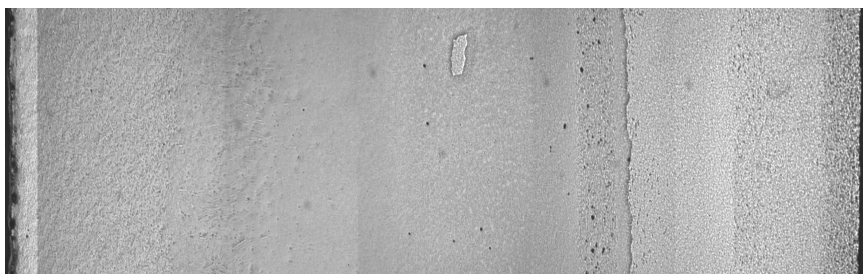


Patrik Lundberg, Pernilla Magnusson

Framtida keramiska skyddssystem



Gradientmaterial av titandiborid och titan. Halten titan ökar stegvis från vänster (5%) till höger (100%)

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Vapen och skydd
147 25 Tumba

FOI-R--0921--SE

September 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Patrik Lundberg, Pernilla Magnusson

Framtida keramiska skyddssystem

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0921--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år September 2003	Projektnummer E2022
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Patrik Lundberg Pernilla Magnusson	Projektledare Ewa Lidén	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Patrik Lundberg, Pernilla Magnusson	
Rapportens titel Framtida keramiska skyddssystem		
Sammanfattning (högst 200 ord) FOI har påbörjat arbetet med att utforma, tillverka och testa ett gradientmaterial för skyddstillämpningar. Tanken är i första hand att sammanbindningen av keram och metall ska förbättra såväl skyddsförmågan som flerskottskapaciteten. Materialet ska ha tillräcklig hårdhet på utsidan för att kunna förstöra och stoppa en hårdmetallprojektil. Några första riktiga gradientmaterial baserade på titandiborid och titan har tillverkats och arbetet inriktas nu på att försöka framställa ett material med en optimal kombination av skyddande och strukturbärande egenskaper.		
Nyckelord: lätta skydd, ballistiskt skydd, keramer, gradientmaterial		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 15 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--0921--SE	Report type User report
	Research area code 5. Combat	
	Month year September 2003	Project no. E2022
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Patrik Lundberg Pernilla Magnusson	Project manager Ewa Lidén	
	Approved by	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Patrik Lundberg	
Report title (In translation) Future ceramic armours		
Abstract (not more than 200 words) A gradient material, usefull for armour application, is under development at FOI. The idea is to improve the protection capability and multi impact performance by mechanically joining the ceramic and the backing. The final material must have sufficient hardness on the outside to be able to erode and stop tungsten carbide projectiles. A graded material based on titanium carbide and titanium has been produced. Future work will focus on optimisation of the gradient to get the best relation between protection performance and structual properties.		
Keywords light weight armour, ballistic protection, ceramics, gradient materials		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 15 p.	
	Price acc. to pricelist	

1. Bakgrund

Inom försvarsmaktsprojektet "Skydd mot finkalibrig AP-ammunition" studeras ballistiska skydd mot olika typer av pansarbrytande finkaliberprojektiler. Under 2003 har en översiktsrapport, "Lätta skydd mot splitter och finkalibriga projektiler" utgivits [1] som sammanfattar det allmänna kunskapsläget vad gäller splitter och finkaliberprojektiler samt olika typer av ballistiska skydd verksamma mot dessa.

En typ av skydd mot pansarbrytande projektiler (AP-projektiler) som tas upp i rapporten är skyddskonstruktioner innehållande keramiska material. Denna typ av skydd tillhör kategorin konsumerande pansar, dvs. de skyddar i huvudsak genom att deformera, konsumera och bromsa¹ en penetrerande projektil. Den materialegenskap som framför allt har inflytande på dessa tre processer är målmaterialets hållfasthet. En högre hållfasthet möjliggör att hårdare och därmed starkare projektilmaterial kan bekämpas.

Eftersom flera av dagens pansarbrytande finkaliberprojektiler (AP-projektiler) är tillverkade av hårdmetall, ett hårt material som i sig själv är en keram-metall komposit, krävs att skyddsmaterialet har mycket hög hållfasthet för att projektilen ska deformeras. För närvarande är det bara keramiska skyddsmaterial som uppvisar en sådan hållfasthet.

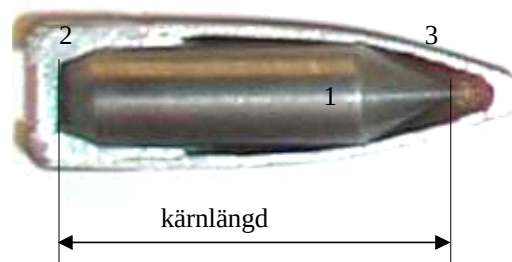
I denna rapport diskuteras dels utvecklingen på kerammaterialområdet vad gäller material lämpliga som skydd mot hårdmetallprojektiler, dels hur penetrationsförloppet för en hårdmetallprojektil i princip går till. Vidare redovisas arbetsläget inom forskningsområdet keramiska gradientmaterial. Där undersöks möjligheterna att via sintring sammanfoga keramer och metaller och på så sätt skapa ett kerambaserat skyddsmaterial mot pansarbrytande projektiler som också har viss lastbärande förmåga.

2. Pansarbrytande finkaliberprojektiler av hårdmetall

AP-projektiler (Armour Piercing) för eldhandvapen utgör ett potentiellt hot mot många lätta stridsfordon. Eftersom de bästa varianterna har stor penetrationsförmåga i ett enkelskiktat stålpansar kan den enskilda soldaten redan idag bekämpa många lätta stridsfordon med sitt handeldvapen, givet att rätt ammunition finns tillgänglig.

