



Keramiska material med extrema skyddsegenskaper

PATRIK LUNDBERG, PERNILLA MAGNUSSON

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Vapen och skydd
147 25 Tumba

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

FOI-R--1800--SE Teknisk rapport
ISSN 1650-1942 December 2005

Vapen och skydd

Keramiska material med extrema skyddsegenskaper

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1800--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E2033
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Patrik Lundberg Pernilla Magnusson	Projektledare John Ottosson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Patrik Lundberg	
Rapportens titel Keramiska material med extrema skyddsegenskaper		
Sammanfattning <p>Motivet till fortsatta satsningar inom kerampansarområdet och då speciellt nyutveckling av keramiska skydds-material är möjligheten till väsentligt förbättrade skyddsegenskaper. I ett traditionellt kerampansar utnyttjas endast en bråkdel av kerammaterialets fulla hållfasthet. Orsaken till det dåliga utnyttjandet är att penetrationsmotståndet i huvudsak styrs av brottmekaniska processer, inte plastisk deformation. Med ett bättre utnyttjande av kerammaterialets fulla hållfasthet skulle väsentligt bättre och viktseffektiva skyddskonstruktioner kunna tas fram.</p> <p>Rapporten beskriver kortfattat principerna för hur ett keramiskt skydd är uppbyggt och fungerar samt redovisar en uppskattning av en möjlig övre gräns för penetrationsmotståndet i keramiska material. Uppskattningen har gjorts utifrån två enkla penetrationsmodeller och utgångspunkten är att det spröda beteendet hos kerammaterialet kan undertryckas varvid penetrationsmotståndet då ges av kerammaterialets maximala skjuvhållfasthet. Det beräknade maximala penetrationsmotståndet jämförs i rapporten med befintliga experimentella data för några höghållfasta keramiska material.</p>		
Nyckelord Keram, keramkomposit, hårdhet, brottseghet, penetration		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 17 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Vapen och skydd 147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1800--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2005	Project no. E2033
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Patrik Lundberg Pernilla Magnusson	Project manager John Ottosson	
	Approved by	
	Sponsoring agency Armed forces	
	Scientifically and technically responsible Patrik Lundberg	
Report title (In translation) Armour ceramics with enhanced protection capabilities		
Abstract <p>The performance of today's ceramic armours is still far below that which is theoretically possible. The main reason for this is that the penetration resistance in the ceramic mainly is governed by fracture, not plastic deformation. By suppressing the fracture mechanisms, substantially better and more weight effective ceramic armours could be developed.</p> <p>This report describes the basic principles of a ceramic armour and presents an estimate of a possible upper bound for the penetration resistance of ceramic materials. The estimate has been done using two simple models assuming that the brittle behaviour is suppressed and that the maximum shear strength of the ceramic material is governing the penetration resistance. This estimated maximum penetration resistance is compared to existing experimental data for some high strength ceramic materials.</p>		
Keywords ceramic, ceramic composit, hardness, toughness, penetration		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 17 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1. Inledning	6
2. Keramiska material för skyddstillämpningar	7
3. Keramiska material med extrem hårdhet	8
4. Maximalt penetrationsmotstånd	10
5. Diskussion	15
6. Fortsatt arbete	16
7. Refenser	17

1. Inledning

Ballistiska skydd (pansarskydd) som innehåller keramiska material är vanligt förekommande och en viktig komponent då det gäller att skapa viktseffektiva skyddslösningar för soldater, stridsfordon, helikoptrar och flygplan mot en rad olika penetrerande hot. Keramiska material finns idag i kroppskydd som skydd mot olika typer av projektiler och splitter och på fordon som skydd mot penetrerande minor och pansarbrytande RSV- och KE-stridsdelar. Även helikoptrar och flygplan utnyttjar keramiska material för att ge skydd till piloten och vitala komponenter.

