

Extremt värmetåliga material

Linda H. Karlsson, Eva Dalberg
Per Andersson, Mats Dalenbring och Oskar Parmhed

Militära tillämpningar såsom stridsflyg, vapen och rymdsystem har kritiska delsystem och detaljer som utsätts för mycket höga temperaturer. Samtidigt utsätts de för andra påfrestningar, såsom höga laster och mekaniskt eller kemiskt slitage. Det finns potential för förmågehöjande prestandavinsterna om värmetåligheten kan ökas utan att tumma på övriga krav. Det pågår en snabb utveckling även civilt, eftersom liknande problem också finns i civila tillämpningar. Snabb utveckling av beräkningskraft i kombination med AI ökar möjligheten att identifiera, designa och tillverka nya extremt värmetåliga material. FOI har i denna avskanning av forskningsfronten identifierat fyra olika typer av material som är särskilt intressanta för försvarsdomänen. Det är (a) högentropiska material, (b) keramiska fibermatriskkompositer med kiselkarbid, (c) zirkoniumkarbid och -borid samt (d) eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar.

INTRODUKTION OCH VIKTIGASTE RESULTAT

DETTA MEMO BESKRIVS slutsatser och rekommendationer som baseras på en avskanning av forskningsfronten inom området extremt värmetåliga material. Syftet med arbetet har varit att kartlägga aktuell forskning inom området, identifiera militära tillämpningar som skulle kunna dra nytta av den forskningen, bedöma vilka materialegenskaper som är särskilt åtråvärda för dessa tillämpningar samt därmed identifiera de mest relevanta materialen att fortsatt bevaka. Målet med detta memo är att presentera insikter och bedömningar kring extremt värmetåliga material på ett kortfattat och överskådligt sätt för dem som inriktar forskning och utveckling utifrån Försvarsmaktens behov.

Memot bygger på en sammanställning av resultat från en workshop där experter har diskuterat området utifrån ett urval vetenskapliga artiklar. Insamling av data, övrig metodbeskrivning och avgränsningar för arbetet har dokumenterats i en rapport.¹

Den grupp av extremt värmetåliga material som anses ha högst potential inom försvarsdomänen är högentropiska material (a). Beroende på tillverkningsmetod kan innehållet i materialet variera. Utöver de högentropiska materialen är utvecklingen av tre idag etablerade materialgrupper särskilt intressant: (b) keramiska fibermatriskkompositer med kiselkarbid, (c)

zirkoniumborid och -karbid samt (d) eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar.

Både militärt och civilt finns det tillämpningar där material med mycket hög värmetålighet är kritiska. Genom att öka materialens temperaturtålighet kan exempelvis prestandan hos militära system och därmed den militära effekten öka. Drar Försvarsmakten nytta av utvecklingen inom värmetåliga material finns det potential att vidareutveckla existerande teknologier samt att introducera helt ny teknik och förmåga.

Extremt värmetåliga material är relevanta för frågor som: Hur många gånger kan en rymdfarkost återinträda genom atmosfären? Vid hur höga tryck och temperaturer kan en motor drivas? Hur många gånger kan ett eldrör skjutas med innan det måste bytas ut? Hur långt ned i atmosfären, dvs. vid vilket tryck och i vilken omgivande miljö, kan en hypersonisk robot ha

VAD ÄR ETT EXTREMT VÄRMETÅLIGT MATERIAL?

I det här arbetet används "extremt värmetåliga material" som samlingsbegrepp för material som bibehåller sina önskvärda egenskaper vid temperaturer över 1600°C. Denna temperatur har valts eftersom nästan alla material som används praktiskt idag förlorar minst en kritisk egenskap vid högre temperaturer. Dessutom börjar luftens molekyler att brytas ned vid denna temperatur, vilket gör att luftkemin förändras.

¹ Karlsson, L.H., Kindvall, G., & Dalberg, E. (2024). Metodbeskrivning: Avskanning av forskningsfronten inom extremt värmetåliga material. FOI-D--1353--SE.

METOD

Vetenskaplig litteratur från de senaste fem åren skannades i början av projektet av med hjälp av sökmotorn Web of Science. Från skanningen valdes åtta representativa översiktsartiklar ut. Dessa lästes inför en workshop av en mindre grupp experter verksamma inom kärnvapen, flyg-system och framdrivning. Workshopen genomfördes med dessa artiklar som grund, men experterna deltog främst utifrån sina erfarenheter och kompetens inom försvars- och säkerhetsområdet. I workshopen faciliterades en diskussion genom vilken det identifierades viktiga tillämpningar, eftersträvarvärda materialegenskaper och särskilt intressanta material inom området extremt värmetåliga material.

sin bana? Hur kan man skydda sig mot laservapen? Det är viktiga frågor som driver den militära teknikutvecklingen framåt i Sverige och internationellt. Vi visar i det här arbetet att (a) högentropiska material, (b) keramiska fibermatriskompositer med kiselkarbid, (c) zirkoniumborid och -karbid samt (d) eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar är viktiga för svaren på dessa frågor. Exakt hur behöver studeras vidare. Fördjupad forskning rekommenderas därför.