De AP-projektiler som har störst penetrationsförmåga består av en kärna av hårdmetall omgiven av en mantel, vanligtvis av tombak eller stål, samt eventuellt ytterligare någon stödstruktur. Mantelns huvudsakliga funktion är att stödja kärnan under utskjutning samt ge kulan lämplig aerodynamisk form. Materialet i kärnan, som är den penetrerande delen, är en volframkarbid-kobolt komposit (eng. cemented carbide). Andelen kobolt varierar mellan olika kvaliteter men ligger normalt mellan 6 och 10 viktsprocent. En högre halt kobolt ger ett något mjukare material med en högre brottseghet [2]. Hårdmetallens stora hållfasthet (runt 5 GPa vid enaxligt tryckprov [3]) gör att den vid penetration förblir odeformerad i alla metalliska målmaterial (stelkroppspenetration). Detta gör projektiltypen mycket svårstoppad med skydd som bara består av ett enda metallskikt. Figur 1 visar hur en hårdmetallprojektil kan vara uppbyggd.

¹ Med deformation menas att projektilen ändrar form men bibehåller merparten av sin massa. Konsumtion innebär att deformationen blir så stor att projektilmaterialet inte längre kan hålla ihop. Vid konsumtion förkortas projektilkroppen succesivt framifrån.



Figur 1 AP-projekttil i kaliber 7.62. Hårdmetallkärnan (1) stöds av en stödkopp av aluminium (2) och en mantel av stål (3).

3. Keramiska material för finkalibertillämpningar

Keramiska material för ballistiska skydd karakteriseras av hög hårdhet (5-10 ggr vanligt pansarståls) men relativt låg draghållfasthet (draghållfastheten är ca 1/5 av skjuvhållfasthet). Hårdheten speglar materialens höga skjuvhållfasthet och draghållfastheten den låga brottsegheten (ca 1/15 av pansarståls). De keramer som används i skyddstillämpningar har vanligtvis låg densitet (2500-4500 kg/m³).

Från att det tidigare endast rörde sig om ett fåtal olika kerammaterial, t ex aluminiumoxid (Al₂O₃), kiselkarbid (SiC) och borkarbid (B₄C), finns idag en mycket stor skara som kan användas i pansartillämpningar. Det stora utbudet är i första hand ett resultat av den allmänna satsningen på materialteknikområdet. Flera leverantörer av en keramtyp resulterar också i många olika kvalitéer av samma materialtyp.

Utvecklingen av nya kerammaterial för skyddstillämpningar är i huvudsak inriktad mot att dels sänka produktionskostnaderna, dels öka användbarheten, dvs. förbilliga och förenkla utnyttjandet av keramiska material i skyddssammanhang. Dessa två frågor hänger intimt samman då produktionskostnaderna i stor utsträckning styrs av efterfrågan och efterfrågan i sin tur är kopplad till hur lätt det är att utnyttja materialen i en skyddslösning.

För att förbättra användbarheten krävs sannolikt att materialens brottseghet förbättras. På så sätt minskar behovet av stödjande strukturer och smarta geometriska utformningar (se kapitel 5). Att förbättra segheten med bibehållen hållfasthet är dock svårt då hållfasthet och sprödhet hänger intimt samman. Hög hållfasthet innebär förenklat att materialstrukturen är låst och det huvudsakliga sätt deformation kan ske på är genom sprickbildning då övriga deformationsprocesser är blockerade.

Trots svårigheterna försöker man åstadkomma hållfasta och samtidigt sega keramer, t ex genom att förfina mikrostrukturen, utveckla kompositer eller "legeringar" sammansatta av flera olika kerammaterial såväl som direkta keram-metall blandningar och tillsättande av försegande strukturer (fibrer, whiskers).

En annan metod att undertrycka kerammaterialens sprödhet och samtidigt göra dessa mer lättutnyttjade i skyddstillämpningar är att redan vid tillverkningen sammanfoga keram-materialet med metall. Denna metod skulle sannolikt förbättra skyddsegenskaperna avsevärt samtidigt som möjligheterna att utnyttja keramer inte bara som skyddsmaterial utan också som en del av den bärande konstruktionen ökar (se kapitel 6).

4. Penetrationsförloppet i metalliska och keramiska material

I metalliska målmaterial såsom stål, titan och höghållfast aluminium penetrerar en hårdmetallprojektil som en stel kropp, dvs. den förblir odeformerad vid normala anslagshastigheter². Penetrationsförloppet kan förenklat beskrivas som ett inbromsningsförlopp där bromskraften endast beror av målmateriallets hållfasthet. Tröghetseffekterna är av underordnad betydelse då anslagshastigheterna i finkalibertillämpningar är relativt låga, $v_p = 1000$ m/s. Eftersom hållfastheten inte ändras nämnvärt under förloppet är bromskraften i stort sätt konstant. Röntgenblixtbilderna i figur 2 visar hur en hårdmetallprojektil förblir odeformerad då den penetrerar ett titanmål. Anslagshastigheten är ca 950 m/s.

