläggning visar sig vara motståndskraftig mot repsskador kan underhållskostnader reduceras.

Den kavitation som uppstår genom tryckförändringarna i vattnet när propellern eller impellern roterar i vattnet blir ett allvarligt problem, då resultatet är att det eroderar bort gods i huvudsak på propellrar men även i viss mån på impellrar. Det kan driva upp underhållskostnader med byten av propellrar och impellrar. Om det går att belägga bladen med ett slagåligt skikt som klarar av den höga påfrestningen av kavitation, kommer livslängden antagligen öka och då kan underhållskostnader även i detta avseende komma att minska.

⁵² http://www.koms.se/ul_pdf/401_Magnus.pdf

5 Nanoforskning

Hur ser nanoforskningen ut inom ytbeläggningsområdet? Hur långt har forskningen kommit och kan jag se att det gagnar FM inom det specifika område studien ska utreda?

Genom sökning av information på Internet samt i litteraturen, kan det konstateras att det pågår en hel del forskning om olika ytbeläggningar av nanostrukturell natur. Det är allt från självsanerande, absorberande till slitstarka ytor som forskningen vaskar fram. Det finns en tydlig civil marknad som trycker på, men även en hel del militärrelaterad sådan, då de ekonomiska vinsterna i dessa neddragningstider är intressanta för alla kunder. Redan år 2000 skrev L. T. Kabacoff vid Office of Naval Research (ONR) en artikel där han tar upp att U.S. Navy spenderar många miljarder dollar på reparation och underhåll samt att mycket av de pengarna specifikt går till reparation eller utbyte av slitna eller eroderade propelleraxlar, lager, cylindrar mm, dvs. delar ur drivlinorna.⁵³ Han menar att nanopreparatens extraordinära egenskaper gör det möjligt att kraftigt reducera dessa kostnader.

De extremt små partiklarna i de nanostrukturella ytbeläggningar jag skriver om omfattas av allt mer forskning. Men just det faktum att det handlar om så små partiklar har fått myndigheterna att yttra en vis oro för nanomaterialens påverkan. I Kemikalieinspektionens (KemI) rapport ”*KemI Rapport 6/07 Nanoteknik – stora risker med små partiklar?*”⁵⁴, nämner KemI att det finns risker med användandet av nanopartiklar i allmänhet samt att det idag inte finns några bra metoder för att undersöka nanomaterial. I en nyare rapport ”*KemI Rapport 1/10 Säker användning av nanomaterial. Behov av reglering och andra åtgärder – rapport från ett regeringsuppdrag*”⁵⁵ uttrycker KemI fortfarande en viss oro för nanopartiklarnas påverkan på människa och miljö. Nyare utrustning för kontroll av nanopartiklarnas

⁵³ Kabacoff, L. T. 2000, *Office of Naval Research Initiative on Wear Resistant Nanostructured Materials*, Arlington, USA

⁵⁴ Kemikalieinspektionens rapport nr 6-07, november 2007

⁵⁵ Kemikalieinspektionens rapport nr 1-10, mars 2010

beteende har dock medfört att KemI nu pratar mer om att införa anmälningskrav för produkter som innehåller nanomaterial och till del reglera användandet, än att bara vara restriktiv med utnyttjandet av nanomateriel. Dock är det värt att nämna en ny artikel i tidningen Ny Teknik som tar upp nya resultat från en studie om hur nanopartiklar tar sig in i kroppen. Enligt studierapporten tar det tre minuter för partiklar upp till 6 nm storlek att ta sig ut från lungorna och in i blodet.⁵⁶ Det är med andra ord värt att följa upp huruvida hantering av nanopartiklarna är förknippat med risker för människor och miljö.

5.1 Nanobeläggningar

Nanostrukturella ytbeläggningar kan appliceras på olika sätt. Ett sätt, som i litteraturen uppges vara väl fungerande, är så kallad termisk sprutning ”Thermal Spraying”^{57,58}. Sprutmetoden kan användas på olika sätt. Varianter som finns är bland annat ”Plasma Spraying”, ”Wire Arc Spraying” och ”Flame Spraying”.⁵⁹ Tekniken är inte ny utan har använts med mikrostrukturella pulver tidigare. Bland annat reparerades en propelleraxel på HMS Trossö med hjälp av termisk sprutning, för en tiondel av kostnaden mot att byta axeln, vilket går att läsa om i FMV:s tidning PROTEC 02-06.^{60,61} Skillnaden mellan de olika pulvren är framförallt nanopulvrets egenskaper på materialet, som hårdhet, seghet mm.

Varianten ”Flame Spraying” som höghastighets flamsprutning (High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)) har använts vid ett forskningsförsök vid University of California⁶² för ONR räkning. I försöket kontrollerades hårdhet samt nötnings- och

⁵⁶ http://www.nyteknik.se/nyheter/innovation/forskning_utveckling/article2508838.ece hämtad 2010-12-02

⁵⁷ Laverina, E.J, 2003. *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings using Thermal Spraying*. University of California, Davis, USA

⁵⁸ Wang, D, et.al, 2008, *Preparation and characterization of nanostructured Al₂O₃-13wt.%TiO₂ ceramic coatings by plasma spraying*, Nanjing, Kina

⁵⁹ <http://www.fst.nl/en/page00031.asp> hämtad 2010-10-30

⁶⁰ http://www.fmv.se/upload/Bilder%20och%20dokument/Publikationer/Informationsmaterial/PROTEC/protec02_06.pdf hämtad 2010-11-29

⁶¹ Information från Peter Granstam (Exova) som var delaktig i reparationen

⁶² Laverina, E.J, 2003. *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings using Thermal Spraying*. University of California, Davis, USA

reptålighet (slitage resistans) på nanostrukturella ytbeläggningar applicerade med HVOF kontra mer konventionell applicering av ytbeläggning. Det står inte vilken appliceringsmetod i rapporten (min anmärkning). För att få till ett preparat i nanostruktur användes ett Top-down förfarande med mekanisk nermalning till nanopartikelpulver. Försöket visade under denna process att olika preparat beter sig olika under malningen och att de första fyra timmarna var avgörande innan preparatets struktur stabiliserades. Vissa preparat fick ökad partikelstorlek medan andra mindre. Att det blev större partikelstorlek berodde på så kallad kallsvetsning (cold welding) uppstod mellan partiklarna. Oavsett om partiklarna blev större eller mindre genomgick de en plastisk förändring, och återfick inte sin ursprungliga form. Efter att ha framställt önskat nanostrukturerade pulver, kunde det ledas in i HVOF apparaturen och appliceras på ett ämne.