MILITÄRA TILLÄMPNINGAR OCH ÖNSKVÄRDA MATERIALEGENSKAPER

Under avskanningen identifierades både militära och civila tekniska system som kan ha särskilt stora behov av extremt värmetåliga material. Det konstaterades att enbart extrem värmetålighet inte räcker för att ett material ska vara användbart. Exempel på andra viktiga egenskaper visas i Figur 1. Vi har under avskanningen identifierat att de mest relevanta tillämpningarna för extremt värmetåliga material är delar av flygande farkosters framdrivningssystem (motordelar, dysor, brännkammaväggar, turbinblad och värmerör) samt delar som utsätts för högt luftmotstånd och därmed värmeutveckling (noskoner, vingframkanter, luftbromsar och styrtyr, se Figur 2). Av särskilt intresse är **hypersoniska system**, **stridsflygplan** och **rymdfarkoster**. Eftersom värme alstras kontinuerligt i dessa system bedöms det som viktigt att materialen tål höga temperaturer samtidigt som de klarar av att leda bort värmen. Dessutom bör systemen vara lätta och klara att bära laster.

Material i dessa tillämpningar behöver tåla **hög värmebelastning** under **tillräckligt långa cykler** för aktuell tillämpning och kunna **leda bort den värme** som alstras. Bortledning av värme kan exempelvis göras genom att ytan abladerar (dvs. materialytan förkolnar), att värmen sprids över en stor yta eller att värmen strålar

ut. I vissa tillämpningar är det fördelaktigt att värmen leds bort snabbt, till exempel från en hypersonisk farkosts yta, men i andra fall skulle spridningen av värme ut i omgivningen skapa en tydlig signatur. För militär materiel är **signaturegenskaper**, dvs. hur materialet absorberar och reflekterar elektromagnetisk strålning i olika våglängder (radar, infrarött, synligt, ultraviolett etc.), mycket viktiga att anpassa till omgivningen och rådande sensorhot. I och med utvecklingen av nya sensorer kan många olika, både gamla och nya, våglängdsområden vara intressanta för signaturanpassning.

Interkontinentala ballistiska robotar behöver också extremt värmetåliga material. De rör sig generellt i en hög, elliptisk bana och kan ofta detekteras med radar från målet redan under den uppåtgående fasen. Robotar med nedtryckt bana, såsom hypersoniska glidfarkoster som aldrig lämnar atmosfären, tros inte upptäckas lika tidigt. De rör sig under lång tid i hög hastighet på förhållandevis hög höjd i atmosfären. När vapnen rör sig genom luften under en relativt kort tid och förstörs vid detonation är det möjligt att material i utsatta delar abladerar. Idag används till exempel kork eller melamin som abladerande material. Genom att använda extremt värmetåliga material skulle hastigheten eller tiden i hög hastighet kunna ökas, vilket ger potential för en längre räckvidd och ökad styrförmåga hos roboten. Styrförmågan påverkas av värme och krafter på styrrodren. Genom användning av värmetåliga material på rodren skulle styrförmågan och därmed träffsäkerheten kunna öka.

Återinträdesfarkoster för kontrollerade återinträden och landning uppskattas röra sig genom luften under längre tid. Idag används system med bland annat keramiska plattor som värmesköldar. Vissa material abladerar och behöver bytas efter varje färd medan andra skulle kunna återanvändas så länge de inte är mekaniskt skadade.

Generellt bör nya material som inte behöver bytas ut lika ofta innebära minskad materialåtgång, högre nyttjandegrad, enklare logistik och mindre arbetskraft. Dessutom kan de nya materialen innebära en ökad skyddsförmåga för motmedel som kan få både högre manövrerbarhet och ökad värmetålighet. Ytterligare en faktor är prisbilden hos exempelvis grundämnen som de nya materialen baseras på. Kostnaderna för systemen som helhet kan därför antingen bli högre eller lägre. Detta behöver avvägas vid användning av extremt värmetåliga material.²

Vikt är ofta en central parameter, speciellt för flygande farkoster. Ju lättare den är i sig själv, desto mer nyttolast kan farkosten bära och ju längre kan den flyga

² Kostnadsaspekter har inte tagits med i denna avskanning.

Termiska egenskaper

- Värmeledningsförmåga
- Smältpunkt
- Ablation
- Reflektion
- Absorption

Optiska egenskaper

- Absorption
- Reflektion

Radiologiska egenskaper

- Strålningsbeständighet

Mekaniska egenskaper

- Vidhäftning
- Hårdhet
- Dragfasthet
- Utmattning
- Tryckhållfasthet

Kemiska egenskaper

- Oxidationskänslighet
- Korrosionsegenskaper

Figur 1. Exempel på egenskaper som är viktiga för extremt värmetåliga material i de tillämpningar som identifierats i detta arbete.

på samma bränslemängd. Dagens mest värmetåliga material, till exempel volframkarbid, är mycket tunga vilket begränsar deras användningsområden. Beroende på om materialen är lastbärande eller inte kan det ställas olika krav på vikt och styrka. Även för små kärnreaktorer bedömdes det att vikt är av betydelse om reaktorerna ska kunna förflyttas på ett enkelt sätt.