Trots att keramiska skydd redan idag har goda skyddsprestanda ger den fortsatta satsningen inom materialfysik, nanoteknik och materialmodellering stora möjligheter till framtagning av nya material med väsentligt förbättrade skyddsegenskaper än dagens. Viktiga forskningsområden är framför allt utvecklingen av metall-keramkompositer, nya superhårda strukturer samt förbättrade metoder för kontroll av mikrostrukturen, vilket bland annat möjliggör tillverkning av nanostrukturella makromaterial. Även förbättrad tillverknings teknik och ökad civil användning av keramer kommer få stor inverkan på skyddsområdet då det innebär ökad tillgång till både bättre och billigare keramiska material.

Försvarsmaktsprojektet "Ballistiska skyddssystem" har som en deluppgift att följa utvecklingen inom kerampansarområdet samt bedriva viss egen forskning inom några specifika områden. Under perioden 2005-2007 inriktas arbetet på frågor som rör växelverkan mellan det keramiska materialet i pansaret, den penetrerande verkansdelen samt den omgivande skyddkonstruktionen (uppbackning, fördämning, frontskydd etc.). Målet är att exploatera kerammaterialets fulla skyddspotential och därmed möjliggöra *stela-väggen pansar* ("interface-defeat pansar") och i förlängningen *högpresterande kerampansar* [1]. Som en del i detta arbete försöker FOI tillsammans med Stockholms Universitet att ta fram keramiska material med väsentligt bättre ballistiska egenskaper än dagens. Under 2005 har arbetet inriktats på metall-keramkompositer samt ett nytt keramiskt material, AlMgB₁₄ [2]. Detta material har låg densitet, är mycket hårt och dessutom relativt segt.

Motivet till fortsatta satsningar inom kerampansarområdet är den stora potentialen till väsentligt förbättrade skyddsegenskaper. Ett traditionellt kerampansar utnyttjar bara en bråkdel av kerammaterialets fulla hållfasthet eftersom penetrationsmotståndet i sådana pansar i huvudsak styrs av brottmekaniska processer, inte plastisk deformation. I en del mer avancerade skyddskonstruktioner har man dock delvis lyckats undertrycka det spröda beteendet något och därmed i vissa fall erhållit såväl "interface defeat" som ett ökat penetrationsmotstånd [3].

En principiellt viktig fråga är var den övre gränsen går för penetrationsmotståndet i ett givet keramiskt material: hur stort kan motståndet mot penetration egentligen bli? Denna rapport beskriver kortfattat principerna för hur ett keramiskt skydd är uppbyggt och fungerar, diskuterar en möjlig övre gräns för den hållfasthetsrelaterade delen av penetrationsmotståndet samt jämför denna med befintliga experimentella data.

2. Keramiska material för skyddstillämpningar

Keramiska skydd tillhör kategorin konsumerande pansar, dvs. dessa skyddar genom att konsumera och erodera den penetrerande verkansdelen. De materialegenskaper som styr förmågan att konsumera en penetrerande verkansdel är skyddsmaterialets densitet och hållfasthet. Ju högre densitet och hållfasthet, desto större penetrationsmotstånd erhålls. Ur viktskyddssynpunkt, dvs. skyddsförmåga per viktsenhet, är det dock bättre ju lägre densitet skyddsmaterialet har varför material med så låg densitet och så hög hållfasthet som möjligt eftersträvas.

Keramiska material för skyddstillämpningar karakteriseras av hög hårdhet (drygt 5-10 ggr vanligt pansarstål) men också stor sprödhet (brottsegheten är ca 1/15 av pansarståls). Keramer har vanligen låg densitet (2500-4500 kg/m³) även om material med hög densitet kan förekomma, t.ex. då man eftersträvar liten volym hos skyddet. De tre vanligast förekommande keramiska materialen i ballistiska skydd är aluminiumoxid (Al₂O₃), kiselkarbid (SiC) och borkarbid (B₄C). I tabell 1 redovisas typiska egenskaper för några olika keramer som används eller är tänkbara i ballistiska skydd.