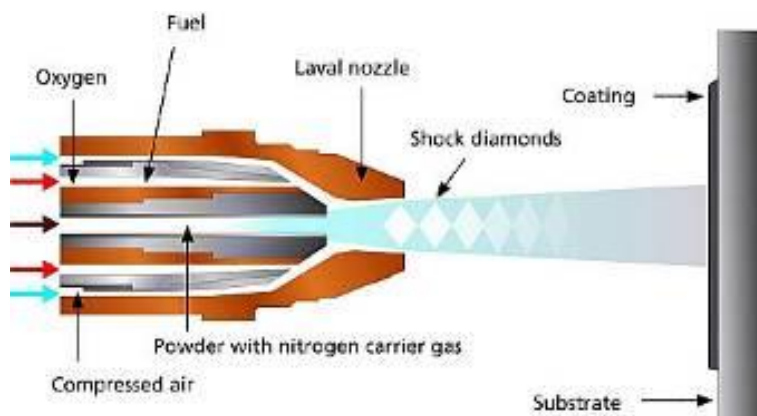


Bild 5.1 Schematisk bild av HVOF⁶³

För att sedan kunna verifiera att beläggningen hade fått rätt struktur användes både svepelektronmikroskop (SEM) och transmissionselektronmikroskop (TEM). Med SEM är det möjligt att se strukturer ner till 1-5 nm i partikelstorlek och med TEM strukturer ända ner till några Ångström (Å).

⁶³ <http://www.fst.nl/en/page00042.asp> hämtad 2010-10-21

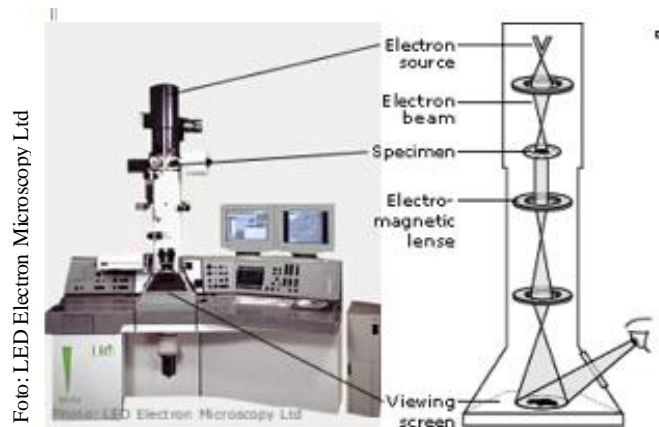


Bild 5.2 TEM utrustning för att kunna se och fotografera nanostrukturer⁶⁴

Beläggningen bestod i detta fall av $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ både i konventionell struktur (mikro) som nanostruktur. För att pröva hårdheten i form av mikrohardhet⁶⁵ (microhardness), på ytbeläggningen utnyttjade forskarna Vickersmetoden⁶⁶ HV_{300} ⁶⁷, där de kunde se en markant ökning från värdet 846 HV_{300} på konventionell $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ ytbeläggning till 1020 HV_{300} på nanostrukturerad $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ ytbeläggning. Det ger en 20,5 % ökning av Vickershårdheten. Dessutom såg forskarna att den nanostrukturella ytbeläggningen påtagligt ökade sin hårdhet inom temperaturspannet 700-900°K (~430-630°C) upp till 1240 HV_{300} jämfört med den konventionella ytbeläggningen på ca: 890 HV_{300} (ej angiven siffra i rapporten), vilket blir en 39 % ökning.

För att omvandla HV-talet vilket mäts i kgf/mm^2 till GPa, som också används för att ange hårdhet, nyttjas nedanstående formel:⁶⁸

$$\text{HV} \cdot 0,009807 = \text{GPa} \quad (1)$$

Det innebär att 1020HV blir $1020 \cdot 0,009807 \approx 10$ GPa och 1240HV blir $\approx 12,2$ GPa.

⁶⁴ <http://nobelprize.org/educational/physics/microscopes/tem/index.html> hämtad 2010-10-21

⁶⁵ ett hårdhetsmått när använd mätsubstans finns i begränsad omfattning, makrohardhet brukar bara benämnas hårdhet. Källa: Steven Savage FOI

⁶⁶ ”skala för hårdhet hos främst metalliska material, beteckning HV. En pyramid av diamant trycks in i materialet, varefter storleken på intrycket avläses.” Källa:

<http://www.ne.se/vickersh%C3%A5rdhet> hämtad 2010-11-10

⁶⁷ HV_{300} innebär att vikten som användes för att belasta pyramiden var på 300kg

⁶⁸ <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/hvconv.htm> hämtad 2010-11-10

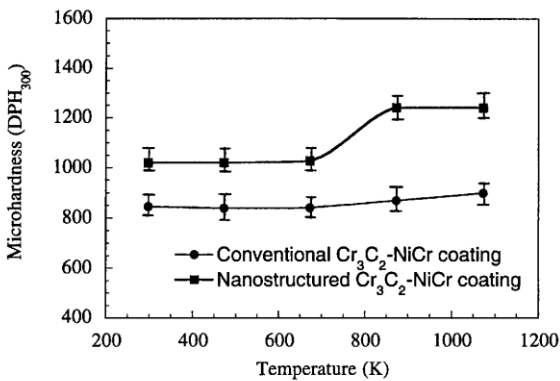


Bild 5.3 Variation av hårdheten beroende av temperaturbehandling⁶⁹

Andra prover mätte även en 28 % -ig ökning av nöttnings- och reptåligheten för den nanostrukturella ytbeläggningen. Vilka prover som genomfördes redovisas ej i rapporten, men en metod som skulle kunna användas är ”Fallande sand metoden” (Falling sand)⁷⁰ enligt Magnus Palm på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Försökets slutsats var att med denna beläggningsteknik och utnyttjandet av nanostrukturella preparat kan ytbeläggningen användas inom ett brett spektrum från värmebarriär på turbinblad till nöttnings- och repskydd på roterande delar.⁷¹

Vid ett annat forskningsprojekt användes mikro- och nanostrukturerat pulver av Al₂O₃-13wt.% TiO₂ vilket applicerades på ett metallsubstrat med hjälp av plasma spraying.⁷² Principen för plasma spraying är snarlik HVOF. I detta försök prövades den nanostrukturella ytbeläggningens egenskaper vid dragspänning och tryckspänning samt dess nöttnings- och reptålighet. Vid försöket mättes även hårdhet (Bild 5.4) och motståndskraft mot sprickbildning (Bild 5.5 och 5.6).

