



Årsrapport för projektet Energetiska system 2020

STEFAN EK, MAGNUS BERGH OCH RASMUS WEDBERG

Stefan Ek, Magnus Bergh och Rasmus Wedberg

Årsrapport för projektet Energetiska system 2020

Titel	Årsrapport för projektet Energetiska system 2020
Title	Annual report in the project Energetic Systems 2020
Rapportnr/Report no	FOI-R--5059--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	15
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E60976
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvars- och säkerhetssystem

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

Denna rapport sammanfattar aktiviteterna projektet Energetiska system inom FoT Vapen och skydd under 2020. Den beskriver också hur projektet försöker besvara de fyra frågeställningar det har i Försvarens FoT-plan:

- Vilka möjligheter bidrar nya energetiska material med i vapentillämpningar och hur ska sådana kravställas för att bidra till ökad förmåga?
- Hur bör prestandamodeller av krut och sprängämnen utformas för att kunna förutse prestanda på systemnivå?
- Hur kan prestanda hos metallsystem (t.ex. reaktiva metaller och metalliserade sprängämnen) bättre modelleras?

Vilka möjligheter och begränsningar finns med nya tillverkningstekniker såsom additiv tillverkning av energetiska material?

Nyckelord: Energetiska system, energetiska material, prestandamodeller, metalliserade sprängämnen, reaktiva material, additiv tillverkning

Summary

This report describes the activities in the R&T-project Energetic systems in 2020. It also describes how the project is trying to respond to the four questions it has the R&T-plan of the Swedish Armed Forces.

- What are the benefits of new energetic materials in weapon application and what are the requirements that will contribute to increased capability?
- How should performance models for explosives and propellants be designed to allow predictions at a system level?
- How can the performance of metallic systems (e.g. reactive metals and metallised explosives) be modelled in a better way?
- What are the possibilities and limitations with new production techniques, such as additive manufacturing of energetic materials?

Keywords: Energetic systems, energetic materials, performance models, metallised explosives, reactive materials, additive manufacturing

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Möjligheter med nya energetiska material	8
3	Möjligheter och begränsningar med nya tillverkningstekniker	10
4	Prestandamodeller för krut, sprängämnen och metallsystem	11
	4.1 Bakgrund.....	11
	4.2 Termokemisk beräkningskod.....	11
	4.3 Direkta tryckmätningar i energetiska system.....	12
	4.4 Beräkningsmodell för termobariska förlopp.....	13
5	Reaktiva material.....	15

1 Inledning

Projektet *Energetiska system* inom FoT Vapen och skydd inleddes 2020 och pågår i tre år.

Arbetet inom projektet bedrivs till stor del i internationella samarbeten. Sådana som är pågående eller under beredning beskrivs nedan. Hur stor del av budgeten som respektive samarbete utgör framgår av Försvarmaktens FoT-plan.

Projektet har fyra frågeställningar i FoT-planen:

- Vilka möjligheter bidrar nya energetiska material med i vapentillämpningar och hur ska sådana kravställas för att bidra till ökad förmåga?
- Hur bör prestandamodeller av krut och sprängämnen utformas för att kunna förutse prestanda på systemnivå?
- Hur kan prestanda hos metallsystem (t.ex. reaktiva metaller och metalliserade sprängämnen) bättre modelleras?

Vilka möjligheter och begränsningar finns med nya tillverkningstekniker såsom additiv tillverkning av energetiska material?

Möjligheter och begränsningar med nya tillverkningstekniker

2 Möjligheter med nya energetiska material

Ett exempel på nya energetiska material är de smält-gjutmatriser till ersättning för TNT som undersöks i samarbetet med det amerikanska CCDC AC (United States Army Combat Capabilities Development Command Armaments Center vid Picatinny Arsenal). Båda parterna har lång erfarenhet av sådant arbete. Båda har också kommit fram till att 3(5),4-dinitropyrazol (DNP) är en bra kandidat, som har högre prestanda än TNT, men också högre känslighet. Under året har FOI arbetat med att förbättra syntesen av DNP. FOI kan framställa satsar om ca 2 kg, medan CCDC AC kan göra ca 45 kg (100 lbs) per sats. Parterna undertecknade ett projektavtal i juni 2019.¹ Detta pågår i fyra år. Den första årsrapporten gavs ut i februari 2020² och nästkommande kommer att ges ut i februari 2021.