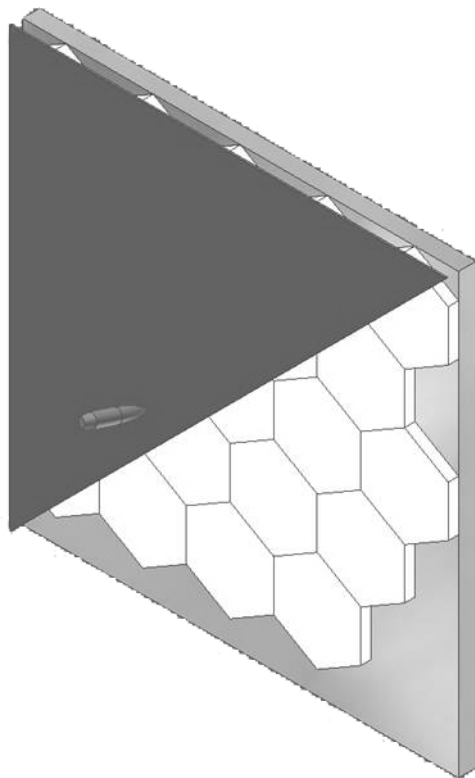
Tabell 1. Mekaniska egenskaper för några olika keramiska skyddsmaterial.

Namn	Kemisk beteckning	Densitet ρ (g/cm ³)	Hårdhet HV (GPa)
Kiselnitrid	Si ₃ N ₄	3.19	18.5
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	3.80	17.4
Volframkarbid	WC	15.72	-
Kiselkarbid	SiC	3.22	21.9
Titankarbid	TiC	4.93	-
Titandiborid	TiB ₂	4.50	20.3
Borkarbid	B ₄ C	2.50	25.6

De idag vanligaste keramiska materialen har på grund av sin sprödhet ingen eller mycket begränsad egen skyddsförmåga. Det krävs därför alltid någon form av stödjande struktur i samverkan med det keramiska materialet för att man ska undertrycka inverkan av det spröda beteendet. *Uppbackning* är ett stöd placerat bakom kerammaterialet som ger strukturen tillräcklig böjstyvhet och undertrycker utstötning av en plugg i kerammaterialet. *Frontskyddet* är placerat framför kerammaterialet och dämpar den initiala anslagsstöten vid träff samt håller större fragment på plats även om kerammaterialet fragmenterar. En *sidofördämning* håller samman kerammaterialet under penetrationsförloppet och undertrycker fragmenteringen. En fördämning kan bestå av en höghållfast ram (metall eller fiberkomposit) som kerammaterialet limmas, krymps eller pressas fast i. En fördämningseffekt kan också erhållas genom att gjuta, pulverpressa eller plasmaspruta fördämningen direkt mot kerammaterialet.

Ett enklare keramskydd består av en mosaik av rektangulära eller hexagonala keramplattor. Plattorna är monterade (direkt eller via ett dämpskikt) på den bärande strukturen eller på en separat backing av höghållfast aluminium, titan, stål eller fiberkompositmaterial. Framför plattorna kan ett sammanhållande skydd av fiberkomposit eller metall vara applicerat, även det fäst med lim eller ett bultförband. Plattornas tjocklek,

form, radiella storlek och överlappning är avpassad till önskad skyddsnivå och flerskottskapacitet. Kopplingen mellan keramplattorna och mot backing och frontskydd är oftast impedansanpassade (av vågutbredningsskäl) med hjälp av speciella fyllmedel samt genom att forma hörn och kanter på lämpligt sätt. På så sätt minimeras skadeutbredningen i den träffade plattan samtidigt som risken för att omgivande keramplattor går sönder minskar. Figur 1 illustrerar hur ett enkelt kerampansar kan vara uppbyggt.



Figur 1. Schematisk uppbyggnad av ett kerampansar.

3. Keramiska material med extrem hårdhet

Ett indirekt mått på materialets hållfasthet är hårdheten, ju högre hårdhet desto starkare struktur. Hårdheten bestäms genom att en spets eller kula av ett hårt material (oftast diamant) pressas mot det material som ska provas. Ett karakteristiskt mått hos det kvarvarande intrycket används därefter för att beräkna ett hårdhetsmått. Ju större motstånd mot intryck desto hårdare är materialet. Flera olika mätmetoder finns för att bestämma hårdhet men oftast används Vickers eller Knoop för keramiska material [4]. Merparten av skyddskeramerna har hårdheter som ligger runt 20 GPa. Detta kan jämföras med det hårdaste material som finns att tillgå, diamant. Hårdheten för diamant överstiger 100 GPa. Det finns dock ett antal material som ligger i intervallet 30-100 GPa. Här dominerar olika kompositter baserade på antingen diamant eller kubisk bornitrid. Dessa material är än så länge dyra och därför inte aktuella i pansarsammanhang men de visar vad som går att framställa med dagens tillverkningsteknik. I tabell 2 ges data för några kända hårdämnen.