Försöket jämförde två olika nanostrukturella beläggningar (Nano AT, Modified Nano AT) samt den konventionella mikrostrukturerade beläggningen (Metco 130).

⁶⁹ Laverina, E.J, 2003. *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings using Thermal Spraying*. Fig. 7, University of California, Davis

⁷⁰ <http://www.abrasiontesting.com/falling-sand-abrasion-tester.php> hämtad 2010-11-25

⁷¹ Laverina, E.J, 2003. *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings using Thermal Spraying*. Fig. 7, University of California, Davis

⁷² Jordan, E.H.; Gell, M. 2005, *Nano Crystalline Ceramic and Ceramic Coatings Made by Conventional and Solution Plasma Spray*.

Vid försöket användes värdet "critical plasma spray parameter (CPSP)" för att ge uttryck för temperaturen i plasman. Det beräknas genom att mäta effekt delat med gasflöde:⁷³

$$\frac{U \cdot I}{\Phi} = CPSP \quad (2)$$

där U är spänning, I är ström samt Φ är primärgasens flöde

och att hålla övriga parametrar som bärgasflödet, sprutningsavstånd, mängden tillsatt pulver, mm konstanta.

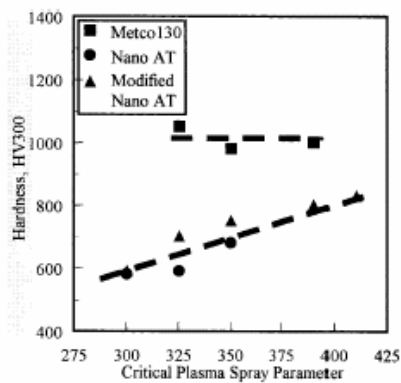


Bild 5.4 Härdhet på beläggningarna beroende av CPSP (temperatur)⁷⁴

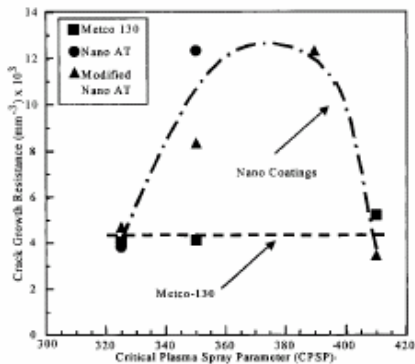


Bild 5.5 Ökning av sprickbildning beroende av temperatur. Visar mycket hög tålighet för nanopreparaten vid viss CPSP⁷⁵

⁷³ Ibid. s. 9-2

⁷⁴ Jordan, E.H.; Gell, M. 2005, *Nano Crystalline Ceramic and Ceramic Coatings Made by Conventional and Solution Plasma Spray*. s.9-4

⁷⁵ Ibid. s. 9-4

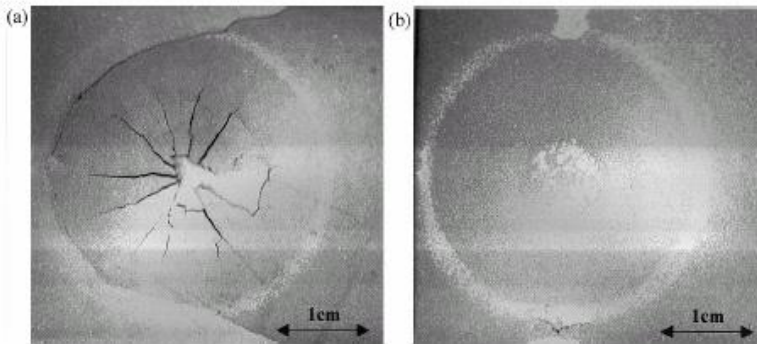


Bild 5.6 Beläggningarnas beteende i så kallad "cup bulge test" (a) Metco 130, (b) nano A-T⁷⁶

Vid ett tredje försök som genomfördes av ONR år 2000, studerades tre områden för ytbeläggningar, kerametaller (Cermets), keramer och metaller.⁷⁷ Olika nanopreparat applicerades genom varianter av termisk sprutning (se sida 31). De två nanopreparaten av kerametall var WC-Co och Cr₄C₃-NiCr, vilka båda visade en genomsnittligt överlägsen vidhäftningsförmåga på underlaget med faktor två jämfört med konventionell ytbeläggning. Även de nanostrukturella keramerna av Al₂O₃ – 18 % TiO₂ och 7YSZ (7 % yttrium stabiliserad zirkonium) visade en vidhäftningsförmåga som var dubbelt så bra jämfört med konventionell ytbeläggning. Avseende nanostrukturerade metaller hade man vid rapporteringstillfället inte hunnit karaktärisera dem.

Sammanställningen av WC-Co (volfram, kol och kobolt) kan enligt Olle Grinder betecknas som en hårdmetall, snarare än kerametall som ONR klassade in den. WC-Co används bland annat i bergsborrar. Den egenskap som framträder genom att mala ner partiklarna i nanostorlek ger en nanostruktur och egenskaper för WC-Co som är både hårdare och segare i kombination än mikrostrukturerad WC-Co. Generellt ser kurvorna hos hårda metaller ut som i diagram 5.1 nedan.