Vid uppvärmning i luft utsätts material för syre vilket orsakar **oxidation** på de flesta material. Ju högre temperatur desto snabbare kan oxidationen gå. Oxidation bryter ned vissa material som ersätts av oxider som har andra, ofta mindre eftersträvarvärda, egenskaper. Värmeinducerad oxidation är ofta ett problem i flygtillämpningar, med undantag för vissa delar av motorn där det på grund av förbränningen finns begränsat med syre. I en elektromagnetisk kanon (på engelska *railgun*) skjuts en projektil iväg med hjälp av extremt starka elektromagnetiska fält. Luften mellan ledare som alstrar de elektromagnetiska fälten värms upp så att luften bryts ned och ozon bildas. Detta ger upphov till en lokalt extremt varm och korroderande miljö.

I samband med skjutning utsätts **eldrör** för extrema temperaturer och samtidigt skapas många olika gaser som reagerar kemiskt med eldrörets inre yta. Detta degraderar ytans egenskaper vilket påverkar eldrörets prestanda. Eldrör behöver därför bytas ut med jämna mellanrum (se sid 4). Genom att använda mer värmetåliga material skulle eldrören kunna användas mer

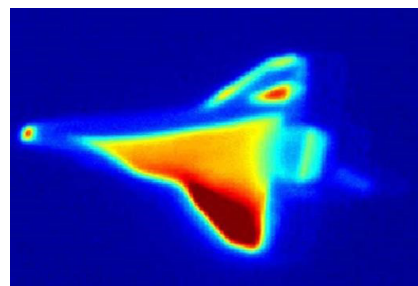
intensivt och med längre underhållsintervall, vilket minskar behov av logistik och reservdelar.

För material i fissionskraftverk, men även utrustning som ska vara i yttre atmosfären och rymden, bedöms **strålningsbeständighet** som viktigt även om strålningsnivåerna skiljer sig kraftigt åt. Radioaktiv strålning bryter generellt ned material och gör dem sköra.

En annan intressant möjlighet för tillämpningar i extremt höga temperaturer är så kallade gradienta material, där materialets sammansättning ändras sömlöst. Detta skulle till exempel kunna eliminera problem med lager som släpper från varandra. I dagens militära materielsystem bedöms det ofta finnas tunna skikt, färglager och tunnfilmer av olika material. Dessa behöver kunna fästa på underliggande ytor och strukturer. Vid uppvärmning kan de olika materialen expandera och krympa olika mycket, vilket orsakar spänningar i gränsyterna. Därmed kan material spricka eller släppa från den underliggande ytan.

Andra **mekaniska egenskaper**, såsom robusthet och beständighet mot repor och nötning, bedöms vara viktiga för material som ska användas i militär materiel. Keramiska material, vilka ofta tål höga temperaturer, bedöms generellt vara spröda och sköra vilket gör att de lätt spricker istället för att deformeras. Detta kan vara en nackdel vid praktisk användning om de riskerar att utsättas för slag eller kraftiga värmeväxlingar.

Idag utvecklas nya typer av **högenergivapen**, till exempel lasersystem och elektromagnetiska kanoner. Lasersystemen designas för att på långt avstånd värma ett mål så mycket att vitala delar förstörs. Detta kräver en mycket energirik källa. Då laserstrålen sprids av atmosfären krävs att styrkan vid laserkällan är mycket starkare än den önskade styrkan vid målet. Detta gör att linser och reflektorer som ska styra laserstrålen måste ha väldigt låg absorption för att inte deformeras och samtidigt tåla höga temperaturer.



Figur 2. Fördelningen av värme på NASA:s rymdfärja (STS-119) vid inflygning mot jorden. Bilden är tagen med en IR-sensor som visar hur ojämnt fördelad temperaturen är på farkostens yta. Ju mörkare rött desto varmare och ju mörkare blått desto kallare. Källa: NASA.

VARFÖR SLITS ELDRÖR?

För att skjuta ut en projektil eldas krut längst bak i eldröret, med krutet instängt mellan eldrörets bakgavel och projektilen. Ju mer krut som brinner, desto mer värme och krutgaser bildas och desto snabbare brinner krutet. Till sist är trycket så högt att projektilens mantel eller gördel deformeras och pressas in i eldrörets räfflor och projektilen accelererar genom eldröret.

Krut som används är normalt tillverkade av nitrocellulosa, med olika tillsatser. När krutet brinner skapar det en temperatur mellan ca 2750°C till 4000°C vid ett gastryck på flera hundra MPa (flera tusen gånger atmosfärstryck). De huvudsakliga beståndsdelarna i gasen är koloxid, koldioxid, vatten, vätgas och kvävgas. Dessutom finns mindre mängder av ämnen såsom ammoniak, metan, kväveoxid och vätesulfid. Det är dock alltid syreunderskott i krutgaser för att göra gaserna så molekylärt lätta som möjligt. Hela processen att förbränna krut och skjuta ut projektilen tar typiskt inte mer än 20 ms, men kan ändå leda till smältning av eldrörets inneryta. Slitaget uppstår på flera sätt; som ren smältning, som nötning när projektilen pressas genom eldröret, när gaserna strömmar förbi eldröret och genom kemisk påverkan på eldrörsytan.