Kubisk bornitrid

Bornitrid (BN) finns i tre former, mjuk hexagonal grafitstruktur (gBN), hexagonal wurtzite struktur (wBN) samt kubisk struktur (cBN). De två hårda strukturerna wBN och cBN finns inte naturligt och är metastabila vid normalt tryck och temperatur. Det finns ett antal olika metoder att framställa solida kroppar av wBN och cBN. Den vanligaste tillverkningstekniken är "solvent catalyse" vilket innebär att gBN omvandlas direkt till cBN tillsammans med en metall, t.ex. aluminium. Under omvandlingen, som sker vid 1500-2000 °C och 5-7 GPa bildas aluminiumnitrid respektive aluminiumdiborid som bindefas. På senare tid har man lyckats erhålla omvandling till kubisk struktur och även wurtzite utan tillsatser [5]. I tabell 3 ges exempel på några kommersiella bornitridmaterial.

Diamant och diamantkompositer

Tillverkning av syntetisk diamant via högtrycksomvandling av grafit vid hög temperatur genomfördes första gången på femtiotalet [6]. Femtio år senare dominerar fortfarande denna tillverkningsmetod men tekniken har förfinats och syntetiska diamanter är nu den viktigaste råvaran för att tillverka makromaterial. Metoderna för att tillverka solida kroppar av diamant liknar de som används för kubisk bornitrid. Små diamanter sintras ihop under högt tryck (5-10 GPa) och temperatur (1000-2000 °C) i närvaro av en lämplig bindefas. Ett exempel är Syndie där bindefasen utgörs av kobolt.

Traditionell produktionsteknik för att sintra samman hårdämnen är kostsam varför man har försökt utveckla enklare metoder att binda samman diamantpartiklar. Skeleton är en komposit av diamant och kiselkarbid som tillverkas genom sintring vid atmosfärstryck. En porös diamantstruktur som först behandlats så att diamanternas ytor omvandlats till grafit infiltreras med kisel varvid kisel och grafit reagerar och bildar kiselkarbid. Den färdiga kroppen består av ca 50% diamant och 40% kiselkarbid. Resterande mängd består av restkisel och eventuella sintringshjälpmiddel. Även olika kemiska metoder såsom CVD (Chemical Vapour Deposition) utnyttjas för att belägga ytor med diamantskikt (skiktjocklek upp till ett par mm). I tabell 3 ges exempel på några kommersiella diamantmaterial.

Andra hårda strukturer

Flera olika försök har gjorts för att hitta andra hårdämnen än bornitrid och diamant. Ett relativt nytt material är kubisk borkolnitrid, cBC₂N [7]. Men även detta material kräver höga tryck och temperaturer för att kunna syntetiseras varför materialet blir dyrt att framställa.

Ett hårdämne som kan tillverkas med ordinära sintringstekniker är AlMgB₁₄ [2]. Detta material framställdes redan 1970 men först år 2000 presenterades resultat från tillverkning i större skala. Materialet har låg densitet, hög hårdhet och relativt hög brottseghet. FOI har tillsammans med Stockholms Universitet påbörjat en tillverkning i mindre skala av materialet och de inledande försöken verkar lovande även om delar av själva framställningsprocessen är komplicerad. Målet är att under 2006 framställa provkroppar som möjliggör karakterisering via skjutförsök.