Arbete inom området nya energetiska material pågår också i EDA-projektet (European Defence Agency) EMTEEC (Energetic Materials towards an Enhanced European Capability), som har sex deltagande länder (CZ, DE, FR, NL, NO, SE). Projektet skulle ha avslutats i år, men har blivit försenat p.g.a. Corona, eftersom rapporter inte delas mellan parterna annat än vid fysiska möten. Inom EMTEEC har FOI arbetat med flödeskemi och dess användning vid framställning av energetiska material. Till exempel har den energetiska mjukgöraren trietylenglykoldinitrat (TEGDN) framställts. Kapaciteten vid det första försöket var 0,5-1 kg TEGDN per timme. FOI uppskattar att en väl intrimmad uppställning med samma utrustning kan producera tio gånger så mycket. En viktig del av detta projekt är att så kallade kritiska komponenter ska kunna framställas på ett ekonomiskt rimligt sätt i Europa. Brist på sådana komponenter i ofred skulle leda till en sänkt förmåga.

Det samarbete som skett i projektet EMTEEC har varit mycket framgångsrikt och ett fortsatt samarbete planeras med utökade frågeställningar i projektet EMPOF, Energetic Materials – Production, Obsolescence, and Formulation. Obsolescens betyder att en komponent inte längre kan användas, trots att den är fullt fungerande. En anledning kan vara att den är giftig och därför förbjuds. Tungmetallinnehållande brinnmodifierare är en tänkbar sådan ämnesgrupp. Projektet ska identifiera sådana komponenter, utvärdera om det går att ersätta dem och hur detta påverkar funktion och prestanda. Produktion finns med av samma skäl som i EMTEEC, d.v.s. att det är viktigt att kritiska komponenter kan produceras i Europa till en rimlig kostnad. Formulering kommer att undersöka nya bindmedel och mjukgörare för driv- och sprängämnen, eftersom den perfekta kombinationen av prestanda, känslighet, mekaniska egenskaper, ballistiska egenskaper och rökfrihet är svår att uppnå. Utöver deltagarna i EMTEEC, där samtliga fortsätter med EMPOF, har Rumänien tillkommit. Polen kommer att gå med i projektet senare via ett tillägg till projektavtalet. Detta sker för att inte projektberedningen ska tappa fart p.g.a. den extra tid, som det polska försvarsdepartementet behöver för att kunna nå ett beslut. Projektberedningen har försenats av Corona. Ursprungsplanen var projektstart tidigt 2021. Nu blir det istället mest troligt efter sommaren 2021.

FOI deltar inom ramen för detta projekt även i NATOs AVT-panel (Applied Vehicle Technologies). Där finns många arbetsgrupper och tre tekniska kommittéer. FOI är aktivt inom tre grupper (en om framställning och karakterisering av energetiska material samt två om lagstiftnings [t.ex. REACH] inverkan på tillgång till olika komponenter till raketmotorer och vapensystem). Vanligtvis träffas upp mot 600 forskare två gånger om året under en vecka per tillfälle. Årets möte i slutet av april i Québec och i oktober i Båstad ställdes in p.g.a. Corona. Kommande möte till våren i Berlin ersätts med ett virtuellt möte.

¹ FOI-2016-1390:15

² Stefan Ek, Alexander Paraskos, *Annual Report in Development of High Explosives PA (PA No. A-19-0001) – first report*, FOI MEMO H2140

FOI har under året gjort ett antal formuleringar baserade på ammoniumperklorat och hydroxyterminerad polybutadien (AP/HTPB) med syftet att ta fram ett nytt referenskrut. Ett sådant behövs vid utveckling av nya raketkrut, vilket kommer att ske kommande år. Teknikutvecklingen inom detta område har gjort att ett nytt referenskrut behövs. Resultaten från den småskaliga karakteriseringen av dessa formuleringar kommer att leda till att en väljs ut. Av denna kommer FOI att tillverka raketmotorer för utvärdering i större skala.

Nya energetiska material kan ge nya möjligheter, när de kombineras med nya tillverkningstekniker, såsom additiv tillverkning, vilket beskrivs mer nedan.