⁷⁶ Ibid. s. 9-6

⁷⁷ Kabacoff. L. T. 2000, *Office of Naval Research Initiative on Wear Resistant Nanostructured Materials*, Arlington, USA

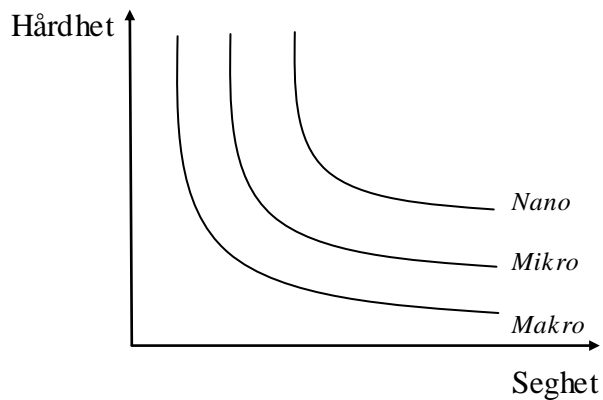


Diagram 5.1 Kurvorna visar ett förhållande mellan seghet och hårdhet hos hårda metaller.⁷⁸

När det gäller vidhäftning av ytbeläggning mot ett underlag är det viktigt att den fungerar på verkliga tillämpningar och inte bara på ett substrat i laboriemiljö. Enligt Boris Zhmud på det relativt nyetablerade svenska företaget Applied Nano Surfaces (ANS), ska det inte vara mer problematiskt att applicera ytbeläggningen på befintlig och kanske något sliten materiel kontra att belägga nyproducerad materiel.⁷⁹ Det gäller att ytan är ordentligt rengjord och kanske även svarvad så att ingen oxiderad yta finns kvar innan applicering.

5.2 Spänning och hårdhet

I de två första försöken som beskrevs i kapitel 5.1 *Nanobeläggningar* angavs resultat för dragspänning och tryckspänning samt hårdhet, för att uttrycka nanopreparatens egenskaper. I detta underkapitel ges en kortfattad redovisning av hållfasthetslära kopplat till drag-, tryckspänning och hårdhet.

Definitionen av spänning i hållfasthetsläran är formeln:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Där F är kraften i newton (N), A är tvärsnittsarean (m^2) och σ (sigma) är spänning mätt i pascal (Pa).

⁷⁸ Fri tolkning av skiss gjord av Docent Olle Grinder PM Technology AB 2010-11-24

⁷⁹ Telefonintervju med Boris Zhmud (ANS) 2010-11-25

Vid belastning sker någon form av ändring i materialet, exempelvis töjning, vilket anges med ε (epsilon). Material har en elasticitetsmodul (E-modul), vilken räknas fram genom att använda Hookes lag:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Där σ är spänning (Pa), ε är töjningen. E mäts i Pa.

Det finns formelsamlingar för olika konstruktionsmaterials E-modul, som exempelvis stål och aluminium (snittvärde E_{ST} är 210 GPa och E_{AL} är 70 GPa).⁸⁰

Spänningen (σ) i materialen benämns *Dragspänning* då materialet sträcks ut av en kraft (F) och *Tryckspänning* är när materialet trycks ihop av en kraft.

Dragspänning är positiva värden ($\sigma > 0$) och tryckspänning negativa värden ($\sigma < 0$). Användbara begrepp vid hållfasthet är även *Flytspänning* som är när materialet går från linjärt till plastiskt tillstånd och *Brottspänning* när materialet brister.

För att bestämma hårdheten i ett material, vilket kan definieras:

hårdhet, mått på ett materials förmåga att motstå formförändring.⁸¹

används olika metoder, varav Vickersmetoden är en av dem. En standard som används för Vickerstest är EN 23878 (ISO 3878).⁸² Med dessa metoder kan man göra en *Plastisk hårdhetsmätning* som innebär att materialet inte återfår sin ursprungliga form efter mätningen.⁸³

⁸⁰ Sundström, B. Institutionen för hållfasthetslära KTH, 1999, *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*, ff. 372-377

⁸¹ <http://www.ne.se/h%C3%A5rdhet> hämtad 2010-11-13

⁸² http://standards.mackido.com/en/en-standards24_view_4698.html hämtad 2010-11-29

⁸³ <http://sv.wikipedia.org/wiki/H%C3%A5rdhet> hämtad 2010-11-13

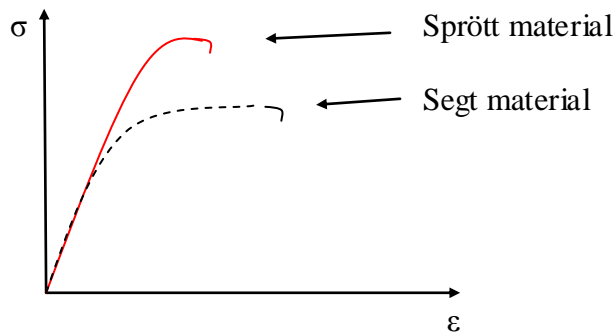


Diagram 5.2 Kurvorna visar skillnaden på spröda och sega material innan de brister.

Där σ = spänning och ϵ = töjning

Högt värde på σ innebär att materialet har hög brottstyrka emedan högt värde på ϵ innebär hög brottöjning. Det är svårt att få ett material med höga värden på båda.

5.3 Slutsatser kapitel 5

De första två redovisade försöken i studien uppvisar resultat på att nanostrukturella ytbeläggningar i många avseenden innehar en hög hårdhet samt god tålighet mot nötning, repor och sprickbildning. Försöken visar även att det är svårt att kombinera alla egenskaper. Att få både hårdhet och seghet tycks det vara svårt för nanopreparat, men i förhållande till mikropreparat är värdena för nanopreparat betydligt bättre i enskild mätning av egenskap och i kombination av egenskaper.

I det tredje försöket framhövs den överlägsna vidhäftningsförmågan för nanostrukturella ytbeläggningar. Det är viktigt att ytbeläggningen kan fästa på underlaget om underhållet ska kunna reduceras. I de första två försöken skrevs det inte något om vidhäftningen på underlagen, vilket jag tolkar som att det inte har varit några problem med detta.

I alla försöken användes en termisk sprutningsmetod för att applicera preparaten på ett substrat av metall. Bilderna 5.4–5.6 visar också tydligt att särskilt nanopreparaten kan få väldigt varierande egenskaper beroende av temperatur. Vid applicering eller efterbehandling är det således viktigt att kontrollera temperaturen för att rätt egenskaper ska framträda för ändamålet med ytbeläggningen.

6 Troligt resultat av den nanostrukturella ytbeläggningen

Det finns flera forskningsrapporter som pekar på att nanostrukturell ytbeläggning har många fördelar jämfört med, det man numera kallar, konventionell mikrostrukturerad ytbeläggning. Det verkar genom forskning finnas tillräckliga belägg för att nanostrukturella preparat ger ökad nötnings- och reptålighet, ökad tolerans mot värme, ökad tålighet mot drag- och tryckspänning med mycket god motståndskraft mot sprickbildningar i ytan samt med vissa nanopreparat även en markant ökad hårdhet.