Tabell 2. Mekaniska egenskaper för några kända hårda strukturer [2,8,9]

Namn	Kemisk beteckning	Densitet ρ (g/cm ³)	Hårdhet (GPa)	Bulkmodul K (GPa)	Skjuvmodul G (GPa)
	AlMgB ₁₄	2.66	32-35	-	-
Kubisk bornitrid	cBN	3.48	45-62	377	378
Kubisk borkolnitrid	cBC ₂ N	-	76	282	238
Diamant		3.52	56-115	446	538

Tabell 3. Mekaniska egenskaper för några tillgängliga hårda material [2, 6, 10, 11]

Handelsnamn	Hårdämne	Bindefas	Densitet ρ (g/cm ³)	Hårdhet (GPa)
Amborite	cBN	Aluminiumnitrid och -diborid	3.42	32
Belbor	cBN	Ingen	3.45	38
PHBN	wBN	Ingen	3.41	41
Syndite	diamant	Kobolt	3.86	50
Syndie	diamant	Kobolt	4.10	65-80
Syndax-3	diamant	Kiselkarbid	-	
Skeleton	diamant	kiselkarbid, kisel, titankarbid	3.48	48-55
	AlMgB ₁₄	ev. komposit med titandiborid	2.66	32-46

4. Maximalt penetrationsmotstånd

Penetrationsmotståndet i ett målmaterial kan delas upp i två delar, en hållfasthetsrelaterad del som är proportionell mot materialets hållfasthet och en del som svarar mot tröghetsmotståndet (densitetsberoende). Den hållfasthetsrelaterade delen av penetrationsmotståndet i keramiska material styrs mer eller mindre av brottmekaniska processer då kerammaterialet i huvudsak deformeras via fragmentering och krossning. Dessa processer är irreversibla, dvs. har väl materialet genomgått dessa steg kan det inte nämnvärt ”läka” igen. Jämför med penetration i metaller där målmaterialiet deformeras plastiskt och endast trängs undan radiellt utan någon nämnvärd fragmentering.

Motståndet mot såväl krossning som förflyttning av det krossade kerammaterialet påverkas starkt av yttre krafter varför penetrationsmotståndet uppvisar tryckberoende egenskaper. Detta innebär att ett givet kerammaterial uppvisar olika penetrationsmotstånd och därmed olika skyddsförmåga beroende på hur väl det hålls samman under penetrationsförloppet. Om fragmenteringsprocessen på något sätt kan undertryckas, t.ex. via ett yttre tryck, ökar penetrationsmotståndet. Maximalt hållfasthetsrelaterat penetrationsmotstånd svarar mot att materialet deformeras plastiskt och ges av kerammaterialets maximala skjuvhållfasthet.

Ett direkt mått på målmaterialiets totala penetrationsmotstånd och därmed skyddsförmåga är penetrationshastigheten, dvs. den hastighet med vilken hållkanalen i målmaterialiet fördjupas då en projektil penetrerar. Högt motstånd ger en låg penetrationshastighet. Penetrationshastigheten kan bestämmas genom att t.ex. registrera penetrationsförloppet

med röntgenblyxtteknik. Figur 1 visar en serie röntgenblyxtbilder av ett pågående penetrationsförlopp i borkarbid [12] och figur 2 visar hur penetrationshastigheten varierar med anslagshastigheten för två vanligt förekommande skyddsmaterial, pansarstål [13] och kiselkarbid [14]. Projektilerna var i dessa två undersökningar slanka cylindrar av tungmetall.