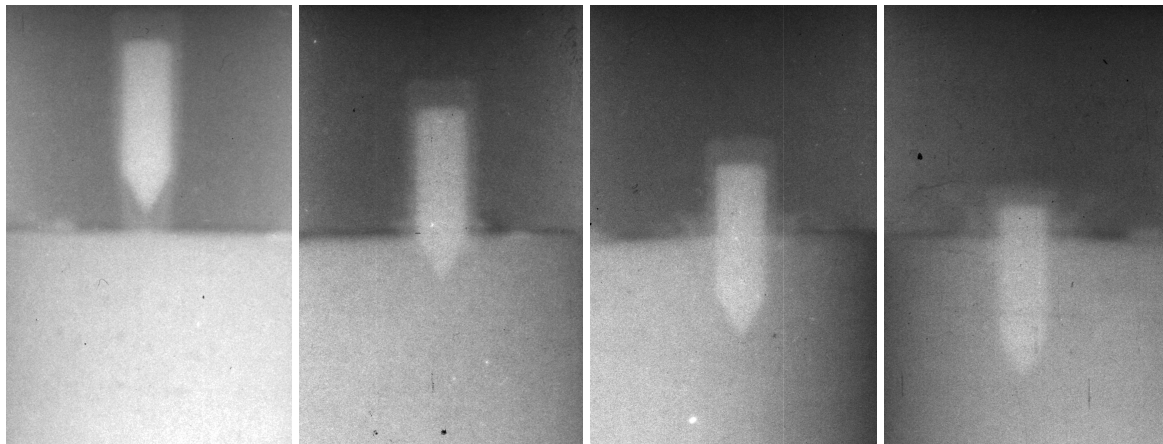


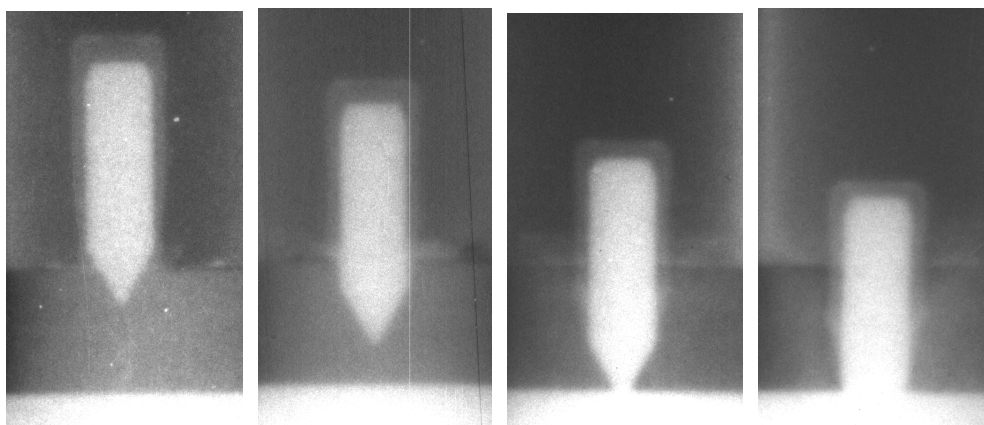
Fig. 2 Hårdmetallprojektil under penetration i titan. Anslagshastigheten är ca 950 m/s.

Penetrationsförloppet i keramiska material skiljer sig avsevärt från metallfallet. I keramer beror hållfastheten i huvudsak på brottmekaniska processer där materialet fragmenteras, krossas och förflyttas. Dessa processer är irreversibla, dvs. har väl materialet genomgått dessa steg kan det inte nämnvärt "läka" igen; jämför med plastisk deformation där målmaterialiet endast trängs undan utan någon nämnvärd fragmentering.

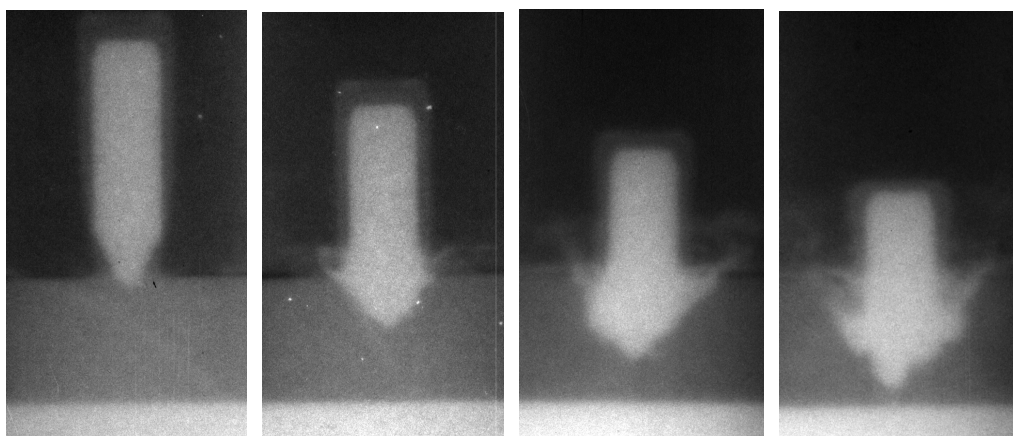
Motståndet mot såväl fragmentering som förflyttning av den krossade keramen påverkas av yttre krafter varför motståndet erhåller tryckberoende hållfasthetsegenskaper. Detta innebär att en given keram kan uppvisa olika penetrationsmotstånd och därmed olika skyddsförmåga beroende på hur väl den hålls samman under penetrationsförloppet.

Ett indirekt mått på målmaterialiets penetrationsmotstånd och därmed skyddsförmåga är penetrationshastigheten, dvs. den hastighet med vilken hållkanalen i målmaterialiet fördjupas. Ett högt motstånd ger en låg penetrationshastighet och därmed en snabb deformation/konsumtion av projektilen. Penetrationshastigheten kan bestämmas genom att avbilda penetrationsförloppet med röntgenblixsteknik. Figur 3 visar en sådan serie röntgenblixtbilder över ett pågående penetrationsförlopp i tre olika kerammaterial med successivt högre hållfasthet, Tibal (titandiborid-aluminiumkomposit med ca 15 vol. % Al), aluminiumoxid och titandiborid. Hårdheten hos titandiborid är 3 ggr så hög som hos Tibal och 1.5 ggr så hög som hos aluminiumoxid. Kerammaterialet är i form av tunna plattor som limmats mot en bakomvarande stålcylander och projektilen är tillverkad av hårdmetall.

