



Materialteknik2050 – Slutrapport

LINDA H. KARLSSON OCH STEVEN SAVAGE

Linda H. Karlsson och Steven Savage

Materialteknik2050 – Slutrapport

Titel	Materialteknik2050 – Slutrapport
Title	Material technology 2050 – Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5153--SE
Månad/Month	Augusti
Utgivningsår/Year	2021
Antal sidor/Pages	19
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	A74019
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Under 2019 och 2020 har FOI finansierat det egeninitierade forskningsprojektet MaterialTeknik2050 som dels utvecklat en metodik för teknikspaning och värdering av nya tekniker för försvarstillämpningar och dels följt utvecklingen inom tidigare identifierade högintressanta materialteknikområden såsom grafen och additiv tillverkning. Eftersom teknikområdet fortfarande utvecklas snabbt innehåller rapporten förslag på viktiga områden att fortsätta övervaka och hur metodiken kan användas i fortsättningen.

Nyckelord: teknikspaning, omvärldsbevakning, trendsplaning, materialteknik, tvådimensionella material, 2D-material, grafen, additiv tillverkning, materialteknik 2050

Summary

During 2019 and 2020, FOI has financed the project MaterialTeknik2050, in which a method for technology watch and evaluation of new technologies for defence applications has been developed. The project has also followed the development in highly interesting material technologies such as graphene and additive manufacturing. As the technologies are still developing fast, the report contains suggestion for important areas to continue to survey and how the methodology can be used in the future.

Keywords: tech watch, horizon scanning, trend analysis, material technology, two dimensional materials, 2D-materials, graphene, additive manufacturing, material technology 2050

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Pandemins påverkan på projektet	8
2	Metodik för teknikspaning	9
3	Utveckling inom grafen och andra 2D-material under 2020.....	10
3.1	Militära tillämpningar för grafen	12
3.1.1	Signaturanpassning	12
3.1.2	Elektromagnetiska sköldar.....	13
3.1.3	Sensorer.....	13
3.1.4	Skyddsmaterial.....	14
3.2	Dubbla användningsområden av grafen	14
3.2.1	Additiv tillverkning	15
3.2.2	Batteriteknik och grön el	15
3.2.3	Ersättare för kritiska material	15
3.2.4	Nya material	16
4	Intressenter och aktörer	17
4.1	Strategiska Innovationsprogram.....	17
4.2	Företag.....	17
4.3	Forskningsinstitut.....	18
5	Sammanfattning och slutsats.....	19

1 Inledning

Materialteknik är ett område som utvecklas intensivt både nationellt och internationellt och som har en stor påverkan på samhället och varje individs liv. Forskning och utveckling kring nya material och kopplade tekniker är en av grundförutsättningarna för den snabba, digitala utvecklingen som sker idag. Hur viktigt området är har varit extra tydligt under 2020 och corona-pandemin, där tekniska lösningar, digitala möten och verktyg blivit en viktig nyckel för att hålla igång samhällen, industrier och sociala kontakter.

Materialtekniken påverkar alla delar av samhället och utvecklingen drivs av det civila samhället. Det finns stark efterfrågan på miljövänligare produkter, elektronik och batterier, ”smartare” produkter genom sakernas internet (eng. *Internet of Things*, IoT), bärbar teknik och artificiell intelligens (AI). Inom alla dessa områden är material och materialtekniker mycket viktiga komponenter.

Denna utveckling fångas upp av nationella och internationella försvarsintressen och teknikerna omvandlas till militära förmågor inom nästan alla områden. En av utmaningarna detta projekt har arbetat med är hur för försvaret framtida viktiga materialteknikområden kan identifieras och värderas så att rätt materialteknik följs och värderas av FOI.

Intresset för att följa forskning och den tekniska utvecklingen har ökat inom försvarsområdet och det finns ett antal projekt inom FOI, till exempel forskning och teknik- (FoT)-projekten och avskanningsprojekt, där det senaste inom forskningen följs inom olika områden. Det detta projekt bidrar med är att identifiera materialteknikområden som inte fångas upp av FoT-projekten, som är begränsade till vissa definierade områden, eller avskanningsprojekt som söker brett inom den senaste forskningen för att hitta nya, intressanta områden.

Detta projekt, MaterialTeknik2050, är det enda som följer utvecklingen inom materialteknikområdet brett och nästan förutsättningslöst för att hitta nya material och materialtekniker som kommer ha påverkan på försvaret vid 2050 som inte är kopplade till en viss tillämpning.

Exempel på nya materialtekniker som tas upp i denna rapport är additiv tillverkning och grafenteknologier såsom bärbar elektronik och smarta textilier som kan ändra färg eller känna av tryck och värme, nya fotovoltaiska material för omvandling ljus till el för solpaneler, etc.

Grafen är ett material som varit väldigt uppmärksammat under de senaste femton åren och har ett antal unika egenskaper. Materialet består av ett enda lager grafit, dvs ett lager av kolatomer i ett hexagonalt mönster. Det är atomernas placering och bindning som ger de extrema egenskaper såsom elektrisk ledningsförmåga, termisk ledningsförmåga, böjbarhet, tøjbarhet, känslighet för enskilda atomer och fotoner (ljus) med våglängder alltifrån ultraviolet ljus (UV) till infrarött (IR), som gör grafen så intressant inom i stort sett alla tänkbara tillämpningar.