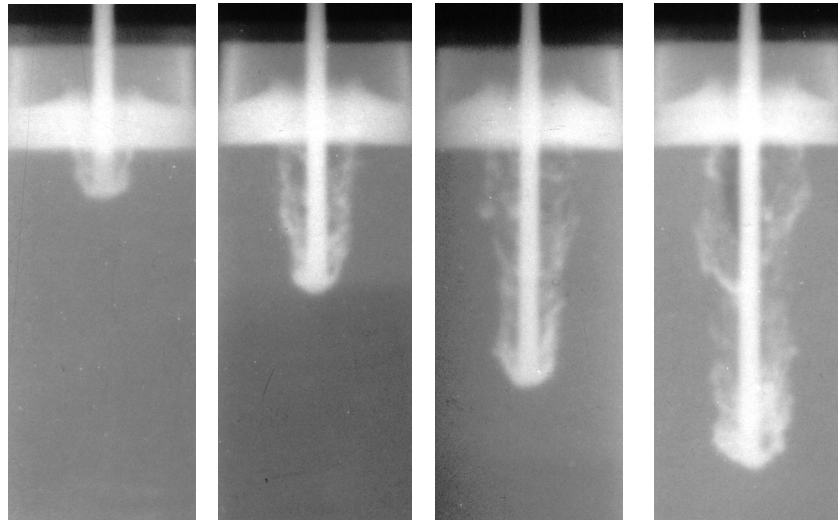


Fig.1. Penetration i borkarbid. Anslagshastigheten är ca 2500 m/s.

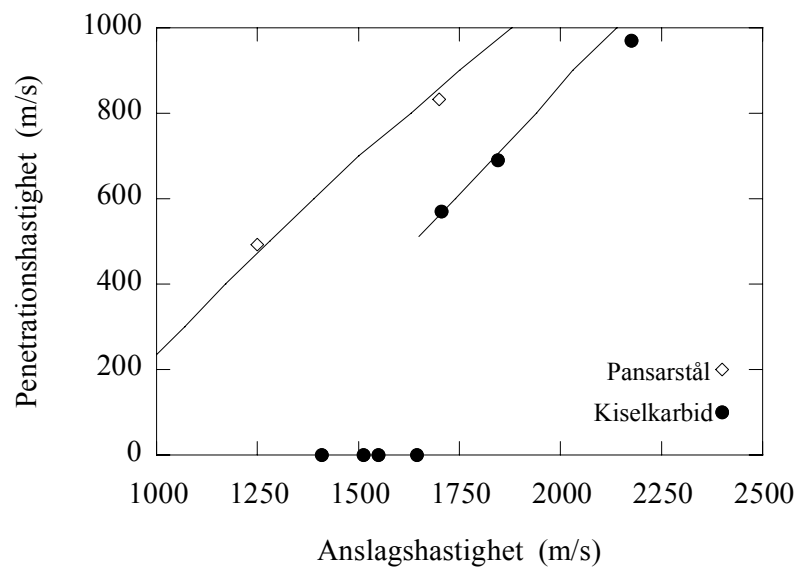


Fig. 2. Experimentellt bestämda penetrationshastigheter i pansarstål (◇) respektive kiselkarbid (●) som funktion av anslagshastigheten. Heldragna linjer är anpassningar till experimentella data.

Figur 2 visar att penetrationshastigheten är ca 40 % högre i pansarstål än i kiselkarbid vid anslagshastigheten 1800 m/s. Vid denna typ av experiment erhålls ingen penetration i kiselkarbid vid hastigheter under 1700 m/s. Denna hastighet kallas för

transitions hastigheten och under denna flyter projektilmaterialet ut på kerammaterialets yta utan att penetrera. Fenomenet kallas ”interface defeat”. Vid hastigheter upp till 1700 m/s beror penetrationsmotståndet i kerammaterialet helt på dess intakta hållfasthet. Keramhållfastheten motsvarar i detta fall en flytspänning på över 10 GPa. Motsvarande siffra för stålmaterialet är vid samma hastighet ca 1.5 GPa. Då transitions hastigheten överskrids sjunker kerammaterialets hållfasthet pga massiv fragmentering men penetrationsmotståndet är ändå drygt dubbelt så stort i kiselkarbiden som i stål.

Under antagandet att målmaterialets penetrationsmotstånd styrs av ”plastiska” deformationsprocesser kan maximala transitions- och penetetrations hastigheten uppskattas med hjälp av två enkla modeller [15-17]. Projektillen antas fortsättningsvis vara en lång och slank tungmetallprojektil med materialegenskaper enligt tabell 4 men motsvarande uppskattning kan genomföras för andra typer av penetrerande hot.