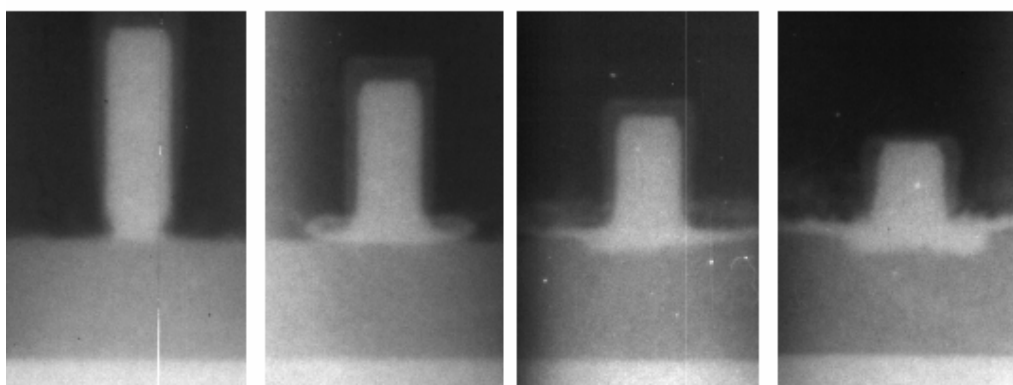
² Vid någon anslagshastighet kommer projektilen att deformeras eftersom tröghetskrafterna växer kvadratisk med penetrationshastigheten. För en hårdmetallprojektil i stål vet man att denna hastighet är högre än 1350 m/s.



(a) Tibal



(b) Aluminiumoxid



(c) Titandiborid

Fig. 3 Penetration i Tibal (a), aluminiumoxid (b) respektive titandiborid (c).
Anslagshastigheten i alla tre fallen är ca 950 m/s.

I Tibal penetrerar projektilen som en stel kropp medan den i aluminiumoxid deformeras och konsumeras. Då titandiborid utnyttjas upphör i stort sätt penetrationen eftersom målets hållfasthet nu överstiger projektillasten (åtminstone initialt). För att erhålla projektilkonsumtion krävs alltså en hög hållfasthet hos målmaterialet, i nivå med aluminiumoxid eller högre.

5. Kerampansar för skydd mot hårdmetallprojektiler

Kerammaterialet ingår oftast som en del i ett yttre tilläggsskydd. Tilläggslösningar är enklast eftersom man då slipper svårigheterna med att integrera kerammaterialet i plattformens bärande konstruktion. Tilläggslösningar ger också möjligheten att enkelt byta ut skyddet vid reparation eller då hotet förändras. En stor nackdel ur viktssynpunkt är att ett tilläggsskydd inte bidrar till plattformens strukturell hållfasthet utan endast skyddsnivån.

Olika typer av stödjande strukturer används beroende på konstruktionsfilosofi, några är dock nödvändiga på grund av kerammaterialens låga brottseghet. *Backing* är ett stöd placerat direkt bakom kerammaterialet. Denna bidrar till att det fragmenterade kerammaterialet hålls på plats. Backingmaterialet ska också ta upp en stor del av den rörelseenergi projektilen har genom att deformeras plastiskt. *Frontskyddet* som placeras framför kerammaterialet skyddar keramen mot lågnivåhot och hjälper till att hålla större fragment på plats om sprickor uppstår.

Själva keramdelen i skyddet består vanligtvis av en mosaik av rektangulära eller hexagonala keramplattor. Plattorna är monterade, ofta via ett limförband, direkt mot backingmaterialet. Backingen är vanligtvis av stål, höghållfast aluminium, titan eller ett kompositmaterial. Eftersom man vill åstadkomma viktseffektiva lösningar fungerar ibland själva fordonsstrukturen som backing.

Frontskyddet består vanligtvis av fiberkomposit eller metall som limmats eller skruvats fast. Keramplattornas form, radiella storlek och eventuella överlappning är avpassad till önskad flerskottskapacitet. Det är också viktigt att inga ballistiska hål (oskyddade ytor) uppkommer i skarvar eller hörn. Vanligast är plana plattor men man kan även tillverka keramer med dubbelkrökt form.

Den mekaniska kopplingen mellan keramplattorna samt mellan keramplattorna och bakomvarande backing bör av vågutbredningsskäl vara impedansanpassade³. Genom att impedansanpassa alla gränssytor (med lämpligt materialval och lämplig geometrisk form) kan skadeutbredningen i den träffade plattan minimeras samtidigt som omgivande keramplattor förblir hela.

Skyddsförmågan⁴ hos en given skyddskonstruktion beror i första hand på vilken projektil som den avser att skydda mot. Eftersom det alltid finns ett övermatchande hot måste man specificera vad som avses då skyddsförmågan anges. För ett specifikt hot beror skyddsförmågan i huvudsak på vilken typ av keram som används, materialet i backingen och hur backingen är utformad. Hur stor del av penetrationen som tas upp i kerammaterialet respektive backing spelar också en viktig roll. För att optimera en skyddskonstruktion krävs, förutom stor erfarenhet, ofta stora försöksserier alternativt tillgång till avancerade beräkningsverktyg.

³ Elastisk vågutbredning spelar stor roll för hur kerammaterialet fragmenteras. Normalt uppstår stora tryckspänningar under penetrationen. Dessa utbreder sig i kerammaterialet med en karakteristisk hastighet och reflekteras som dragspänningar i gränssytor med olämpliga impedansförhållanden.

⁴ Vanligtvis viktskyddsförmågan, dvs den relativa viktsbesparing en viss skyddskonstruktion uppvisar relativt ett referensskydd, ofta pansarstål.

6. Gradientmaterial som skydds- och strukturmateriel

I stället för att förbättra själva kerammaterialets skyddsförmåga via de mekaniska egenskaperna (högre hårdhet och större seghet) har intresset ökat för hur en keram kan göras virtuellt segare genom att fysiskt sammanbinda denna med en metallbacking.