Vi noterar att högtemperaturproblematik även kan uppstå i produkter med dubbla användningsområden såsom keramiska bromsskivor för bilar och beläggningar för skärverktyg. Högre temperaturtålighet kan medföra att behovet av att byta bromsskivor eller skärverktyg minskar, vilket kan ge positiva effekter för miljön och förenkla logistiken kring dessa produkter.

Framtida **energiproduktion** har också identifierats som intressant för extremt värmeståliga material. Idag pågår forskning om små fissionskraftverk som inte kräver vatten som kylmedel. I dessa utvecklas extrem värme bland annat på grund av radioaktiv strålning. Genom att tillverka de varmaste delarna av extremt värmeståliga material skulle effekten och livslängden hos dessa kunna öka. Systemen skulle då även kunna göras mindre och därmed transportabla till ur användarsynpunkt lämpliga (exempelvis säkra) platser. Figur 3 visar ett exempel på ett modulärt fissionskraftverk. Turbinblad som tål högre

temperaturer skulle kunna öka verkningsgraden i alla typer av ångturbiner då underhållsbehovet skulle minska.

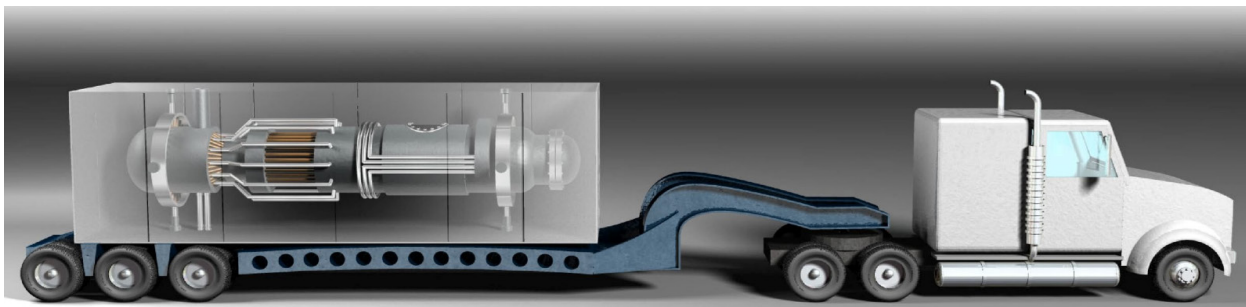
FORSKNINGSFRONTEN INOM NYA MATERIAL OCH UTVECKLINGEN AV REDAN ETABLERADE

Materialforskning sker i olika steg vilka är beskrivna i Figur 4. Beroende på om det är ett helt nytt material som ska framställas eller förbättring av ett existerande material som eftersträvas sker forskningen på olika sätt men med samma grundmetoder. Nedan beskrivs en generell metod för framtagning av nya material.

Först simuleras egenskaperna hos en stor mängd materialkombinationer, bland annat värmeledningsförmåga och entropi som anger hur stabila materialen är. Därefter tillverkas de mest intressanta materialkandidaterna i laboriemiljö och egenskaperna testas praktiskt. Resultaten från testerna matas in i simuleringarna för att iterativt ta fram nya och bättre materialkandidater. När ett material har identifierats, utvecklas tillverkningsmetoder, och tester genomförs för att bedöma industriell relevans och konkurrenskraft. Materialen med bäst prestanda och ekonomi väljs ut för användning i olika tillämpningar. I och med ett ökat fokus på klimatförändringar och tilltagande geopolitiska spänningar, kommer även faktorer som miljökrav och tillgänglighet till bland annat sällsynta jordartsmetaller att spela roll för materialvalet.

För etablerade material sker utvecklingen oftast i små steg. Chanserna för omvälvande teknologispång förväntas därför vara små, men tillförlitligheten i de små steg som tas är stor eftersom kunskapsläget är gott och riskerna enklare att överblicka och hantera. Detta gör att denna traditionella, evolutionära materialutveckling kommer att fortsätta.

I utvecklingen av helt nya material testas olika materialkombinationer mer slumpmässigt och ofta utan dopämnen. Chansen att hitta ett stabilt material är mindre i varje enskilt fall, men om man söker i ett stort rum av ännu oprövade kombinationer finns potential att bland dessa nya kombinationer hitta material som kan ge omvälvande teknispång.



Figur 3. Schematisk bild som visar den uppskattade storleken på ett framtida litet modulärt fissionskraftverk. Reaktorn är tillräckligt liten och lätt för att kunna transporteras på ett lastbilsflak. Källa: Idaho National Laboratory (CC-BY-licens).