Alla dessa egenskaper går dock inte riktigt att få på en gång, utan det måste ske ett val av egenskaper som passar just den del som är avsedd att beläggas.

Appliceringsmetoderna med plasma spraying och HVOF är väl kända och det torde därför inte vara problematiskt att få arbetet utfört. Det är dock många parametrar som ska stämma vid applicering, där temperatur är en viktig parameter.

6.1 Resultat på propelleraxel och drivaxel till vattenjet

Avseende slitage på propelleraxlar, så är det vid axelns lagerlägen som problemen huvudsakligen uppstår. Om lagret missköts med orena oljor i glidlager eller att det i vattensmorda lager kommer in sand- eller andra partiklar, kan det bli omfattande repskador. Det behövs med andra ord en beläggning som klarar av detta slitage.

De forskningsresultat jag funnit visar på att man med fördel kan använda nanostrukturella ytbeläggningar för detta ändamål. Det är framför allt nötnings- och reptåliga ytbeläggningar som bör kunna minska slitaget på axlarna.

Det verkar inte heller finnas några hinder för att belägga befintliga axlar, dvs. det är inte bara vid nyproduktion ytbeläggningen kan appliceras. Huruvida det kan bli lika effektivt på gamla axlar visar inte denna studie.

Det finns praktiska exempel från US Navy (se Bild 6.1), där man har belagt en propelleraxel med nanostrukturell ytbeläggning och att det efter fyra års användning inte finns visuella skador. Bilderna har använts av såväl amiraler som olika forskarlag för att just påvisa nyttan med denna typ av nanostrukturell ytbeläggning.



Bild 6.1 Propelleraxel utan och med nanostrukturell ytbeläggning

Nyare foton tagna på NSWC av Dr. K. Scandell visar en propelleraxel med nanobeläggning efter sju års användning, (se Bild 6.2). Inte heller här kan någon skada ses visuellt och efter genomförda mätningar konstaterades att diametern på axeln var densamma som när beläggningen var ny.⁸⁴



Bild 6.2 Propelleraxel med nanobeläggning. De tolv fästpunkterna är till för att genomföra dragtester i syfte att mäta dragspänning på ytbeläggningen.

⁸⁴ Information från Dr. Kenneth Scandell (NSWC)

6.2 Resultat på propellerblad/impeller till vattenjet

När det gäller propellarar så är det framförallt kavitation som skapar problem. Det finns inget forskningsresultat i studien som pekar på att en ytbeläggning kan få bort kavitationen som uppstår, men beläggningen kan eventuellt begränsa skadeverkningarna av kavitationen. Det finns nanopreparat som uppvisar en ökad hårdhet och samtidigt en följsamhet utan sprickbildning som gör det möjligt att följa med de svängningar som finns i propellerbladen när propellern roterar. Hårdheten och följsamheten borde kunna vara mer motståndskraftigt mot den mekaniska kraft som är resultatet av de imploderande gasblåsorna, dvs. kavitationen. Det pågår försök att minska skadeverkningarna av kavitation på olika fabriker, men jag har inte kunna hitta något om nanopreparat i det sammanhanget.

Avseende vattenjetaggregat så är det inte impellern som verkar vara i störst behov att skyddas, utan trumma, dysa och skopa är i större behov av en nöttålig yta. Det är med andra ord inte kavitation utan blästring av materialet, med de partiklar som finns i vattnet, som ytbeläggningen ska skydda mot. Även här visar forskningen att det finns nanopreparat som tycks kunna avhjälpa det slitaget i form av att besitta en hög nötningsållighet.

6.3 Slutsatser kapitel 6

Nanostrukturell ytbehandling har goda förutsättningar att kunna reducera slitaget på axlar, propellarar och vattenjetaggregat. Det är i sammanhanget troligtvis olika nanopreparat som behövs, då olika egenskaper efterfrågas som skydd mot slitage.

Praktiska prov visar att det är möjligt att skydda propelleraxlar med nanostrukturell ytbeläggning. Det finns dock inte i den litteratur jag hittat något om att belägga propellerblad med denna typ av beläggning för att minska kavitationsskador. Baserat på de försök med nanopreparat jag har studerat samt den information jag fått via telefonsamtal och intervjuer, gör jag bedömningen att det borde fungera att skapa ett tillräckligt starkt skydd på propellarar mot kavitationsskadorna.

7 Militär nytta med nanostrukturerad ytbeläggning

FM materielförsörjningsstrategi ger vid handen i sitt första stycke att Sverige i första hand inte ska utveckla egen materiel, utan ska se vad som finns på marknaden och i andra hand utveckla tillsammans med andra nationer.⁸⁵ Mina efterforskningar visar att det finns en del företag på marknaden, nationellt och internationellt, som erbjuder nanostrukturella ytbeläggningar på diverse material. Det är allt från att skapa en yta med extrem låg friktion till att skapa hårda och reptåliga ytor. Ur ett FM perspektiv skulle en hård och repfri yta som dessutom har låg friktion för att undvika onödiga energiförluster vid rörelse i lager mm, vara ett utmärkt alternativ. Det är ur ett kostnadsperspektiv värt att följa upp vad som finns att tillgå på marknaden i detta avseende. Dessutom pågår det en del forskning relaterad till militär verksamhet i länder som USA och Nederländerna om vad nanostrukturella ytbeläggningar kan göra för nytta.

Det är dyrt med underhåll av FM marina enheter. Av de i FM budgeterade pengarna för underhåll, läggs en hel del på reparation och byten av slitna delar. Genom att kvalitetshöja systemen FM anskaffar kan kostnaderna minska. En sådan kvalitetshöjning kan vara att belägga utsatta ytor och få ett minskat slitaget på drivlinorna och därmed få dem mer driftsäkra och öka deras livslängd till ett lägre pris, dvs. bättre LCC för systemet. En del av driftsäkerheten ligger i att minska risken för kavitations-skador under långa operationer i varmare vatten samt att undvika nötnings- och rep-skador på grund av förhöjda partikelhalter. Dessutom är det dyrt och utrymmeskrävande att frakta stora reservdelar som propellerar och drivaxlar till operationsområden utanför vårt närområde.