En lovande teknik är att redan vid tillverkningen skapa ett material som består av keram på ena sidan och metall på den andra. Mellan dessa ytskikt blandas metall och keram i steg så att en önskad övergång från keram till metall erhålls. Med en lämplig utformning kan keram och metall fås att samverka så att uppkomna dragbelastningar hamnar i den duktilare metallen medan tryckbelastningar tas upp av den hårda keramen. Material av denna typ kallas gradientmaterial (GM) eller ibland funktionella gradientmaterial (FGM) om strukturen är optimerad mot en viss tillämpning.

Tanken är i första hand att sammanbindningen av keram och metall, i form av ett gradientmaterial, ska förbättra såväl skyddsförmågan som flerskottskapaciteten. Men samtidigt ökar också möjligheten att direkt använda skyddsmaterialet som en del i den bärande konstruktionen. För att detta ska bli möjligt måste gradientmaterialet uppvisa tillräcklig seghet och ha rimlig bearbetbarhet samt i någon mån gå att sammanfoga (svetsa).

Ett gradientmaterial av keram och metall är i sin enklaste form uppbyggd av separata (diskreta) skikt. Varje skikt har en unik sammansättning av metall och keram. Genom att variera sammansättningen varierar också de mekaniska egenskaperna. Varje skikt kan ses som ett separat material (metallmatriskomposit MMC eller keram-metall komposit CMC).

Enklaste typen av gradientmaterial tillverkas genom att keram- och metallpulver först blandas i önskade proportioner, en blandning för varje tänkt skikt. Dessa blandningar placeras därefter ovanpå varandra i en form varefter det hela sintras med lämplig metod.

Med hjälp av mer avancerade blandnings- och formfyllningsmetoder kan andra typer av materialgradienter tillverkas, t ex en kontinuerlig gradient i tjockleksriktningen, se figur 4.

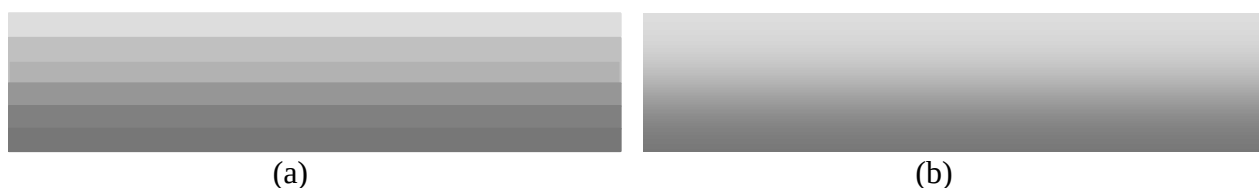


Fig. 4 Exempel på en diskret (a) och kontinuerlig (b) sammansättningsgradient.

FOI har under 2002 och 2003 påbörjat arbetet med att utforma, tillverka och testa ett gradientmaterial. Som utgångsmaterial för tillverkningen har FOI valt keramen titandiborid (TiB_2) och metallen titan (Ti). Titandiborid är i sig ett keramiskt skyddsmaterial med hög skyddsförmåga. Titan bedöms ha potentialen att på sikt ersätta pansarstål då såväl skyddsförmågan som möjligheten att utnyttja titan som konstruktionsmaterial är stor (går att bearbeta och sammanfoga). Titandiborid och titan är också kemiskt kompatibla med varandra även om titanborid (TiB) kan bildas vid tillverkningen. Titandiborid är också elektriskt ledande vilket möjliggör bearbetning av gradientmaterialet med trådnistningsmetoder. Ett

gradientmaterial tillverkat av titandiborid och titan har sammantaget potentialen att ge önskade egenskaper vad avser skyddsförmåga och strukturegenskaper men är sannolikt inte är ett optimalt val på sikt, bl.a. på grund av den höga densiteten, ca 4500 kg/m³.

FOI har i samarbete med Stockholms Universitet undersökt möjligheterna att tillverka fulltät material med olika blandningsförhållanden mellan titandiborid och titan. Tillverknings-tekniken som utnyttjas kallas spark plasma sintering (SPS) och är en relativt ny teknik för framställning av fulltät material där traditionell sintring inte är tillämplig. SPS-tekniken beskrivs utförligare i en tidigare FOI rapport [4].

Inledningsvis har arbetet inriktats på att identifiera lämplig sammansättning av det yttersta skiktet. Detta ska vara tillräckligt hårt för att kunna konsumera en hårdmetallprojektil men samtidigt ha tillräcklig seghet för att materialet i sin helhet ska erhålla önskade strukturegenskaper.

Det första material som tillverkades var ett material med 5% titan. Detta uppvisade mycket bra ballistiska egenskaper [5,6]. I ett försök att identifiera en optimal halt av titan med avseende på skyddsförmåga och strukturegenskaper tillverkades därefter en serie material med varierande halt titan. Materialen karakteriserades vad avser hårdhet, seghet och penetrationsmotstånd. Undersökningen visar att även högre halter av titan ger bra skyddsförmåga men också att dessa sammansättningar blir relativt hårda och får låg brottseghet. I figur 5 illustreras hur hårdheten och segheten samt penetrationsmotståndet (omvänt proportionellt mot penetrationshastigheten) för titandiborid-titankompositen varierar med titanhalten (principiella kurvor). Alla egenskaperna i figur 5 är normerade till egenskaperna för ren titandiborid.