Figur 4. Illustration av processen för materialutveckling med bäring på ny förmåga inom försvarsdomänen. (1) Identifiering av råmaterial, (2) undersökning av egenskaper, (3) simuleringar av dessa, vilket kan ske samtidigt som (2). Efter urval övergår processen till att införliva materialet i en prototyp (4) som testas och processer utvecklas (5). Därefter kan produkterna ingå i materialsystem (6) och ge ny eller förbättrad förmåga och möjligtvis ny doktrin (7). Källa: FOI.

AVANCERADE BERÄKNINGAR OCH NYA GRUNDLÄGGANDE MODELLER

Just nu finns en förväntan i forskarvärlden på att kraftfulla beräkningskluster i kombination med artificiell intelligens (AI) ökar chanserna att hitta material med helt nya egenskaper som kan leda till omvälvande utveckling inom olika teknikområden. Framväxande avancerade fasta tillståndet-beräkningar skulle kunna simulera allt komplexare strukturer och fysikaliska förlopp, vilket i sin tur skulle kunna leda till bättre grundläggande förståelse av underliggande fysikaliska och kemiska fenomen. Det är först idag som en acceptabel teoretisk modell för hur fasta material smälter har utvecklats. Däremot saknas fortfarande en modell för hur man går från atomära förlopp till mesoskala, dvs. där till exempel kristallkorn och fiberstrukturer kan beskrivas och studeras. Det handlar i grunden om förståelse av viktiga fenomen, såsom ablation.

Vår bedömning är att Sverige är bra, till och med världsledande inom vissa områden, till exempel svärmodellerade material. I dessa ingår högtemperaturmaterial och anisotropa material (material med riktningsberoende egenskaper).

TILLVERKNINGSMETODER SOM EN DEL AV FUNKTIONALITETEN

Både traditionella tillverkningsmetoder, till exempel kemisk förångningsdeposition (*chemical vapor deposition*), formgjutning och högisostatpressning samt nya tillverkningsmetoder, till exempel additiv tillverkning med AI-stöd bedöms finnas även i framtiden. De

traditionella metoderna anses vara billiga och lämpade för serietillverkning. Additiv tillverkning i sin tur ses som ett bra komplement eftersom det går att tillverka små partier av material med avancerade strukturer som är omöjliga att skapa med traditionella metoder.

Bearbetning av material, till exempel svarvning, anses vara ett viktigt steg inom traditionell tillverkning, men även additiv tillverkning kräver efterbearbetning. Utskrivna material behöver värmebehandlas för att hålrum och sprickor som bildats under utskriften ska slutas.

Värmetålighet bedöms kunna tillföras existerande material genom att spraya dess ytor med extremt värmetåliga material. På så vis kan en lätt struktur försees med värmetålig yta.

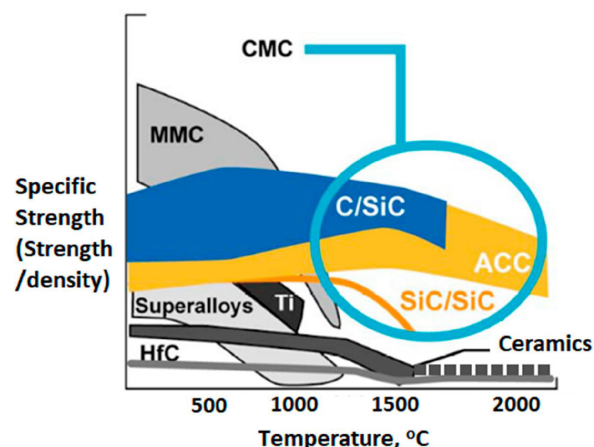
SÄRSKILT INTRESSANTA MATERIAL

I denna avskanning har (a) högentropiska material, (b) keramiska fibermatriskkompositer med kiselkarbid, (c) zirkoniumkarbid och -borid samt (d) eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar identifierats som särskilt intressanta. Av dessa kan keramiska fibermatriskkompositer med kiselkarbid samt zirkoniumkarbid och -borid klassas som redan etablerade material, medan högentropiska material och eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar, klassas som nya material. Nedan beskrivs dessa material kortfattat.

VARFÖR ÄR MEKANISK KONSTRUKTION UTMANANDE VID HÖGA TEMPERATURER?

Vissa strukturer i exempelvis manövrerande flygplan eller olika rymdfarkoster (Figur 2) kommer att utsättas för växlande värmeförhållanden, speciellt kring motorutlopp och skevroder. Över tid kommer temperaturen att påverkas av balansen mellan utstrålad och absorberad värme samt konvektivt (strömningsrelaterat) värmeutbyte med den omgivande luften. Värme ackumuleras i strukturen, vilket gör att temperaturen successivt ändras. Detta ställer höga krav på konstruktionen, speciellt material i lastbärande strukturer som utsätts för extrema temperaturer ($>1600^{\circ}\text{C}$), då hållfastheten minskar dramatiskt vid högre temperaturer, se Figur 5. Flertalet av dessa material är spröda, vilket medför låg skadetålighet samt att de är svåra att bearbeta. Viktkraven är i många tillämpningar strikta, och återanvändbarhet ställer krav på erosions- och oxidationsresistens för vissa tillämpningar.