3 Möjligheter och begränsningar med nya tillverkningstekniker

Ett exempel på nya tillverkningstekniker är så kallad additiv tillverkning, eller 3D-utskrift, av material. Den forskning som bedrivs inom projektet *Energetiska system* i detta område sker inom ramen för EDA-samarbetet AMTEM (*Additive Manufacturing Techniques for Energetic Materials*). Detta är ett fyraårigt projekt, där Sverige är ett av sex deltagande länder. Projektet studerar tillverkning av såväl spräng- som drivmedelsladdningar.

FOI arbetar här uteslutande med filamenttekniker, medan andra tekniker – såsom pulver eller stereolitografi – undersöks av andra parter i samarbetet. Årets resultat har beskrivits övergripande i ett separat memo.³

³ Sten Andreasson, Viktor Bladholm och Mattias Liljedahl, FOI MEMO H2224

4 Prestandamodeller för krut, sprängämnen och metallsystem

4.1 Bakgrund

Försvarsmakten står inför omfattande modernisering av materiel. Exempel är pansarvärnsvapen och tunga markplattformar med relevanta skyddssystem. Det är också ett faktum att växelverkan mellan dagens vapen- och skyddssystem ökar i komplexitet. Det effektivaste sättet att analysera och prediktera dessa förlopp är genom en kombination av instrumenterade försök och beräkningsmodeller.

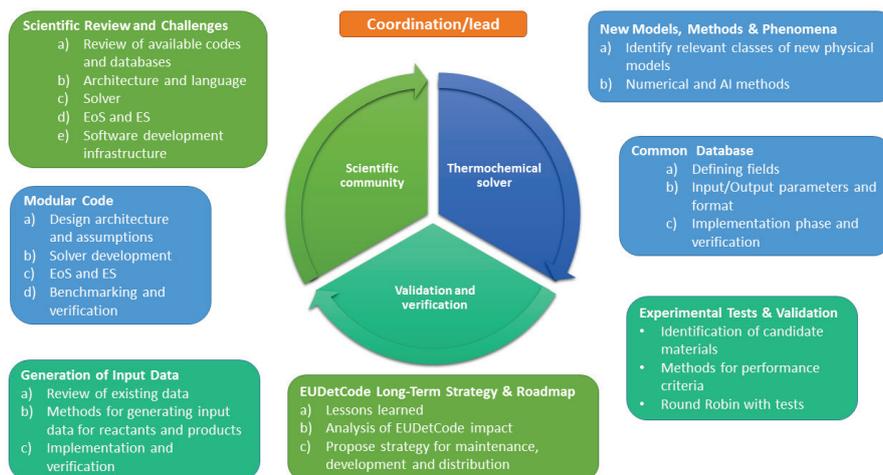
Energetiska material, i form av sprängämnen och krut, har ofta en avgörande roll för utfallet i denna växelverkan. Sprängämnen används idag inte bara i vapen, utan återfinns inte sällan i både aktiva skyddssystem och tilläggsskydd på markplattformar. I detta avsnitt beskrivs arbetet med grundläggande modell- och metodutveckling som bland annat syftar till att stödja analys av olika växelverkansförlopp som involverar energetiska material.

Olika energetiska system nyttjar olika delar av den energi som frigörs från energetiska material. Ett RSV-vapen är typiskt beroende av den energi som frigörs under de första mikrosekunderna i ett sprängämne medan granater och vissa aktiva och reaktiva skydd nyttjar en större del av den deponerade energin. I system med metalliserade sprängämnen, exempelvis undervattensvapen, nyttjas väsentligen hela den frigjorda energin. En relevant prestandamodell måste således ge en god beskrivning av när energin deponeras i systemet och hur trycket varierar under expansionen av spränggaserna efter detonationen. Beräkningar av dessa förlopp görs typiskt i flera steg. På plattformsnivå nyttjas någon typ av värderingsverktyg. För att modellera ett enskilt växelverkansförlopp, som kan generera underlag till värdering, krävs dock en fenomenbaserad beräkningsmodell, vanligen s.k. hydrokod. Hydrokoden i sin tur nyttjar vanligen en modell med parametrar unika för varje energetiskt material. Denna delmodell, ofta benämnd som *termokemisk kod* eller *detonationskod*, är en central komponent i växelverkansanalys då den beskriver vilken respons som erhålls efter initiering.