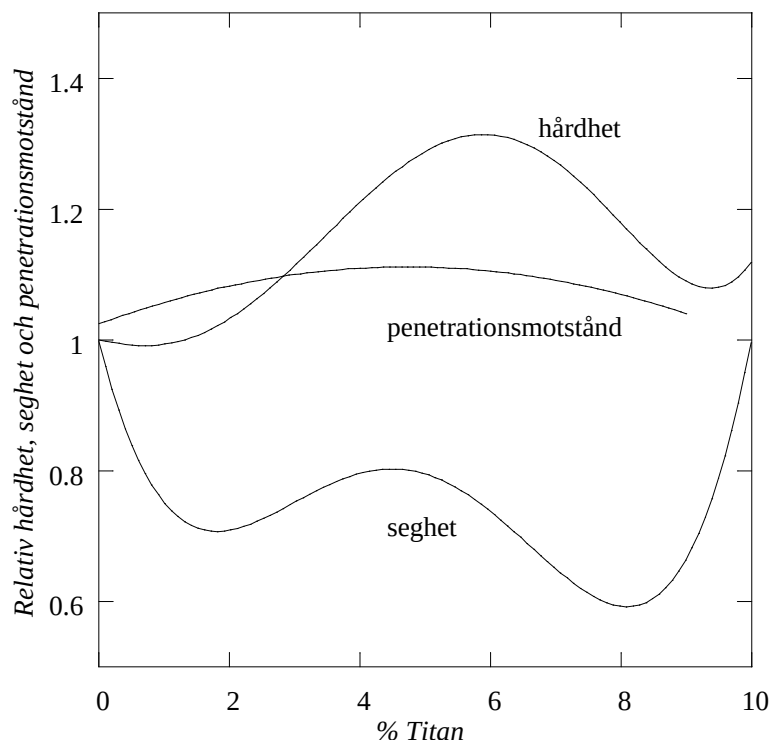


Fig. 5 Relativ hårdhet, seghet och penetrationsmotstånd som funktion av halten titan. Projektilen är en hårdmetallprojektil (AP 8).

Eftersom penetrationsmotståndet verkar vara relativt oberoende av halten titan kan man sannolikt välja en relativt hög halt titan (8-15%) i det yttre skiktet.

Några första försök att tillverka ett helt gradientmaterial med diskreta sammansättningssteg har också genomförts. Initialt har man haft stora problem med att materialet spricker mellan skikten. Orsaken är sannolikt stora inre spänningar i kombination med låg brottseghet. Spänningarna uppkommer på grund av att värmeutvidningskoefficienten varierar något med sammansättningen ($\alpha_{\text{Ti}} = 8.9 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ och $\alpha_{\text{TiB}_2} = 7 \cdot 10^{-6} / \text{K}$).

Med förbättrad tillverkningsprocess har man dock i några fall lyckats få till två olika gradientmaterial. Ett uppbyggt av fyra skikt (5%, 20%, 40% och 50% titan) och ett uppbyggt av åtta skikt (5%, 10%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% och 100% titan). Figur 6 visar ett exempel på hur gradienten i åttaskiktsmaterialet ser ut. En sammanfattning av tillverkning och materialkaraktisering ges i bilagan (tillverkning och karakterisering).

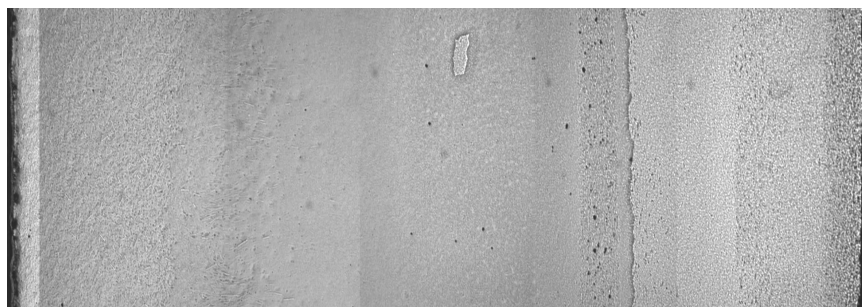


Fig. 6 Gradientmaterial av titandiborid och titan. Halten titan ökar i åtta diskreta steg, från 5% titan längst till höger, upp till ren titan längst till vänster i bilden.

Det fortsatta arbetet inriktas nu på att förbättra tillverkningstekniken och tillverka material med en högre halt titan i första skiktet. En högre halt titan ger tillräcklig skyddsförmåga och sannolikt också ett bättre gradientmaterial vad avser konstruktionsegenskaperna. En viktig uppgift är också att dimensionera de olika skiktens tjocklekar så att en balans mellan det hårda ytskiktet, den graderade övergångszonen och det bakomvarande titantitanskiktet erhålls.

7. Beräkningsverktyg för utveckling av keramiska skydd för AP-projektiler

Ett fungerande beräkningsverktyg är ett viktigt hjälpmedel vid konstruktion, utveckling och optimering av keramiska skydd. För mer komplicerade skyddskonstruktioner, t ex då ett gradientmaterial ska utnyttjas är beräkningsverktyg nödvändiga eftersom skyddet då ska tillverkas till färdig form och prestanda.

Eftersom såväl kerammaterialets hållfasthet som brottegenskaper är tryckberoende uppvisar keramiska material mycket varierande skyddsförmåga beroende på omgivningens utformning (typ av backing, mekanisk koppling till omgivning etc). Att få fram tillförlitliga beräkningsverktyg i form av materialmodeller och indata för keramiska material är därför svårt. Dels på grund av problemets komplexitet men också på grund av de stora resurser som krävs för att ta fram indata (materialegenskaper) vid de tryck och töjningshastigheter som är intressanta.

Även med bra indata kompliceras beräkningarna ytterligare då interaktionen mellan en hårdmetallprojektil och ett keramiskt material ska modelleras. Detta eftersom även hårdmetallen är ett keramiskt material med tryckberoende egenskaper.

FOI använder för närvarande ett kommersiellt program från Century Dynamics Inc., AUTODYN [7], för modellering av keramiska skydd och hårdmetallprojektiler. Programmet ger användaren möjlighet att inom vissa ramar skriva egna materialmodeller.