Vid design av heta strukturer strävar man efter att kontrollera temperaturen på strukturen. Passiva kylsystem maximerar utstrålningen genom hög termisk utstrålningsförmåga i kombination med låg termisk ledningsförmåga för att minimera värmeledningen in i strukturen. Strukturen termiska expansion behöver anpassas för att minimera spänningar i och mellan olika komponenter. System som används under längre tid kan behöva både passiv och aktiv kylning.



Figur 5. Graf som visar hållfasthet som funktion av temperatur. De inringade materialen, samlade under begreppet *ceramic matrix composites* (CMC)⁴, har vid låga temperaturer lägre specifik hållfasthet än andra material men behåller sina egenskaper även över 1600°C, där de andra förlorar sina egenskaper. Källa: Peterson et al.⁵ (CC-BY licens).

Högentropiska material

Högentropiska material är en ny grupp av material som kombinerar flera olika grundämnen och deras egenskaper, vilket ger möjlighet att skapa extrema egenskaper. De högentropiska materialen skulle därmed kunna användas för att utveckla disruptiva teknologier. En förutsättning som diskuterades under workshopen för att kunna ta fram nya högentropiska material med önskvärda egenskaper är att kunna simulera materialtyper och deras egenskaper i tillräckligt stor omfattning.

Exempelvis skulle högentropiska material kunna användas på samma sätt som gradienta material som tål mycket höga temperaturer. Den höga oordningen i högentropiska material bedöms göra att de smälter och förångas vid mycket höga temperaturer, i dagsläget uppskattat till mellan ca 1600 och 4000°C³.

Keramiska fibertriskompositerna med kiselkarbid

Keramiska fibertriskompositerna används idag inom flygindustrin för temperaturer upp till 1200°C. Kiselkarbid anses vara en dålig lastbärare vid höga temperaturer, se Figur 5. Keramiska fibertriskomponenter

HÖGENTROPISKA MATERIAL

Med högentropiska material menas oftast en blandning av fem eller fler grundämnen där andelen för ett enskilt ämne ligger mellan 5 och 35 %, se Figur 6. Inget grundämne finns då i så stor mängd att det kan forma ett underliggande ordnat gitter som övriga ämnen kan komplettera på olika sätt. Istället formar de olika ämnena en ostrukturerad blandning som på vissa sätt mer liknar en vätska än andra fasta ämnen. Ett högentropiskt material kan vara både i metallisk och i keramisk form där till exempel syre eller kväve har bundit till metallatomerna.

Ett högentropiskt material är stabilt tack vare oordningen där entropin (mättet på möjlig variation) ger ett dominerande stabiliserande bidrag till legeringens totala energi. Ett högentropiskt material har därför oftast inga fasövergångar och behåller sina egenskaper från mycket låga till mycket höga temperaturer. Frånvaron av en kemisk ordning som går att störa kan, beroende på valet av legeringsämnen, ge mycket god hållfasthet, smidbarhet och skydd mot aggressiva kemikalier och oxidation.

De ursprungliga högentropiska materialen innehåller blandningar av övergångsmetaller (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, V, etc.) och kan behålla sina mycket goda egenskaper till relativt höga temperaturer. För extremt höga temperaturer, över 1600 °C, används istället andra metaller (till exempel Hf, Mo, Nb, Ta, W och Zr), ibland i kombination med de andra övergångsmetallerna beroende på vilka egenskaper som eftersöks.

Genom att variera legeringsämnen och graden av till exempel syre och kväve går det att skräddarsy de högentropiska materialens egenskaper, inklusive termiska, elektriska och optiska egenskaper. Det senare gäller framför allt keramiska högentropiska material.

innehåller små kiselkarbidtrådar vilket gör materialet anisotropt och försvårar bearbetning⁶. Idag anses keramiska fibertriskompositerna vara begränsade till temperaturer under 1200°C i luft på grund av oxidering av fibrerna vid höga temperaturer⁷. Trots detta är vår bedömning att detta material är fortsatt intressant på grund av dess breda användning och potentialen att materialet på sikt kommer att vara användbart i tillämpningar med temperaturer över 1600°C.

Zirkoniumkarbid och -borid

Zirkoniumborid används idag inom kärnkraftsindustrin. Zirkonium oxiderar dock kraftigt vid höga temperaturer

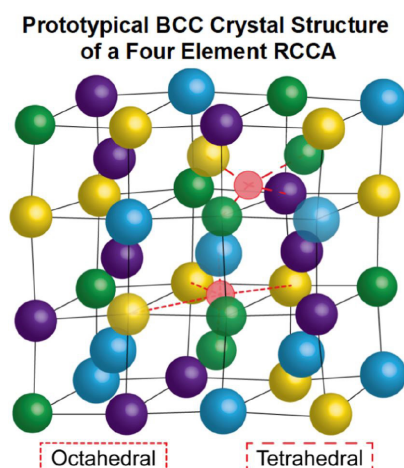
3 Wyatt, B. C., Nemani, S. K., Hilmas, G. E., Opila, E. J., & Anasori, B. (2023). Ultra-high temperature ceramics for extreme environments. *Nature reviews Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00619-0>

4 Kol med kiselkarbid (C/SiC), kiselkarbid (SiC/SiC), *advanced carbon/carbon composites* (ACC), *metal matrix composites* (MMC), titan (Ti), hafniumkarbid (HfC).