4.2 Termokemisk beräkningskod

FOI, i likhet med ett flertal andra aktörer inom försvarssfären världen över, har nyttjat ett amerikanskt beräkningsprogram benämnt *Cheetah 2.0* för prestandaberäkningar. Dock har inga uppdateringar delgivits Sverige sedan slutet av 90-talet och version 2.0 kan idag betraktas som föråldrad. Senare versioner inkluderar bland annat nya tillståndsekvationer med tydligare fysikalisk förankring, förbättrade kalibreringar och högre noggrannhet för icke-ideala (t.ex. plastbaserade) sprängämnen samt möjligheten att koppla ihop den termokemiska modellen med hydrokod för att följa tidsberoende förlopp såsom efterförbränning. Ett initiativ till kodutveckling har därför inletts som ett europeiskt samarbete under EDA benämnt *EUDetCode*. Visionen är att ett välorganiserat samarbete ska samla fragmenterade kunskaper och resurser och därmed möjliggöra utvecklandet av en modern termokemisk kod med en omfattande databas. En sådan förmåga skulle utgöra en viktig investering för framtiden och stärka forsknings- och teknikutvecklingen på försvarsområdet i både Sverige och Europa.

Efter en relativt lång beredningsprocess där FOI haft en ledande roll, kan nu projektstart förväntas under våren 2021. Dock har ett visst förberedande arbete redan påbörjats då uppgiften är komplicerad och inbegriper matematiska modeller, programmering, kalibrering av parametrar samt försök. Inom projektet Energetiska system har under 2020 insamlandet av relevant litteratur samt studier av en termokemisk undervisningskod påbörjats.



Figur 1. Schematisk bild av arbetspaketen i EDA-projektet EUDetCode.

Figur 1 visar en schematisk bild över de sju arbetspaketen i EDA-projektet EUDetCode, som löper över 5 år. FOI kommer att leda *New models, Methods and Phenomena*, och delta i ett flertal andra, bland annat *Modular Code*, där programvaruutvecklingen kommer att utföras. FOIs arbetspaket fokuserar särskilt på tillståndsekvationer. Dessa beskriver tryck som funktion av volym och temperatur för olika gasblandningar och är av central betydelse för en termokemisk kods förmåga att prediktera prestandaparametrar. Vidare behövs särskilda tillståndsekvationer för att kunna inkludera metallpartiklars förbränning under expansionsfasen. Detta är ett utmanande arbete som kräver metodutveckling både på modell- och experimentsidan och därmed ett lämpligt område för samverkan med andra europeiska aktörer.

4.3 Direkta tryckmätningar i energetiska system

I energetiska system innehållande sprängämnen omsätts kemisk energi till mekanisk energi på mikrosekundsskala. Direkta tryckmätningar i systemet är utmanande då en fysisk inbäddad givare, i form av en mycket tunn film, utsätts för starka stötvågor och hög temperatur. En tryckgivare placerad inuti ett sprängämne eller i ett inert material i anslutning till ett sprängämne ger värdefull information som kan nyttjas för att förstå och kvantitativt värdera ett system. Vidare möjliggör mätningar av tryck över tid en direkt jämförelse med hydrokodsmodeller. Detta är av stor vikt eftersom beräkningsverktyg ökar i betydelse och kontinuerlig validering mot försök är en förutsättning för dessa empiriska modeller.

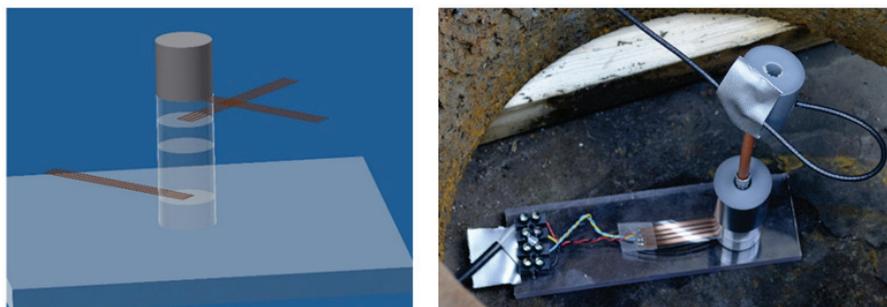
Direkta tryckmätningar testades i viss mån vid FOI på 90-talet samt nyligen i projekt MIMEV 2017.⁴ Användbara signaler erhöles, dock blev slutsatsen att viss metodutveckling är nödvändig för att kunna nyttja den fulla potentialen i denna mätmetod. Bland annat behöver olika typer av givare utvärderas samt jämföras med annan metod (t.ex. optisk metod som *photonic doppler velocimetry*). Vidare behövs en snabb switch utprövas och integreras i mätsystemet för att reducera störningar mellan spänningssatta givare av manganintyp.