För analyser av keramiska skyddslösningar krävs modeller som kan behandla såväl det oskadade som det fragmenterade materialets uppförande, liksom även tillståndet däremellan då materialegenskaperna gradvis förändras pga. skadetillväxt. FOI har valt att jobba med JH2-modellen av Johnson och Holmquist [8].

I JH2-modellen beror keramens hållfasthet bland annat på en skadevariabel som gradvis ökar från noll för oskadat material till ett för helt skadat material. I sistnämnda fallet har materialet blivit krossat (pulveriserat) och har då hållfasthet bara om ett hydrostatiskt övertryck råder (trycket försvårar kornens glidning mot varandra). Även hållfastheten för det oskadade materialet är tryckberoende i modellen. Skadevariabelns ökning "drivs" i modellen av den oelastiska deformationen (den deformation som återstår efter avlastning). JH2-modellen är en utveckling av en tidigare modell, JH1 [9]. I båda modellerna ökas skadevariabeln gradvis. Hållfastheten i JH1 förblir hög ända till dess att skadevariabeln når värdet ett, då den abrupt faller ned till värdet för helt skadat material. I JH2 minskar däremot hållfastheten gradvis i takt med att skadevariabeln ökar, vilket ger bättre resultat i vissa fall. Johnson och Holmquist har publicerat egna parametrar för bland annat aluminiumoxid [10], borkarbid [11] och kiselkarbid [12].

En första omgång simuleringar av hårdmetallprojektilers penetration i geometriskt enkla kerammål har genomförts under 2002 [13]. Såväl projektil som keram modellerades med JH2 modellen [8]. Avsikten med studien var framför allt att försöka få fram indata för hårdmetall via tidigare genomförda skjutförsök.

Simuleringarna visar dock på stora problem med beräkningsverktyget. Orsaken är sannolikt en kombination av numeriska problem och brister i materialmodellen. Dessa problem måste åtgärdas innan man kan utnyttja verktyget för analyser av mer komplicerade skyddslösningar.

8. Slutsatser

FOI har under 2002 och 2003 påbörjat arbetet med att utforma, tillverka och testa ett gradientmaterial för skyddstillämpningar. En ordentlig bindning mellan keram och metall bör förbättra såväl skyddsförmågan som flerskottskapaciteten. Gradientmaterialet ska ha tillräcklig hårdhet på utsidan för att kunna konsumera och stoppa en hårdmetallprojektil samt tillräcklig seghet på insidan för att om möjligt kunna fungera som en del av fordonsstrukturen.

Några första riktiga gradientmaterial baserade på titandiborid och titan har tillverkats och arbetet inriktas nu på att försöka framställa ett material med en optimal kombination av skyddande och strukturbärande egenskaper.

Referenser

1. E Lidén, John Ottosson, Lätta skydd mot splitter och finkalibriga projektiler. FOI-RH--0185--SE, September 2003.
2. ASM special handbook, tool materials. ISBN 0-87170-545-1, 1995
3. P. Skoglund. Kvasistatisk tryckprovning av volframkarbid/koboltlegeringar, FOA-R--00-01411-310--SE.
4. A. Pettersson, M Oskarsson och J. Pettersson, "Gradient- och matrismaterial – en litteraturstudie", Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, FOI-R--0128--SE, juni 2001.
5. M. Oskarsson, P. Lundberg, M. Nygren, A. Pettersson and P. Pettersson, "Al₂O₃ and (TiB₂)_{0.95}(Ti)_{0.05} Produced by Spark Plasma Sintering for Armour Applications", 20th International Symposium of Ballistics, 23-27 september, 2002, Orlando, Florida.
6. P. Lundberg och Magnus Oskarsson, "Skjutförsök mot SPS-tillverkade Al₂O₃- och TiB₂-baserade material", Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, FOI-RH--0092--SE, december 2002.
7. N. K. Birnbaum, M. S. Cowler, M. Itoh, M. Katayama and H. Obata, AUTODYN — an interactive non-linear dynamic analysis program for microcomputers through supercomputers. *9th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology*, August 1987, Lausanne, Switzerland.
8. G. R. Johnson and T. J. Holmquist, An improved computational constitutive model for brittle materials. In *High Pressure Science and Technology* — 1993, Vol. 2, pp. 981-984 (Edited by S. C. Schmidt, J. W. Shaner, G. A. Samara and M. Ross). AIP Press, NY (1994).
9. G. R. Johnson and T. J. Holmquist, A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Proceedings of EXPLOMET Conference*, San Diego, August 1990.
10. C. E. Anderson, Jr., G. R. Johnson and T. J. Holmquist, Ballistic experiments and computations of confined 99.5% Al₂O₃ ceramic tiles. *Proc. 15th Int. Symp. on Ballistics*, Jerusalem, Israel, 1995
11. G. R. Johnson and T. J. Holmquist, Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressure. *J. Appl. Phys.*, **85**(12), 8060-8073 (1999).
12. T. J. Holmquist and G. R. Johnson, Modeling ceramic dwell and interface defeat. *Presented at the PAC RIM 4 International Conference on Advanced Ceramics and Glasses*, Maui, Hawaii, November, 2001.
13. A Tjernberg, Modellering av hårdmetall som projektilmaterial. FOI-R--0834--SE 2003.
14. G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn och D. B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements", *Journal of the American Ceramic Society*, **64**, 533-538, 1981.
15. B. R. Lawn, A. G. Evans och D. B. Marshall, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System", *Journal of the American Ceramic Society*, **63**, 574-581, 1980.

Bilaga (tillverkning och karakterisering)

Två olika tillverkningar har genomförts. Dels tillverkades gradientmaterialens olika skikt som separata bitar för att möjliggöra materialkarakterisering och ballistisk provning, dels som ett komplett gradientmaterial.