5 Peterson, G.R., Carr, R.E., & Marinero, E.E. (2023). Zirconium Carbide for Hypersonic Applications, Opportunities and Challenges. *Materials*, 16, 6158. <https://doi.org/10.3390/ma16186158>

6 Unsel, S., Goller, R., & Koch, D. (2023). Principles and approaches for the machining simulation of ceramic matrix composites at micro-scale: A review and outlook. *Open Ceramics*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100454>

7 Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review. *Applied Sciences*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053017>



Figur 6. Illustration av ett högentropiskt materials atomstruktur där de olika färgerna symboliserar olika grundämnen.¹⁰ Källa: Belcher et al.¹¹ (CC-BY licens).

om syre finns tillgängligt vilket gör att materialet inte kan användas i tillämpningar med extrema temperaturer där syre finns närvarande. Både zirkoniumkarbid och -borid har höga smälttemperaturer över 2500°C men är väldigt tunga^{8,9}. Forskningen är inriktad på att hitta sätt att göra materialen lättare, till exempel genom att tillsätta fibrer till materialen⁵.

Eldfasta, komplexa och koncentrerade legeringar

Dessa legeringar liknar högentropiska material i strukturen men består av färre grundämnen i komplexa strukturer med smälttemperaturer över 2000°C¹². Forskningen är inriktad på att tillsätta små mängder av till exempel kväve, syre och bor för att minska materialens skörhet och öka deras temperaturtålighet.

FRAMTIDEN

Vid den workshop som varit en del av avskanningsarbetet diskuterades hur den framtida militära förmågan kan se ut om extremt värmetåliga material realiserar.

Utvecklingen av extremt värmetåliga material förutses ha stor potentiell påverkan på framtida militär förmåga, bland annat genom att artificiell intelligens, avancerade beräkningar och potentiella framtida kvantdatorer möjliggör simulering av avancerade fysikaliska strukturer, såsom anisotropa fibermaterial, i olika skalor.

Idag finns fissionsdrivna ubåtar där havsvattnet används som kylning. Genom att utrusta fissionsreaktorer med extremt värmetåliga material skulle sådana reaktorer kunna placeras på land och kylas av luft istället (Figur 3). Med små och modulära fissionsreaktorer skulle förutsättningarna för energiförsörjning i väpnade konflikter och vid hantering av kriser förändras markant, exempelvis vad gäller uthållighet och logistik. Obegränsad energi skulle kunna finnas tillgänglig i fält för ledningsplatser, fordon och soldater men även för kraftiga laservapen, fältsjukhus och sjukhus.

Extremt värmetåliga material skulle kunna ge förutsättningar för snabba (hypersoniska) farkoster med öppna målsökare.

Små fusionsverk i containerstorlek kan bli mer användbara än stora anläggningar, såsom ITER¹³. Enligt vår bedömning kan det inte uteslutas att det inom 50 år kommer att finnas små fusionsverk tillgängliga. Extremt värmetåliga material krävs inuti fusionskammaren på grund av de extrema temperaturer som råder inuti kammaren. Idag används volfram vilket är för tungt för att ett fusionsverk ska kunna transporteras. Plasman inuti fusionsverken är ca 100 miljoner grader, vilket inget befintligt material tål. Istället innesluts plasman i ett magnetfält, men väggarna i plasmakammaren blir fortfarande mycket heta. Genom att öka temperaturtåligheten på ytorna samt minska vikten kan fusionsverken bli flyttbara och användas för att försörja stora anläggningar utan utsläpp och behov av stora mängder bränsle. Kommersiellt gångbar fusionskraft skulle innebära en revolution inom energiförsörjning och påverka samhälle och militär förmåga kraftigt.

Optimering av avancerade material med kombinationer av flera önskvärda egenskaper såsom låg vikt, hög smältpunkt och låg skörhet skulle kunna möjliggöra flygande farkoster med längre tid i luften än i dag, högre hastigheter även på lägre höjd och ökad lastförmåga.

Med extremt värmetåliga material förbättras de tekniska förutsättningarna för att kärnvapen kombineras med hypersoniska farkoster och därmed risken att de används som jokrar i internationella konflikter.

⁸ <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/zirconium-diboride>.

⁹ <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/zirconium-carbide>.

¹⁰ *Body centered cubic (BCC) och refractory complex concentrated alloys (RCCA)*.