Under 2020 har arbetet med metodutveckling påbörjats. FOI valde att med tryckmätning utvärdera en typ av metod för att mäta känslighet hos explosivämnen benämnd *gap test*. Figur 2 visar uppställningen för tryckmätning i ett s.k. *small-scale gap test*. Till vänster visas en skiss av uppställningen med givarsprängämne i grått och plexiglas i transparent med

⁴ MIMEV = Modellering och utvärdering av lågkänliga sprängämnen,

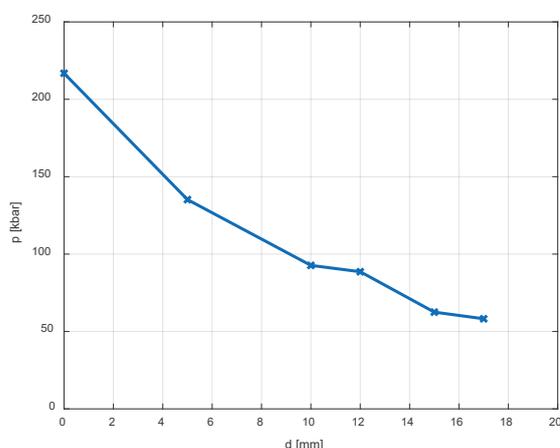
M. Bergh, R. Wedberg, D. Martelin, A. Lindborg, J. Lundgren, M. Sjöblom, *et al.*, "Project MIMEV: Delivery 2," FOI-RH--1913--SE, 2017.

tryckmätarnas positioner markerade. Till höger visas ett foto ifrån den experimentella uppställningen, här med en manganingivare.



Figur 2. Tryckmätning i *small-scale gap test*.

I studien jämfördes trycksignaler ifrån manganin- och PVDF-typ⁵. Den senare innehåller ett piezoelement som genererar elektrisk signal vid kompression och behöver således inte någon drivspänning.



Figur 3. Uppmätta topptryck med manganingivare som funktion av dämpmaterialets höjd.

Figur 3 visar mätresultat i form av topptryck som funktion av dämpmaterialets höjd (plexiglas). Denna typ av kurva kan nyttjas för att jämföra resultat ifrån olika typer av initieringstester för sprängämnen.

Den påbörjade försöksstudien visar lovande resultat för både manganin- och PVDF-givare. Dock krävs fler försök med jämförelser, felmarginal och utvärdering av effekten av krökt stötvågsfront för att metoden ska vara praktisk i ett tillämpat projekt.

4.4 Beräkningsmodell för termobariska förlopp

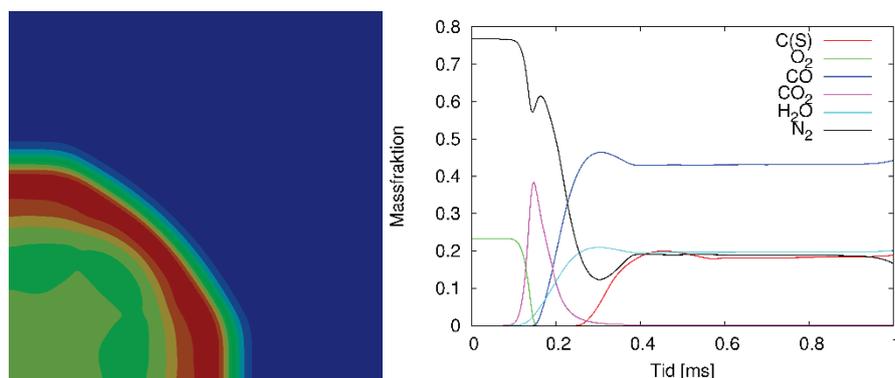
Beräkningsprogrammet LS-Dyna från Ansys inc., används rutinmässigt vid FOI för simulering av ett brett spektrum av detonations-, initierings- och växelverkansförlopp. Under senare år har programmet utökats med flera nya lösare som kan köras kopplade till varandra i så kallade multifysiksimuleringar. En av dessa lösare beskriver kompressibel strömningsmekanik och bygger på metoden *Conservation Element Solution Element* (CESE). För lösaren finns en särskild modell för termobariska förbränningsförlopp implementerad. Denna kan användas för att simulera efterförbränning av aluminiserade sprängämnen som detonerar i luft. Modellen beskriver hur de solida aluminiumpartiklarna

⁵ Polyvinylidenfluorid

växelverkar och värms upp av de heta detonationsgaserna för att efter hand förbrännas. Även de kemiska reaktioner som pågår i gasfasen samt efterförbränning av kol beskrivs.