För mekanisk och ballistisk testning tillverkades plattor med en diameter av 38 mm och en tjocklek av 6 mm. Hårdhet (H) och brottseghet (K_{1c}) mättes på fint polerade provbitar med hjälp av Vickersintryck med en last av 98 N. Hårdheten och brottsegheten utvärderades enligt Anstis m.fl. [14,15]. Densiteten mättes med hjälp av Archimedes princip. Sintringsförhållanden och uppnådd densitet redovisas i tabell 1 och hårdhet och brottseghet i figur 6 och 7.

Tabell 1

Prov (% Ti)	Temperatur (°C)	Tryck (MPa)	Tid (min)	Densitet (g/cm ³)
0	1850	125	5	4.21
1	1450	50	5	4.48
2	1450	50	5	4.49
3	1450	50	5	4.49
4	1450	50	5	4.51
5	1450	60	5	4.50
6	1450	50	5	4.50
7	1450	50	5	4.49
8	1450	50	5	4.52
9	1450	50	5	4.46
10	1500	75	5	4.52

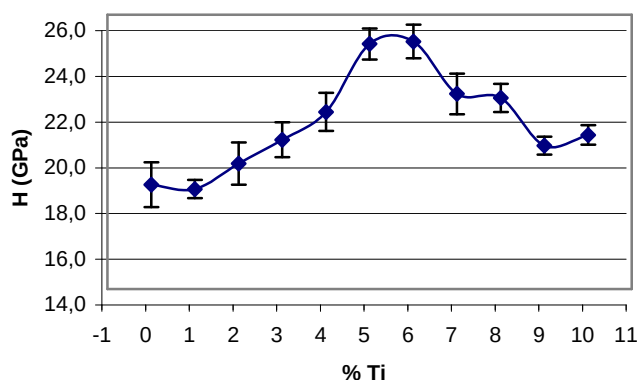


Fig. 6 Hårdhet (H) som funktion av titaninnehåll. Mätvärdet för 0 % Ti, dvs ren TiB_2 är för ett kommersiellt material.

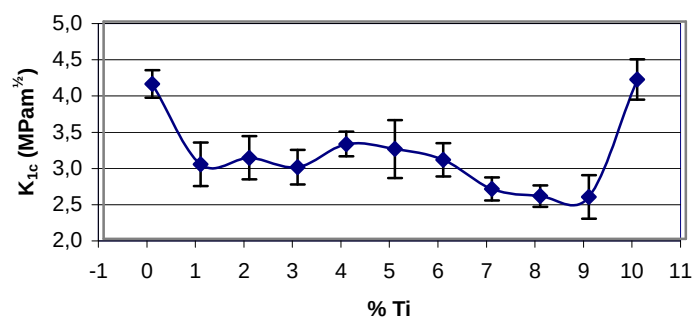


Fig. 7 Brottseghet (K_{1c}) som funktion av titaninnehåll. Mätvärdet för 0 % Ti, dvs ren TiB_2 är för ett kommersiellt material.

Proverna i Ti/ TiB_2 -serien har undersökts i svepelektronmikroskop (SEM). Undersökningen visar att titanet har fördelat sig jämt över hela provet. Detta är en förutsättning för att få jämna och pålitliga materialegenskaper. Figur 8 visar strukturen hos fyra olika sammansättningar. I vissa prov har porliknande håligheter observerats. Det är dock oklart om porerna härrör från tillverkningen eller om det är urrivningar av material från provprepareringen (slipning och polering).

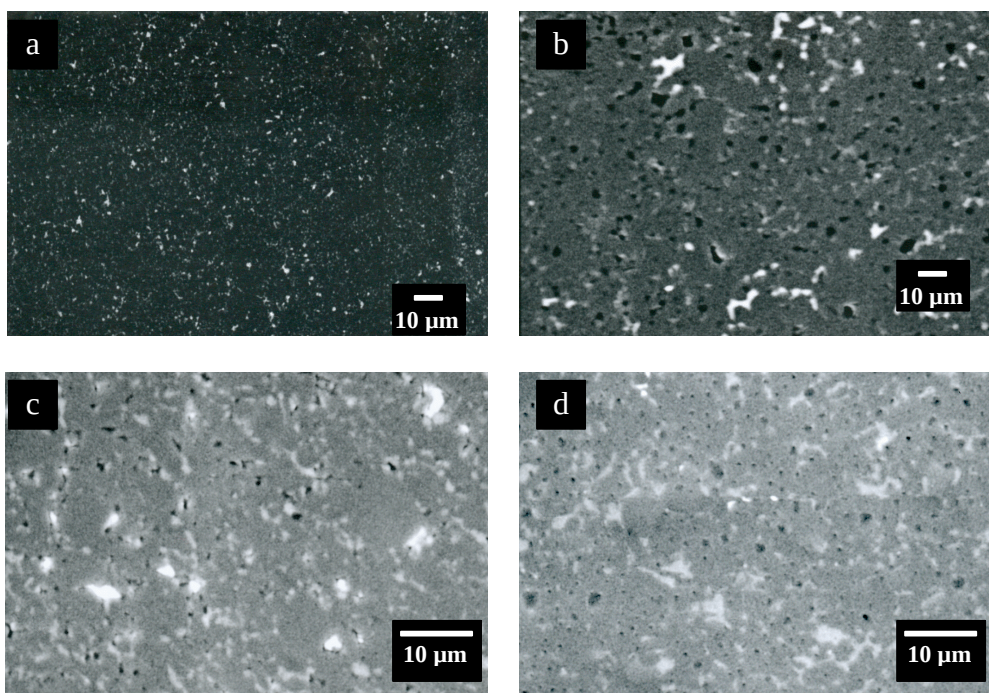


Fig. 8 SEM-bilder på Ti/ TiB_2 med olika mängd titan (a) 1 vikt% Ti, (b) 3 vikt% Ti, (c) 5 vikt% Ti och (d) 9 vikt% Ti.