På grund av grafens vida användningsbarhet har flera så kallade tvådimensionella material (2D-material) tillverkats och undersökts. Många har egenskaper som liknar eller kompletterar grafen.

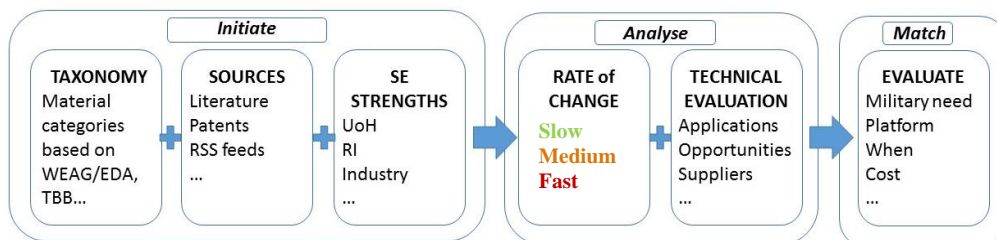
Detta gör det ytterst viktigt att följa utvecklingen inom materialteknikområdet för att identifiera kommande hot och försvarsmöjligheter. För att följa utvecklingen behövs nätverkande inom myndigheten och med experter inom universitet och högskolor (UoH), civil och militär industri, nationella och internationella forskningsansatser och nätverk.

FOI har tidigare inte haft en tydlig och gemensam process för hur sådan teknikspaning, s.k. *tech watch*, ska genomföras. Under förra året började en sådan process utvecklas och finns beskriven i *Material2050 A green paper*¹ och kan ses i Figur 1. Eftersom engelska är branschspråket skrivs alla begrepp och all sökning som görs på engelska inklusive taxonomi. Denna process är kopplad till andra projekt som utvecklar metodik för omvärldsbevakning

¹ *MaterialTeknik2050 A green paper*, S. Savage, 2019, FOI Memo 6972

inom FOI och FMV. Processen startar med ett urval av begrepp och termer som ska användas för genomsökning av hemsidor, rapporter och publikationer på internet med ett automatiserat verktyg. Resultatet analyseras sedan utifrån utvecklingshastighet och tekniska möjligheter. I sista steget utvärderas resultaten utifrån militära behov.

Denna process började testas under 2019² och har fortsatt att utvecklas under 2020.



Figur 1. Process för omvärldsbevakning av materialteknikområdet.

1.1 Pandemins påverkan på projektet

Likt resten av samhället har den, i skrivande stund, fortfarande pågående covid-19-pandemin haft en stor påverkan på projektet. Nationella och internationella konferenser har ställts in eller omarbetats till digitala konferenser eller seminarier och möten har uteblivit. Inga planerade resor har kunnat genomföras och arbetet har i stället fokuserats på att följa skeenden online och via digitala möten.

Grafenforskningen har anpassats en del till pandemin och många universitet, forskningsinstitut och företag har undersökt hur grafen skulle kunna användas för att bekämpa viruset. Detta beskrivs mer i avsnitt 3.2.

² Metodstudie av FOI Memo 6972 – MaterialTeknik2050 A green paper, L.H. Karlsson, 2019, FOI Memo 7015

2 Metodik för teknikspaning

Metodiken som presenterades i *Material2050 A green paper*³ har testats tillsammans med en metod för avskanning av forskningsfronten framtagna i projektet *Avskanning av forskningsfronten*⁴. Båda metoderna testades på 2D-materialet svart fosfor (eng. *black phosphorus*) och en enkel jämförelse mellan metoderna gjordes.

Beskrivning av resultaten från jämförelserna finns i rapporterna *Test av process för avskanning av forskningsfronten - Genomfört på exemplet svart fosfor*⁵ och *Teknikspaning Materialteknik2050 – svart fosfor - Försvarsrelevans och potentiella tillämpningar*⁶. Den senare innehåller också en värdering av svart fosfors försvarsnytta. Här ges en kort sammanfattning av resultaten.

Värt att notera är att båda metoderna har likheter men betraktar den senaste utvecklingen ur två olika perspektiv. *Materialteknik2050* fokuserar på materialutveckling och materialteknikutveckling med bäring på utveckling av tekniker medan *horisontavskanningen* studerar nya och ”överraskande” trender inom forskningsvärlden och är inte begränsad till material eller materialteknik.

Metoderna kompletterar varandra vilket gör att ingen av dem utesluter den andra. Båda kan användas för att fånga upp trender inom forskning och utveckling med bäring på kommande försvarsförmåga och forskningsprioriteringar.

Det är av stor vikt att metodiken som utvecklats inom detta projekt tas omhand och används för att fånga upp nya trender inom materialteknikområdet som inte är fokuserat på ett visst användningsområde eller forskningsområde. I dagsläget är detta den enda metodik och det enda projekt som finns som är tillägnat att brett söka efter ny materialteknik som kan ha påverkan på många försvarsförmågor. Inom FOIs projekt kontrolleras ofta forskningsutvecklingen och metodikutvecklingen inom eller kring det område som projektet handlar om och då är det lätt att nya tekniker missas eller inte tas omhand på rätt sätt i rätt tid.