Modellen bygger till stor del på samma fysik och kemi som den modell för aerob efterförbränning som tidigare utvecklats vid FOI och implementerats i programmet OpenFOAM.⁶ En fördel med LS-Dyna:s modell är att den relativt enkelt kan kopplas till programmets andra lösare. T.ex. kan den kopplas till strukturlösaren för att simulera en termobarisk stridsdels verkan mot en struktur. En nackdel med LS-Dyna:s modell är att den är sparsamt dokumenterad samt att källkoden inte är tillgänglig. Dessutom förefaller den kemiska kinetiken vara hårdkodad vilket försvårar möjligheten att göra parameterstudier eller pröva alternativa reaktionsmekanismer. En nackdel som är gemensam för båda lösarna är att de inte stödjer tillståndsekvationer som beskriver gaser vid mycket höga tryck. Därför kan de inte beskriva den tidiga delen av ett detonationsförlopp på ett korrekt sätt, utan är beroende av initialdata från simulering med hydrokod och termokemisk beräkning.

I pågående arbete utvärderas LS-Dyna:s modell för termobariska förlopp. En målsättning är att simulera ett av de experiment som använts för att validera modellen i OpenFOAM. Detta skulle även möjliggöra en direkt jämförelse av de två modellerna. Under 2020 har arbetet påbörjats med att simulera ett tvådimensionellt exempelfall som beskriver efterförbränning av kol i en trotyl-laddning innesluten i en luftvolym. Simuleringen startar från en tidpunkt efter detonationen då gasklotet expanderat till cirka fyra gånger sin ursprungliga volym. Figur 4 illustrerar hur lösaren gör det möjligt att följa hur t.ex. temperatur, tryck och massfraktioner utvecklas i olika positioner i volymen. I det fortsatta arbetet kommer möjligheten att lägga till aluminiumpartiklar att provas. Modellen kommer också att valideras mot befintliga experimentdata.



Figur 4. Till vänster visas temperaturfördelning i det expanderande gasklotet från en trotylladdning, där rött motsvarar 4500 K och blått 300 K. Till höger visas utvecklingen av massfraktionerna för de ingående komponenterna i en punkt som initialt ligger utanför gasklotet.

⁶ E. Fedina, *Post-detonation afterburning of high explosives*, Doktorsavhandling, Lunds Universitet, 2017.

5 Reaktiva material

Reaktiva material kan användas i ett vapensystem för att ge ökad verkan. Detta sker genom att kemisk energi tillförs i målet, utöver den kinetiska energi, som tillförs vid anslaget. Ett exempel är reaktiva splitter, som antänds vid anslaget. Dessa kan bestå av bl.a. metall-metallföreningar eller metall-fluorpolymerkompositer. Möjliga tillämpningar presenterades i en litteraturstudie 2014.⁷

Olika tillverknings- och karakteriseringstekniker beskrevs 2019.⁸ FOI ämnar gå vidare med s.k. *arrested ball milling*, där pulvren blandas i kulkvarn och mals tills de konsoliderats till ett strukturellt reaktivt material. En fördel med denna teknik är att den inte använder nanomaterial. De senare kan orsaka arbetsmiljöproblem, eftersom det är svårt att förhindra inandning av så små partiklar med andningsskydd.

Under 2020 har omvärldsbevakningen fortsatt, men inget experimentellt arbete har utförts i Energetiska system. Detta kommer att ske under kommande år.

⁷ P. Lundberg, *Strukturella material med reaktiva egenskaper. En litteraturöversikt.*, FOI-R--3902--SE, 2014

⁸ D. Menning, *Utveckling av reaktiva material. Aspekter av tillverkning och karakterisering.*, FOI-RH--2157--SE, 2019

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