Detta har uppmärksammats av FMV som sedan några år tillbaka har en arbetsgrupp som ser över hur reparationer ska minska kostnader för FM.⁸⁶

⁸⁵ HKV, 2007. *Strategi för Försvarsmaktens materielförsörjning*, Stockholm, Bilaga s. 2

⁸⁶ http://www.fmv.se/upload/Bilder%20och%20dokument/Publikationer/Informationsmaterial/PROTEC/protec02_06.pdf hämtad 2010-11-30

Arbetsgruppen benämns ”AG Reparation av FM-materiel” och har fyra undergrupper. Inom gruppen finns bland annat kunskaper om termisk sprutning och vilka fördelar det kan föra med sig, dock är den nya dimensionen med nanostrukturella ytbeläggningar för detta ändamål inte utforskad eller prövad i FMV regi.⁸⁷

Möjligheten att skydda de i studien nämnda delarna på drivlinor ger troligtvis ett högre MTBF vilket är eftersträvansvärt, inte minst med tanke på att det kan vara svårare att kunna reparera och underhålla enheter som är ute på mission. Men även när enheterna opererar i närområdet slits drivlinedelar. Tillgängligheten på varje enskild enhet under mission är av yttersta vikt då det ofta är ett begränsat antal som deltar och redundansen blir således sämre. Det är dock minst lika viktigt att enheterna har hög tillgänglighet vid verksamhet i svenska farvatten och i närområdet. Därmed ser jag en stor militär nytta med att använda dessa ytbeläggningar genom att den operativa tillgängligheten kan ökas samt att kostnaderna för underhåll kan reduceras.

⁸⁷ Information från Fredrik Hyllengren (FMV:AK Gem)

8 Slutsatser och diskussion

De viktigaste slutsatserna dragna från studien är:

- att nanostrukturella ytbeläggningar kan fungera som skyddande lager på utsatta delar av de marina drivlinorna som propelleraxlar, drivaxlar, propellrar, impellrar och andra utsatta delar i vattenjetaggregaten,
- att det är viktigt att få rätt temperatur vid applicering av ytbeläggningen och
- att med rätt applicering kan vidhäftningsförmågan hos nanostrukturella ytbeläggningar vida överstiga de konventionella ytbeläggningarna.

Eftersom det är olika typer av påverkan på drivlinornas delar som ger slitage eller skador, behövs olika egenskaper hos ytbeläggningarna. På propeller- och drivaxlarnas lagerlägen behövs reptåliga ytor, på propellerbladen behövs hårdare ytor för att stå emot kavitationsskador och i vattenjetaggregaten (dysa, skopa och insugs trumma) behövs en nötningstålig yta.

De forskningsresultat som redovisats i studien visar att man får fram alla dessa egenskaper med nanopreparat, om dock inte alla egenskaper med samma nanopreparat. Dessa egenskaper har sedan tidigare gått att få fram med mikropreparat också, men nanopreparaten ger bättre värden och tycks ha bättre förmåga att kombinera egenskaper som hårdhet, seghet och bra värden för drag- och tryckspänning.

8.1 Svar på frågeställningen

Två frågor ställs i kapitel 1.3 *Frågeställning* som ska besvaras med studien. Den första frågan ”*Vilken påverkan har nanostrukturell ytbeläggning på de delar av marina drivlinor jag valt i studien?*” besvaras med att sådan beläggning med stor sannolikhet kan skydda propelleraxlarnas utsatta del vid lagerlägen mot nötning- och repskador. Den forskning jag läst stöder detta och det finns dessutom praktiska exempel från U.S. Navy på att det fungerar på avsett sätt. Därmed skulle en sådan ytbeläggning kunna förlänga livslängden på axlarna och ge en bättre LCC och

även kunna minska såväl tid som kostnader för underhåll i form av reparation och utbytesdelar.

Propellerblad och impellrar kan troligtvis beläggas med ett skyddande lager av nanostrukturell ytbeläggning mot erosionsskador som uppstår vid kavitation vilket är ett stort problem. Beläggningarna tycks vara tillräckligt hårda för att det ska fungera, men ändå följsamma med liten risk för sprickbildning. Även i detta område finns det förutsättningar för en bättre LCC och besparingar avseende underhållskostnader.

Avseende vattenjetaggregatets skopa, dysa och insugs trumma, framkom det i studien att dessa områden är mycket påverkade av nötningsskador och har behov av att skyddas. Studien visar att man med nanostrukturell ytbeläggning borde kunna få ett bra skydd på dessa ytor då ytbeläggningarna uppvisar god nötningstålighet.

Den andra frågan *Kan en nanostrukturell ytbeläggning appliceras på äldre drivlinor som inte har den från början och vilka kriterier måste då vara uppfyllda?* besvaras med att det med stor sannolikhet går att applicera nanostrukturell ytbeläggning på befintliga delar även om de är använda. Grundläggande kriterier är att de delar som ska få en beläggning måste vara ordentligt rengjorda och fria från oxiderad yta. Avseende axlar behövs det troligtvis svaras bort ett tunt lager gods för att sedan bygga på med ytbeläggningen.

8.2 Förslag på fortsatta studier/forskning

I Sverige bedrivs det en hel del forskning om nanostrukturella ytbeläggningar på högskolor, universitet och vid FMV samt FOI. Dock har jag inte hittat någon dokumentation om att detta kopplats ihop med FM verksamhet då det gäller drivlinor eller skydd för de drivlinor som min studie behandlat. Här tycker jag att det finns utrymme för fortsatta studier och forskning.

Värt att notera är KemI rapporterna och nya studier om huruvida nanopartiklar är farliga för människan. Detta måste tas i beaktande så att hela logistikkedjan med förvaring, hantering vid underhållsarbeten och kassering/skrotning finns med i underlagen. Studier kring detta är på sin plats innan FM börjar använda nanostrukturella ytbeläggningar.

Det bör undersökas om det finns fler områden i de marina drivlinornas delar som kan beläggas med nanostrukturerad ytbeläggning. Många delar är ju dessutom likartade oavsett om det är fartyg, flyg eller fordon de sitter i, vilket kan ge en samordningsvinst för alla. Ett sådant drivlineområde är motorn. Företaget Applied Nano Surfaces (ANS) säger sig fått fram nanostrukturell beläggning av volfram disulfid (WS_2), med otroligt låg friktion och med förmågan att binda oljor i ytan och dessutom vara mycket värmebeständigt.⁸⁸ Om WS_2 är värmebeständigt nog för att kunna beläggas på kolvar i motorerna för att reducera friktion och därmed förslitningsproblem, borde det minska bränsleförbrukningen om kolvarna kan löpa med lägre friktion. Detta kanske även skulle kunna vara till stor nytta i lagerlägen för oljefyllda glidlager.