³ *MaterialTeknik2050 A green paper*, S. Savage, 2019, FOI Memo 6972

⁴ Projektnr 2020: E72890

⁵ *Test av process för avskanning av forskningsfronten - Genomfört på exemplet svart fosfor*, E. Dalberg, C. Grönwall, G. Kindvall, A. Lindberg, J. Schubert, 2020, FOI-R--5056--SE

⁶ *Teknikspaning Materialteknik 2050 – svart fosfor - Försvarsrelevans och potentiella tillämpningar*, L. H. Karlsson och S. Savage, 2021 (är i skrivande stund under granskning)

3 Utveckling inom grafen och andra 2D-material under 2020

Omvärldsbevakning av forskning och utveckling kring materialet grafen har fortsatt under 2020. Detta har gjorts genom bland annat deltagande i SIO Grafens⁷ styrelse, läsning och analys av rapporter och nyheter från SIO Grafen och Graphene Flagship, kontakt med universitet och högskolor (UoH), deltagande på seminarier och konferenser såsom Svenskt Grafenforum⁸ och *Graphene for ...Research, Innovation, Collaboration*⁹ och skannande av forskningsfronten genom sökningar med sökverktygen Google, Google Scholar och Web of Science.

Den militära utvecklingen har följts genom deltagande ibland annat EDA och NATO:s AVT-ET-213 Military values of graphene technology (eng. *Exploratory Team*, ET) samt diskussioner med internationella experter. Detta arbete har till största del finansierats av andra projekt, men tas upp här eftersom det är viktigt för detta projekts resultat. En specialutgåva av NATO:s nya vetenskapligt granskade tidskrift *Journal of the Advanced Vehicle Technology Panel* dedikerad till grafen har publicerats där S. Savage var en gästredaktör¹⁰.

Under 2020 har utvecklingen av teknologier som använder sig av grafen och andra 2D-material varit fortsatt stark och skett inom ett stort antal områden, såsom färg mot elektromagnetisk strålning, smörjmedel, biosensorer etc. Fortfarande är det den civila sektorn som driver utvecklingen medan den militära forskningen fångar upp idéer och resultat som är intressant för just det området. Mycket av den civila utvecklingen har dubbla användningsområden (eng. *dual-use*), till exempel IR-sensorer.

Värt att notera är att man inom militär forskning och utveckling inte alltid visar upp sina resultat. Det betyder att även områden där det är väldigt lite aktivitet eller där utvecklingen plötsligt stannar till fortfarande kan vara intressanta att följa. Det är därför också värt att notera den ökande volym av rapporter om grafenteknologier som handlar om radarabsorbenter där vissa är ”förklädda” som mikrovågsabsorbenter, även om detta är en relevant civil tillämpning. Grafen nämns även i sammanhanget adaptiva absorbenter.

Både internationellt och nationellt satsas mycket på att få igång en ordentlig produktion av grafen och grafenliknande ämnen (t.ex. nanogرافit¹¹). Till exempel har svenska 2D-Fab startat en fabrik som kan tillverka 10 ton grafen/nanogرافit per år¹².

Inom industrin är intresset störst för grafenoxid (GO) och reducerad grafenoxid (RGO) som båda är lätta att tillverka. På GO och RGO är grafenets ytor helt eller delvis täckta med olika molekyler. Dessutom kan oftast flerlagergrafen¹³ eller nanogرافit också användas, beroende på användningsområde.

Idag täcker grafen och grafenoxid hela TRL-skalan, från grundforskning kring grafens egenskaper upp till färdiga produkter med grafen i, se exempel i Figur 2. Eftersom forskningen på andra 2D-material startade senare än grafen och inte har samma internationella och nationella fokus, är fortfarande TRL-nivån låg (TRL1-3).

⁷ <https://siogرافen.se/>. Datum: 2020-11-09

⁸ <https://siogرافen.se/event/svenskt-grafenforum-2020/>. Datum: 2020-11-09

⁹ <https://events.graphene-flagship.eu/cmspreview/g4ric-2020/>. Datum: 2020-11-09