¹¹ Belcher, C. H., MacDonald, B. E., Apelian, D., & Lavernia, E. J. (2023). The role of interstitial constituents in refractory complex concentrated alloys. *Progress in Materials Science*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101140>

¹² Wang, Z., Chen, S., Yang, S., Luo, Q., Jin, Y., Xie, W., Zhang, L., & Li, Q. (2023). Light-weight refractory high-entropy alloys: A comprehensive review. *Journal of Materials Science & Technology*, 151, 41–65. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.11.054>

¹³ <https://www.iter.org/>

Sammantaget växte under vårt arbete en bild fram av en framtid där Sverige behöver tänka på nya sätt. Det behöver inte bara handla om bättre prestanda och nya förmågor, utan påverkan på doktriner och behov av nya arbetssätt, exempelvis anpassade till en situation med kraftigt minskat logistikbehov och eventuellt ökade hot från andra som också utvecklar dessa material.

REKOMMENDATIONER OCH ÖVERVÄGANDEN

Som påvisats finns flera militärt relevanta tillämpningar där extremt värmetåliga material är ytterst intressanta. Vi¹⁴ har särskilt noterat tillämpningar inom stridsflyg, vapen och rymdsystem. Vi ser därför ett behov av att bevaka utvecklingen av denna typ av material. Fler aspekter än de tekniska behöver undersökas, till exempel tillgången på kritiska råmaterial, kostnadseffektiviteten och etisk lämplighet med vissa tekniska system. Det finns även strategiska skäl för att vara uppdaterad inom utvecklingen (dvs. förstå andra länders och aktörers drivkrafter och incitament).

Även tekniskt bedöms området vara komplext och omfatta många kompetenser, från djup förståelse för enskilda tillämpningar och dessas förutsättningar till förståelse för avancerade materialberäkningstekniker och nya tillverkningsmetoder. Det finns skäl för försvarsforskare att liera sig med såväl den akademiska forskningen som industriella partner. I våra diskussioner under arbets gång har det konstaterats att de riktigt intressanta tillämpningarna och den mest relevanta forskningen troligen inte görs öppet. Därmed bedöms det finnas behov av egen forskning inom området, eftersom det mest rättframma sättet att skapa inblick i det som inte publiceras öppet är att vara del av internationella nätverk. För

VARFÖR EN AVSKANNING OM EXTREMT VÄRME-TÅLIGA MATERIAL?

Projektet *Avskanning av forskningsfronten 2024* görs på uppdrag av Försvarsmakten (Försvarsmaktens beställning AT.9221606 *Avskanning FOI 24*). Projektet syftar till att på bredden fånga upp forskning med potentiell relevans för Försvarsmaktens förmåga i ett långsiktigt perspektiv. Projektet ingår i programmet för *Forskningsskanning och teknisk prognos*, en del av Försvarsmaktens samlingsbeställning av forskning och teknikutveckling (FoT). Projektets huvudsakliga verksamhet är att genomföra avskanningar av forskningsfronten inom utvalda ämnen, vilket kräver identifiering av sådana möjliga avskanningsämnen. Urval av de mest relevanta ämnena görs tillsammans med Försvarsmakten. Under våren 2023 genomfördes en sådan urvalsprocess där extremt värmetåliga material prioriterades som ett av tre områden. Det konstaterades att material som tål extrema temperaturer är intressanta för flera försvarstillämpningar samt att utvecklingen i stort drivs av civila aktörer. Planering av avskanningen initierades sedan under hösten 2023 och avskanningen startades i början av 2024.

att få tillgång till sådana nätverk krävs egen verksamhet inom något i sammanhanget relevant forskningsområde. Sådan egen forskning som har extern samverkan finns redan idag, till exempel inom flygteknik och framdrivning, men det kan behövas nya uppdrag för att säkerställa relevant forskning och kompetensbyggande. Ett sådant uppdrag skulle kunna inriktas mot utveckling av högentropiska material för att ta ett exempel. Dessutom finns det i Sverige framstående verksamhet inom materialberäkningar. Här skulle försvarsmyndigheter, industri samt universitet och högskolor med fördel kunna bilda kluster för grundforskning och utveckling inom något av de nya innovationsprogrammen. ■

Rekommenderad läsning

En genomgång av dagsläget inom flygmotortillämpningar:

Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review. *Applied Sciences*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053017>

En aktuell genomgång av hypersoniska flygsystem, dess tekniska utmaningar samt beräkningstekniska frågeställningar:

Dalenbring, M. (2021). Beräkningsmodell för strukturuppvärmning av flyg och robotsystem, Tekniska utmaningar och användbara semiempiriska handboksmetoder vid hypersoniska färter, FOI-R--5125--SE.

En framåtblickande artikel med fokus på nya högentropiska material:

Wyatt, B. C., Nemani, S. K., Hilmas, G. E., Opila, E. J., & Anasori, B. (2023). Ultra-high temperature ceramics for extreme environments. *Nature reviews. Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00619-0>

En lättillgänglig sammanställning av högentropiska material:

Brandt, H. (2020). High-Entropy Ceramics - Designing Randomness at the Atomic Scale, Fraunhofer Institute for Technological Trend Analysis INT.

En värdering av den potentiella nyttan av högentropiska material inom försvarsdomänen baserad på sammanställningen ovan:

Hult, G., & Almladh, T. (2021). Technology Forecast 2021 – Military Utility of Future Technologies, Försvarshögskolan.

¹⁴ I detta avsnitt avses med "vi" författarna till detta memo.