Ett annat drivlineområde, som inte utretts i denna studie är växlar. I växlar slits materialet hårt i kuggsystemen. En hård yta med liten friktion kan kanske hjälpa till att öka livslängden på delarna i växeln.

Studien har tittat på problematiken vid lagerlägen för olika axlar. Att belägga själva axeln med nanopreparat tycks fungera. Men om det även går att belägga lagerdelen i vattensmorda lager och om det ger någon effekt bör studeras.

Det finns redovisat försök som säger att vidhäftningen av nanostrukturell ytbeläggning på underlag av metall är exceptionellt god. Dessutom har jag fått fram information om att det troligen går att applicera nanostrukturella

⁸⁸ <http://www.appliednanosurfaces.com/offering.html> hämtad 2010-11-08

ytbeläggningar på befintlig materiel. Dock bör FMV/FOI undersöka hur god vidhäftningen är på exempelvis propellrarnas bronslegering och aluminiumdelar i vattenjetaggregat eller områden kring bogpropellertunnlar. Även andra områden under vattenytan kan vara av intresse att skydda, exempelvis kylvatten intag.

Det är också värt att följa upp den pågående forskningen kring slittåliga nanoitor mot isbeläggning, som samordnas av Ytkemiska Institutet (YKI). Om detta skriver Tidningen NyTeknik i en artikel publicerad på nätet den 6 oktober 2010.⁸⁹ Resultatet av denna forskning kan leda till att ytbeläggningen kan appliceras på luftintagsgaller, delar kring svävarnas propellrar samt vingor och rotorblad på flyg och helikoptrar. Allt detta tycker jag har bärighet mot framdrivningssystem.

⁸⁹ http://www.nyteknik.se/nyheter/innovation/forskning_utveckling/article2484943.ece hämtad 2010-12-02

9 Sammanfattning

Studien har syftat till att utreda om nanostrukturell ytbeläggning kan användas som skydd mot slitage på några få utvalda delar av marina drivlinor, nämligen propelleraxlar, drivaxlar till vattenjetaggregat, propellrar och impellrar i vattenjetaggregatet.

Studien redovisar grundfakta om nanoteknik för att få en kunskapsuppbyggnad om den nomenklatur som används av forskarna samt var nanostrukturella ytbeläggningar finns inom nanotekniken.

Därefter redovisas fakta om de delar av marina drivlinor som används i studien samt på vilket sätt och av vilka anledningar de kan komma att slitas. Denna redovisning syftar till förståelse för delarnas utsatthet och var det kan vara möjligt att använda nanopreparat som ytbeläggning för att uppnå ett skyddande lager.

I studien påvisas, med olika forskarrapporter som grund, att forskning om nanostrukturell ytbeläggning pågår och att dessa ytbeläggningar brukas av såväl militära som civila intressenter. För att skydda drivlinornas delar behöver ytbeläggningen ha ett antal egenskaper. De eftertraktade egenskaperna är hårdhet, höga värden på drag- och tryckspänning samt god nötnings- och reptålighet. Forskningen visar att för de flesta av dessa egenskaper överträffar ytbeläggningar av nanopreparat de konventionella ytbeläggningarna av mikropreparat. Dessutom visar försök att även vidhäftningsförmågan med nanopreparat mot ett underlag vida överträffar vidhäftningen med mikropreparat mot motsvarande underlag.

Resultatet av studien visar att det går att använda nanostrukturerade ytbeläggningar för att uppnå ett skyddande lager på utsatta delar av de marina drivlinorna som propelleraxlar, drivaxlar till vattenjetaggregaten, propellrar, impellrar och även dysa och skopa på vattenjetaggregaten. Med det resultatet som grund hävdar jag i studien att det är av stor militär nytta att använda nanoteknik för

att reducera underhåll och därmed underhållstider och kostnader samt få ökad tillgänglighet på fartygen.

I slutet av studien ges en del förslag till fortsatta studier/forskning.

10 Författarens tack

Ett stort tack vill jag rikta till Steven Savage (FOI). Steven har gett mig mycket bra hjälp och stöd med studien genom diskussioner runt nanoteknik och hjälp med att få tag i rätt litteratur. Steven har även på ett förtjänstfullt sätt hjälpt till att tolka forskningsrapporterna om nanostrukturella ytbeläggningar.

Jag vill också tacka Jens Tornblad (Rolls-Royce) och Lars Lindgren (FMV) för värdefull information kring drivlinor och deras problemområden, Fredrik Hyllengren (FMV) och Docent Olle Grinder (PM Technology AB) för diskussioner om materialteknik samt Boris Zhmud (ANS) och Peter Granstam (Exova) för information om applicering av nanostrukturella ytbeläggningar. Därtill vill jag tacka Dr. Lawrence T. Kabacoff (ONR) och Dr. Kenneth Scandell (NSWC) för information samt tillgång till fotografier från deras provförsök med nanostrukturella ytbeläggningar hos U.S. Navy.

Även till mina handledare Stefan Silfverskiöld och Peter Bull vill jag rikta ett tack för värdefulla kommentarer, förslag på var jag kunde finna underlag till studien och diskussioner kring mitt ämnesval.

11 Käll- och litteraturförteckning

Litteraturen presenteras så långt som möjligt i den ordning som de har använts i studien. Det gäller även Internetkällor.