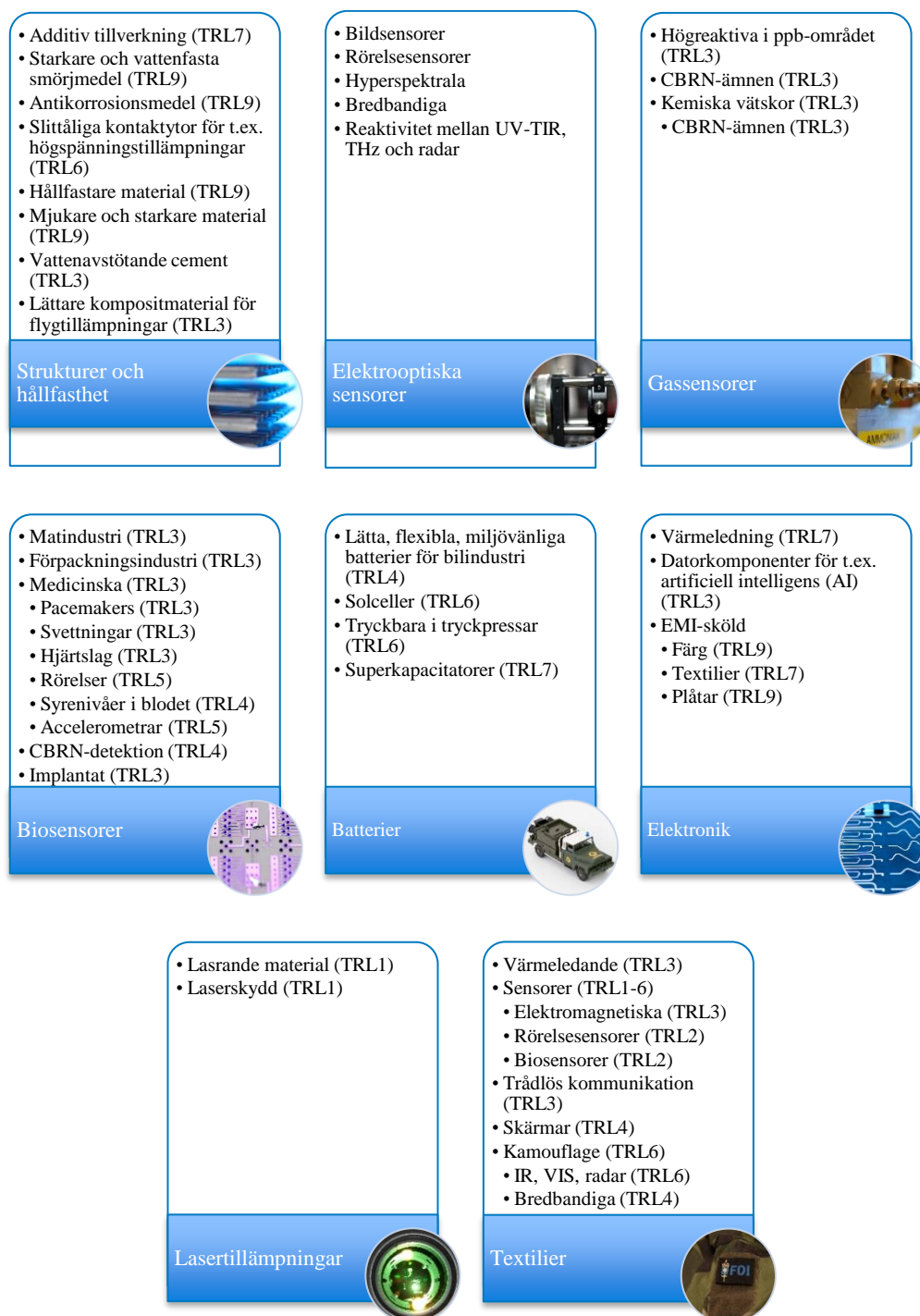
¹⁰ Journal of the NATO Science & Technology Organization Applied Vehicle Technology Panel 2020 Peer-reviewed Conference Proceedings, vol. 2 -2020 <https://www.sto.nato.int/publications/Management%20Reports/STO-J-02-ALL.pdf>

¹¹ Nanopartiklar som består av minst tio lager grafen

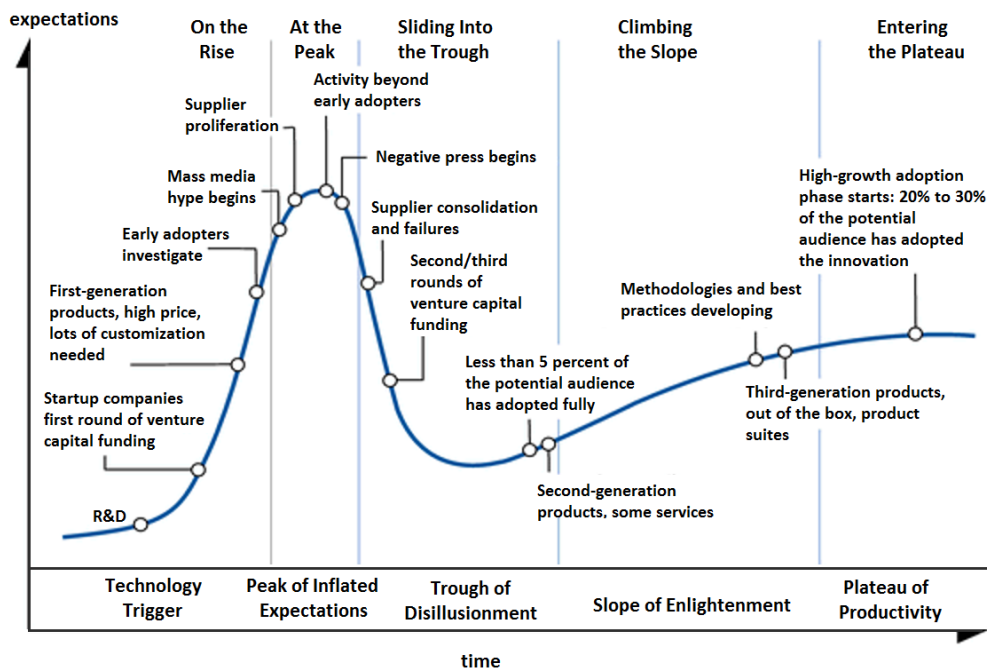
¹² SIO Grafen Svenskt Grafenforum, rapport Oktober 2020, https://siogرافen.se/app/uploads/2020/11/Grafenforum_2020_NY.pdf

¹³ Material som består av minst tre lager grafen

På grund av den stora spridningen av teknikområden där grafen undersöks, är det svårt att precisera var grafen befinner sig på Gartner-kurvan (den s.k. ”hype-kurvan”). Gartnerkurvan, se Figur 3, beskriver hur förväntningar på ett nytt material eller en ny teknik förändras med tiden. Inom vissa områden, t.ex. kompositmaterial för sportutrustning, har det funnits grafen i produkter under ett par år medan det inom andra områden, såsom lasertillämpningar, fortfarande är forskning på grundnivå.



Figur 2. Exempel på teknologier där grafen används på olika TRL-nivåer. TRL-nivåerna är en uppskattning baserad på tillgänglig information.



Figur 3. Gartnerkurvan (hype-kurvan) som beskriver förväntningar på ett material eller teknik beroende på dess mognadsgrad.¹⁴

3.1 Militära tillämpningar för grafen

På grund av sin natur är det svårt att följa den senaste utvecklingen inom försvarsforskning, men utifrån vad som rapporterats i den öppna forskningen och den civila utvecklingen kan ett antal militärt intressanta områden identifieras där grafen kan ha en stor påverkan. De flesta är listade i Figur 2 och vissa av dem diskuteras vidare i detta avsnitt.

Information har också upphämtats från samtal med internationella experter genom samarbeten inom EDA och NATO, som finansierats av andra projekt med som tas upp här eftersom det är relevant för denna teknikspaning. Under 2020 har NATO startat ett s.k. *Exploratory Team* (ET) där militära tillämpningar av grafen undersöks (NATO-AVT-ET-213).

Intresset för grafen inom stora internationella försvarsrelaterade organisationer har ökat och flera samarbeten har antingen startats eller diskuterats. En lämplig finansiär för framtida projekt är EU:s kommande försvarsfinansieringsorgan Europeiska försvarsfonden (eng. *European Defence Fund*, EDF).

3.1.1 Signaturanpassning

Ett område där grafen kan ha stor påverkan på försvarsförmåga är inom adaptivt, bärbar kamouflage för IR. Som kan ses i Figur 4, finns enkla prototyper där den termiska emissiviteten hos ett tyg kan varieras genom att sätta på en svag spänning över en grafenbeläggning. Emissiviteten ska enligt publikationen kunna ändras på bara några sekunder och tyget

¹⁴ Av NeedCokeNow - Eget arbete, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27546041>

är tvättbart¹⁵. Genom att variera tygets termiska egenskaper kan risken för upptäckt med värmekameror sänkas.



Figur 4. Textil med anpassningsbara termiska egenskaper baserat på grafen. Reprinted with permission from S. M. Ergoktas *et al.*, *Graphene-Enabled Adaptive Infrared Textiles*, *Nano Letters* 20(7), pp.5346-5352 (2020). Copyright 2021 American Chemical Society.

Grafen har även visat lovande resultat för andra våglängder såsom nära infrarött (NIR) och radar och för stora våglängdsområden (för s.k. hyperspektrala tillämpningar).

3.1.2 Elektromagnetiska sköldar

Grafen och MXener, en annan typ av 2D-material, har visat sig kunna reflektera alternativt absorbera elektromagnetiska signaler och under året har elektromagnetiskt blockerande material, t.ex. färg, kommit ut på marknaden. Vilka våglängder som grafen kan skydda mot anges inte på företagets hemsida men det finns ett flertal rapporter som berör de vanligaste frekvensband mellan 2 – 40 GHz.

Intresset inom detta område för grafen och grafenbaserade teknologier växer, och det finns även trovärdiga rapporter om elektriskt styrbara ytbeläggningar¹⁶.

3.1.3 Sensorer

På grund av sin stora specifika yta¹⁷ är grafen och andra 2D-material lämpliga som sensor-material. Redan idag finns grafen i en VIS – NIR-sensor och TIR-sensor från det finska företaget Emberion¹⁸, men materialet testas också för kemiska sensorer, CBRN-sensorer, bredbandiga elektrooptiska sensorer, gas-sensorer, tryckkänsliga sensorer, accelerometrar m.m. Tack vare grafens kemiska egenskaper kan ytan dopas med ett stort antal atomer för att på så sätt skräddarsy ytan för detektering och mätning av ett flertal olika kemiska och biologiska ämnen.

¹⁵ M. Said Ergoktas *et al.*, *Graphene-Enabled Adaptive Infrared Textiles*, *Nano Lett.* (2020), 20, 7, 5346–5352.

¹⁶ Balci *et al.*, *Graphene-enabled electrically switchable radar absorbing surfaces*, *Nature Comm.* (2015) 6, 6628. <https://doi.org/10.1038/ncomms7628>

¹⁷ Ett materials specifika yta är förhållandet mellan materialets yta och volym.

¹⁸ <https://www.emberion.com/products/> Datum: 2021-04-12.

3.1.4 Skyddsmaterial

När det gäller grafen som skyddsmaterial finns det rapporter om att grafen ökar skyddsförmågan men också att skyddsförmågan minskar eller är oförändrad¹⁹. Trots det har ballistiska skydd med grafen börjat komma ut på marknaden. Den amerikanska företaget Citizen Armour har lanserat skyddsvästar som påstås vara förstärkta med grafenmikrofibrer²⁰. Det är oklart vad som menas med grafenmikrofibrer.