Litteratur:

- Försvarmakten, 2005. Doktrin för gemensamma operationer (DGemO), Stockholm, M7740-774003
- Berg, M, 2009. *Självsanerande ytbeläggning i nanostruktur - är det möjligt att applicera på elektrooptiska sensorer och till vilken nytta?* Försvarshögskolan, Stockholm
- INCOSE, 2010. *Systems Engineering Handbook*, Version 3.2, San Diego CA, USA, INCOSE-TP-2003-002-03.2
- Regeringskansliet, 2009. *Regeringens proposition 2008/09:140 Ett användbart försvar.* (Prop. 2008/09:140)
- HKV, 2010. *Försvarmaktens Utvecklingsplan 2011-2020 (FMUP 2011)*, Bilaga 1 HKV beteckning 23 320:51391.
- Lövestam, G, et al, 2010. *Considerations on a Definition of Nanomaterial for Regulatory Purposes.* European Commission, Joint Research Center, Luxemburg
http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_201007_nanomaterials.pdf
- Jordan, E.H.; Gell, M. 2005, *Nano Crystalline Ceramic and Ceramic Coatings Made by Conventional and Solution Plasma Spray.* Publicerad i *Nanomaterials Technology for Military Vehicle Structural Applications* (pp. 9-1 – 9-20). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-122, Paper 9. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA469470&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>

- Ignatov, A et al 2009, *Microscopic Strain Mapping in Nanostructured and Microstructured Alumina-Titania Coatings Under 4-point Compressive and Tensile Bending*, Rutgers University, Piscataway, New Jersey
<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA526223&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>
- Laverina, E.J, 2003. *Synthesis and Behavior of Nanostructured Coatings using Thermal Spraying*. USA <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA411113&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>
- Vetenskapsrådet, 2007. *Där guld glimmar blått*, Stockholm, ISBN 978-91-7307-113-0 (fotnot 17)
- Ramsden, J, 2009. *Nanotechnology*, Ventus Publishing ApS, ISBN 978-87-7681-418-2
- FOI, Jan-Ivar Askelin, Framsyn nr 2-2002, *Storheten sitter i litenheten*.
- Blossey, R, 2003. *Self-cleaning surfaces – virtual realities*, i artikelserien *nature materials VOL 2, may 2003*
- Frank Simonis & Steven Schilthuisen, *Nanotechnology innovation opportunities for tomorrow's defence*, (September 2005, TNO Science & Industry)
- Ohtera, K. et al, 1997, *Development of new nanostructure aluminum alloys "GIGAS" with high strength and superplasticity*, Japan. Artikel publicerad i *Materia Japan (Japan)*. Vol. 36, no. 6, pp. 634-636. 1997, ISSN 1340-2625
- Sjöfartverkets författningssamling, 2008. *SJÖSF 2008:81 Sjöfartsverkets föreskrifter och allmänna råd om maskininstallation, elektrisk installation och periodvis obemannat maskinrum*.
- Sundström, B. Institutionen för hållfasthetslära KTH, 1999, *Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära*
- Kabacoff, L. T. 2000, *Office of Naval Research Initiative on Wear Resistant Nanostructured Materials*, Arlington, USA. Artikeln är hämtad publicerad i rapporten *NATO Advanced Research Workshop on*

Nanostructured Films and Coatings. Series 3. High Technology-Volyme 78

[http://www.dtic.mil/cgi-](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADP011832&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf)

[bin/GetTRDoc?AD=ADP011832&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADP011832&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf)

- Wang, D, et al, 2008, *Preparation and characterization of nanostructured Al₂O₃-13wt.%TiO₂ ceramic coatings by plasma spraying*, Nanjing, Kina
artikeln är hämtad ur skriften *RARE METALS Vol.28, No. 5, Oct 2009*,
p.465 DOI: 10.1007/s12598-009-0090-7

<http://www.springerlink.com/content/35226777t1q10221/fulltext.pdf>

- HKV, 2007. *Strategi för Försvarsmaktens materielförsörjning*, Stockholm,
Beteckning 23 241:61994 med Bilaga beteckning 23 383:61994

Internet:

- Nationalencyklopedin:
<http://www.ne.se>
- Terminologicentrum:
<http://www.tnc.se>
- Rolls-Royce (Kamewa):
<http://www.dieselduck.ca/machine>
- Wärtsilä Lips defence:
http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/marine_news/2003_1/gangler.pdf
- Kockums AB:
<http://www.kockums.se/produkter-tjanster/marin-teknik/kraft-och-framdrivning>
- Polaris PWC Knowledge:
<http://polarispwcknowledge.shorturl.com/first-things-to-do/keeping-your-polaris-pwc-on-the-water/jet-pump>
- Wikipedia:
<http://en.wikipedia.org>

- Maritime Research Institute Netherlands:
<http://www.marin.nl/web/Issues/Propulsion/Cavitation.htm>
- The Engineering ToolBox:
http://www.engineeringtoolbox.com/cavitation-d_407.html
- Kemikalieinspektionen:
http://www.kemikalieinspektionen.se/templates/Material____4736.aspx
http://www.kemi.se/templates/Material____5976.aspx
- Försvarets materielverk:
http://www.fmv.se/upload/Bilder%20och%20dokument/Publikationer/Informationsmaterial/PROTEC/protec02_06.pdf
- Flame Spray Technologies:
<http://www.fst.nl/en/page00042.asp>
- The Official Web Site of the Nobel Prize:
<http://nobelprize.org/educational/physics/microscopes/tem/index.html>,
- Gordon England, Surface Engineering Forum:
<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/hvconv.htm>
- TABER[®] industries:
<http://www.abrasiontesting.com/falling-sand-abrasion-tester.php>
- EN standards (Europa):
http://standards.mackido.com/en/en-standards24_view_4698.html
- Applied Nano Surfaces:
<http://www.appliednanosurfaces.com/offering.html>,
- Ny Teknik:
http://www.nyteknik.se/nyheter/innovation/forskning_utveckling/article2484943.ece
http://www.nyteknik.se/nyheter/innovation/forskning_utveckling/article2508838.ece

Övrigt:

Intervju, samtal eller mejlväxling har skett med:

- Boris Zhmud, Applied Nano Surfaces (ANS) i Uppsala
- Dr. Kenneth Scandell, Naval Surface Warfare Center (NSWC) i Philadelphia
- Dr. Lawrence T. Kabacoff, Office of Naval Research (ONR) i Arlington, Washington DC
- Fredrik Hyllengren, Försvarets materielverk (FMV: AK Gem) i Stockholm
- Jens Tornblad, Rolls-Royce (Kamewa) i Kristinehamn
- Lars Lindgren, Försvarets materielverk (FMV: AK Sjö) i Karlskrona
- Magnus Palm, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Stockholm
- Olle Grinder, PM Technology AB samt Docent i Materialteknik vid KTH
- Peter Granstam, Exova i Linköping
- Steven Savage, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) i Linköping