Inom detta område skulle FOI behöva genomföra egna tester och undersökningar för att bedöma grafens användningsbarhet som ballistiskt skyddsmaterial, och framförallt tillgång till testmaterial som har tagits fram enligt beprövade och standardiserade metoder.

3.2 Dubbla användningsområden av grafen

Forskningsområdet grafen har börjat mogna, vilket kan ses av bland annat att Graphene Flagship har övergått till sin tredje fas med fokus på att stödja små och medelstora företag (SMF) och industrin inom grafenområdet²¹. Det svenska strategiska innovationsprogrammet (SIP:en) SIO Grafen avslutar sin andra fas och gör en ny agenda med bland annat internationalisering och standardisering av kvalitetsbestämning av grafen.

I och med att grafen alltmer kommer närmare kommersialisering, blir standardisering av de olika grafenmaterialen och analysmetoder för detta allt viktigare. Grafentillverkare och grafenåterförsäljare behöver kunna visa vilken typ av grafen som de tillverkar och köparna behöver veta vilken kvalitet de köper eftersom detta starkt påverkar slutproduktens egenskaper. Graphene Flagship arbetar med detta²² och SIO Grafen har tillsammans med Swednanotech, RISE och SIS (Svenska Institutet för Standarder) startat en arbetsgrupp inom området²³. Eftersom FOI inte är en partner i Graphene Flagship har vi inte tillgång till deras standard men vi har tillgång till arbetet via SIO Grafen.

Under 2020 har grafenområdet haft ett stort fokus på produktutveckling och klimatneutral teknik för energiförsörjning och transport. Forskning och utveckling kring grafen i batterier och ultrakondensatorer har ökat kraftigt under 2020 på grund av den ökade efterfrågan av bland annat elbilar och elektroniska produkter och bristen på sällsynta jordartsmetaller.

Inom EU har i stort sett alla produktionskedjor av sällsynta jordartsmetaller kopplingar till Afrika och Kina, vilket ses i rapporten *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU*²⁴. Det är därför prioriterat att hitta material och källor inom EU och där tillgången inte störs av oroligheter, pandemier eller politiska konflikter. Grafen tros kunna bidra till detta eftersom det kan tillverkas i Europa och inte har någon tydlig negativ påverkan på klimat eller miljö.

Precis som allt annat i världen så har grafenforskningen och -utvecklingen påverkats av coronapandemin. Grafen har undersökts som ett material för ansiktsmasker och andningskydd, men inga produkter med grafen har lanserats på grund av de strikta tester och regler som gäller kring skyddsutrustning. Ännu idag finns det oklarheter kring hälsorisker med grafen, bland annat undersöks det inom Graphene Flagship och snart SIO Grafen hur grafen påverkar hälsan. Under senare delen av 2020 har SIO Grafen påbörjat arbete med att informera om hur företag bör arbeta säkert med grafen.

¹⁹ *Grafen för ballistiskt skydd*, S. Savage, 2018, FOI-R--4639--SE

²⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=z-SjlySsOw4>. Datum: 2020-04-21.

²¹ <http://graphene-flagship.eu/news/Pages/The-Graphene-Flagship-Sails-into-Core-3.aspx>. Datum: 2020-04-21.

²² <https://graphene-flagship.eu/project/industrialisation/Pages/Standardisation.aspx>. Datum: 2020-11-09.

²³ <https://siografen.se/report/standardisering-och-best-practise-for-nya-nanomaterial/>. Datum: 2020-11-09.

²⁴ European Commission, *Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study*, 2020. ISBN 978-92-76-15336-8, DOI: 10.2873/58081, ET-04-20-034-EN-N.

3.2.1 Additiv tillverkning

Additiv tillverkning är en teknologi som lämpar sig för produktion av bl.a. relativt små (i dagsläget) och komplexa, tredimensionella komponenter. Teknologin erfar en snabb utveckling men är fortfarande omogen och bland övriga forskningsinriktningar finns intresse för produktion av multimaterialskomponenter. Additiv tillverkning är också lämplig för produktion av komponenter där det finns kompositionella gradienter, d.v.s. sammansättningen varierar med position. Alla dessa karakteristika gör att additiv tillverkning lämpar sig för produktion av radarsignaturreducerande komponenter (med minskat radartvårsnitt, eng. RCS) till plattformar och vapen.

Inte sällan bidrar vissa punkter på en plattform eller ett vapen till en stark radarreflex, s.k. *hot-spot*. Det kan vara t.ex. ett rör eller inre hörn. Om punkten modifieras med en radarabsorbent med lämplig geometri och absorption kan radarreflexen framgångsrikt dämpas. Eftersom geometrin oftast är komplex lämpar sig additiv tillverkning väl som produktionsmetod. För att få bästa effekt behöver absorbenten innehålla hålrum, kanaler eller gradienter i den elektriska ledningsförmågan. Sådana komponenter är omöjliga att producera med konventionella metoder till rimliga kostnader. Här behövs additiv tillverkning.

Additiv tillverkning av polymera material är relativt enkelt och det finns ett flertal leverantörer av lämplig utrustning. Det som saknas är utgångsmaterialet, som oftast består av trådar, även om pulver kan också användas. Utöver nödvändiga egenskaper som lämpar sig för additiv tillverkning, såsom t.ex. lämplig smälttemperatur, viskositet, termisk stabilitet, måste materialet även ha en lämplig elektrisk ledningsförmåga och tillräcklig hållfasthet för tillämpningen.

Grafens bra mekaniska egenskaper, låga densitet och extremt bra ledningsförmåga tillsammans med det stora intresset för grafenmodifierade polymerkompositer för civila tillämpningar, gör att materialet lämpar sig väl tillsammans med additiv tillverkning för att punktvis sänka radarreflexer från plattformar och vapen.

3.2.2 Batteriteknik och grön el

Grafen ses som ett av de viktigaste materialen för att kunna stötta en omställning till miljövänlig, klimatneutral teknologi. Allt fler produkter, bland annat bilar och ett växande antal bärbara produkter, drivs av elektriska batterier som i dagsläget kräver sällsynta jordartsmetaller och alternativ till dessa behövs av flera skäl. Grafen ses som ett av de mest lovande alternativen och därför har en stor del av grafenforskningen inriktats på just miljövänliga batterier. Ett flertal universitet i Sverige, t.ex. Mittuniversitetet²⁵ och Chalmers²⁶, har forskningsprojekt med grafen som batterimaterial.

Grafen används redan i s.k. ultrakondensatorer. Fördelen med dessa jämfört med batterier är att de kan laddas extremt snabbt och på så sätt tillvarata inbromsningsenergin (eng. *regenerative braking*) samt snabbbladdas vid korta uppehåll, såsom när bussar stannar vid busshållplatser. Kommersiella produkter finns och används av t.ex. bolag som tillverkar stadsbussar²⁷.

3.2.3 Ersättare för kritiska material

Kritiska råvaror betraktas som en svag länk i Europas materialförsörjnings kedja, då många härrör från länder utanför Europa, och där strypning av tillgång till vissa material kan och

²⁵ <https://www.miun.se/en/Research/research-projects/ongoing-research-projects/silicon-graphene-electrode-composite-for-lithium-ion-batteries/>

²⁶ https://www.chalmers.se/en/departments/physics/news/Pages/Graphene_sponge_paves_the_way_for_future_batteries.aspx

²⁷ <https://investinestonia.com/estonian-founded-skeleton-will-provide-graphene-based-ultracapacitors-for-wrightbus-double-decker-busses/>. Datum: 2021-02-01.

har används i politiska syfte. Det finns även oro över miljöskador som uppkommer vid deras utvinning och frågor kring oreglerade och omänskliga arbetsvillkor för gruvarbetare.

Grafen har studerats i syfte att utröna om materialet kan användas för att ersätta, eller minska mängden kritiska råvaror som importeras till Europa. Bl. a. en rapport från Chalmers²⁸ tyder på att detta är tekniskt möjligt, men det saknas studier om huruvida det är ekonomiskt realistiskt eller ej.

3.2.4 Nya material

Forskningen kring andra tvådimensionella material utöver grafen har ökat, liksom intresset för dessa inom olika produkter, eftersom dessa material har andra egenskaper än grafen. Därmed kan dessa möjligtvis användas inom olika industriella områden där grafen inte passar. Omfattningen av dessa material är enormt. Minst ett hundratals olika material har studerats och de kan delas in i olika grupper beroende på deras kemiska sammansättning. De vanligaste grupperna som studerats är övergångsmetalldikalkogener (eng. *transition metal dichalcogenides*, *TMD*) och MXenes. Dessa material har studerats för användning i tillämpningar som t.ex. bärbara elektronikkomponenter, elektrooptiska sensorer, elektromagnetiska sköldar, gassensorer och för smarta tyger.

²⁸ Arvidsson & Sandén, *Carbon nanomaterials as potential substitutes for scarce metals*, J. Cleaner Production (2017) 156, 253-261

4 Intressenter och aktörer

För att kunna identifiera intressanta teknikområden och viktiga aktörer inom de olika teknikområdena har arbete med nätverkande fortsatt inom FOI och tillsammans med FMV. Bland annat har en wiki, Confluence²⁹, testats för att se om det kan vara ett bra sätt att dela öppen information inom och mellan myndigheterna.

Försöket har visat att det kräver mycket arbete från alla inblandade och att det är svårt att få till en säker och tillförlitlig informationskanal.

Dessutom har en lista på utvalda organisationer som är intressanta inom materialområdet börjat tas fram, se nedan. De har valts som exempel utifrån relevans för försvarsområdet och svensk industri.

För att förvalta det som framkommit under detta arbete bör information om metoden för trendspaning och värdering fortsätta att kommuniceras. Det kan göras inom FOI i relevanta projekt men metoden kräver också goda kontakter med svenska försvarsaktörer (FM, FMV etc). Informationskanalerna för denna kommunikation bör förfinas.

4.1 Strategiska Innovationsprogram

För att stärka Sveriges konkurrenskraft i framtiden finansierar Vinnova, Formas och Energimyndigheten flera olika strategiska innovationsprogram³⁰ (SIP). Flera av [SIP:arna](#), totalt 17 olika områden, kopplar till materialteknikutveckling på olika sätt, se exempel i Tabell 1.

Tabell 1. Strategiska innovationsprogram med koppling till materialteknik.

Organisation	Materialteknikområde
SIO Grafen	Grafen och tvådimensionella material
Lighter	Lättviktsmaterial
Metalliska material	Metall
Innovair	Flygteknik

4.2 Företag

Några svenska företag, stora som små, med uttalat intresse för grafen, antingen som producent eller konsument, är listade nedan. För fler företag inom svenskt grafenindustri, se t.ex. SIO Grafens medlemslista³¹.

²⁹ <https://www.atlassian.com/software/confluence> . Datum: 2021-05-06

³⁰ <https://www.vinnova.se/m/strategiska-innovationsprogram/>. Datum: 2021-04-12.

³¹ <https://siografen.se/medlemskap/medlemmar/>. Datum: 2021-01-25.

Tabell 2. Exempel på svenska företag som satsar på grafen.

Organisation	Materialteknikområde	Typ
SAAB Aeronautics	Försvarsrelaterat, bland annat tvådimensionella material och additiv tillverkning för blixtskydd	Försvarsindustri, grafenanvändare
2D-fab	Grafentillverkning med stor kapacitet	Tillverkare/leverantör
ABB	Olika, bland annat tvådimensionella material och additiv tillverkning för elektronik	Grafenanvändare
GrafRen	Grafenförädling	Tillverkare/leverantör
Bright Day	Grafentillverkning	Tillverkare/leverantör
Graphma-tech	Grafentillverkning	Tillverkare/leverantör
Vattenfall AB	Olika, bland annat tvådimensionella material och additiv tillverkning för vattenkraftverk	Grafenanvändare
Billerud Korsnäs	Grafen för nya förpackningsmaterial	Grafenanvändare

4.3 Forskningsinstitut

Några svenska forskningsaktörer, universitet och högskolor med uttalat intresse för grafen, antingen som producent eller konsument, är listade nedan.

Tabell 3. Forskningsaktörer med intresse för grafen.

Organisation	Materialteknikområde	Typ
Chalmers Industri-teknik (CIT)	Olika områden, bland annat tvådimensionella material	Företag, Industristöd
Chalmers Tekniska Högskola (CTH)	Olika, leder bland annat 2D-TECH, ett kompetenscenter för 2D-material	UoH
Linköpings universitet (LiU)	Additiv tillverkning	UoH
Karlstad universitet (KAU)	Tryckning av tunna material i tryckpressar	UoH
Luleå universitet (LU)	Framställning av polymerkompositer för bl.a. lågfriktion och hållfasta lagerytor.	UoH
Kungliga tekniska-högskolan (KTH)	Sensorer, bl.a. accelerometrar	UoH
RISE	Många olika områden, t.ex. materialanalys	Forskningsinstitut
FOI	Materialteknik inriktat mot totalförsvaret	Forskningsinstitut

5 Sammanfattning och slutsats

Som har noterats fortsätter grafen, grafen-baserade teknologier och övriga 2D-material med liknande strukturer att dra in stora finansiering från privata och offentliga aktörer. Dock kan det skönjas en mognad av teknologiområdet. Allt flera realistiska produkter lanseras på den öppna marknaden, från gummiprodukter till termiska sensorer och inom energisektorn.

Tack vare materialteknikens huvudsakliga *dual-use*-karaktär är dessa produkter av intresse för motsvarande försvarstillämpningar. Utvalda bidrag till NATO:s konferens under 2019 om grafen i försvarstillämpningar publicerades nyligen. Där tas ett fåtal tillämpningar upp som är värda att notera, t.ex. grafenkompositer som termiska isolatorer i missiler³².

Det bör noteras att sensorer med grafen inom våglängder aktuella för militära tillämpningar (VIS – NIR och TIR) finns som kommersiella prototyper.

Den civila forskningen och utvecklingsaktiviteten fortsätter och mognar, kommersiell produktion ökar och nya standarder publiceras. Det är svårt att veta exakt var grafen befinner sig på Gartner-kurvan (s.k. hype-kurvan) men det är troligt att kurvans lutning börjar minska något för de flesta tillämpningar. Eftersom grafen påverkar ett stort antal teknikområden kommer grafen finna sig på olika nivåer av kurvan samtidigt. För militära tillämpningar befinner sig grafen på ett tidigt stadium.

Teknikutvecklingen går fort framåt, speciellt inom tvådimensionella material och additiv tillverkning. De nya tekniker och produkter som utvecklas är ofta s.k. *dual-use*, dvs kan användas både för civila och militära ändamål.

Inom en snar framtid bör en handlingsplan för värdering av hur grafen kan påverka framtida försvarsförmågor tas fram.

Det är av yttersta vikt att fortsätta bevaka utvecklingen av området materialteknik, speciellt grafen och additiv tillverkning, och även genomföra egna forskningsstudier.

Metodikerna för teknikspaning och värdering som utvecklades under 2019 har testats och visat på goda resultat. Metodiken bör fortsätta utvecklas och spridas inom myndigheterna.

³² Simon Torry, Jack Whittaker, *Graphene Barrier Coatings for Solid Rocket Propellant Insulants*, Journal of the NATO Science and Technology Organization Applied Vehicle Technology Panel 2020 Peer Reviewed Conference Proceedings (2020) 2, 29-40

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se