Modell A: maximal transitions hastighet

Kerammaterialets maximala hållfasthet σ_{yc} ger en övre gräns för vilket maximalt kontaktryck p^* keramytan kan bära

$$p^* = 2.85\sigma_{yc} \quad (1)$$

Kerammaterialets maximala hållfasthet σ_{yc} kan bestämmas via planvågsexperiment. I de fall man inte har tillgång till planvågsdata kan hållfastheten uppskattas utifrån hårdheten H enligt

$$\sigma_{yc} = \frac{H}{c_1} \quad (2)$$

där $c_1 = 2.08$ [14]. Lundberg med flera [15] har bestämt ett uttryck för kontaktrycket på symmetriaxeln under projektilen vid ”interface defeat”. Trycket p beror av projektilens inströmnings hastighet v_p , projektilmaterialets densitet ρ_p , hållfasthet σ_p och bulkmodul K_p och kan beräknas enligt

$$p = q(1 + \phi + \psi) \quad (3)$$

där

$$q = \frac{\rho_p v_p^2}{2}, \quad \phi = \frac{q}{1.93K_p}, \quad \psi = 3.62 \frac{\sigma_p}{q} - 7.04 \left(\frac{\sigma_p}{q} \right)^2.$$

Genom att kombinera ekv. 1 och 3 kan det kritiska trycket q^* vid ”interface defeat” beräknas genom att lösa ekvationen

$$\frac{(q^*)^3}{1.93K_p} + (q^*)^2 + q^*(3.62\sigma_{yp} - 2.85\sigma_{yc}) - 7.04\sigma_{yp}^2 = 0. \quad (4)$$

Ekvation 4 gör det möjligt att bestämma transitions hastigheten $v^* = \sqrt{2q^*/\rho_p}$, dvs. den projektil hastighet som svarar mot att penetrationsförloppet startar.

Modell B: penetrationshastigheten vid maximalt penetrationsmotstånd

För anslagshastigheter över transitionshastigheten kan penetrationshastigheten i ett keramiskt material med densiteten ρ_t uppskattas med en något modifierad ”Tatemodell” [16,17]. Det antas att stationära förhållanden råder, dvs. projektilen är lång och målet stort. Vidare antas att det är kerammaterialets maximala skjuvhållfasthet, inte brottmekaniska processer, som styr penetrationsmotståndet. Penetrationshastigheten u ges av

$$u = \frac{v_p - \mu \sqrt{v_p^2 + A}}{1 - \mu^2} \quad (5)$$

där

$$\mu = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_p}}$$

och

$$A = \frac{2(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t}.$$

Den effektiva projektilhållfastheten Y_p ges av

$$Y_p = c_2 \sigma_{yp} \quad (6)$$

där $c_2 = 1.7$ [17]. Penetrationsmotståndets hållfasthetsdel R_t kan enligt [17] beräknas som

$$R_t = \frac{7}{3} \ln(\alpha) \sigma_{yc} \quad (7)$$

där α bestämmas ur

$$\left(1 + \frac{\rho_t u^2}{\sigma_{yc}}\right) \sqrt{K_t - \rho_t \alpha^2 u^2} = \left(1 + \frac{\rho_t \alpha^2 u^2}{2G_t}\right) \sqrt{K_t - \rho_t u^2}. \quad (8)$$

I tabell 4 ges materialdata för fyra olika målmaterial: stål, kiselkarbid, diamantkomposit och diamant. Hållfastheten för stål har bestämts genom dragprov. Kiselkarbidens hållfasthet har bestämts via planvågsexperiment [18]. Diamant och diamantkompositens hållfasthet har uppskattat utifrån hårdhetsdata [9,14] och ekv. (2). Figur 3 visar beräknade transitions- och penetrationshastigheter för materialen i tabell 4.

Tabell 4. Mekaniska data för några hårda material och ett projektilmaterial (tungmetall)

	Densitet ρ (g/cm ³)	Hårdhet (GPa)	Hållfasthet σ_y (GPa)	Bulkmodul K (GPa)	Skjuvmodul G (GPa)
Stål	7.85	-	1.4	167	77
Kiselkarbid	3.23	22	12.2	220	193
Diamant	3.51	120	57.7	446	538
Diamantkomposit	4.10	71	34.1	500	345
Tungmetall	17.7	-	1.2	285	-

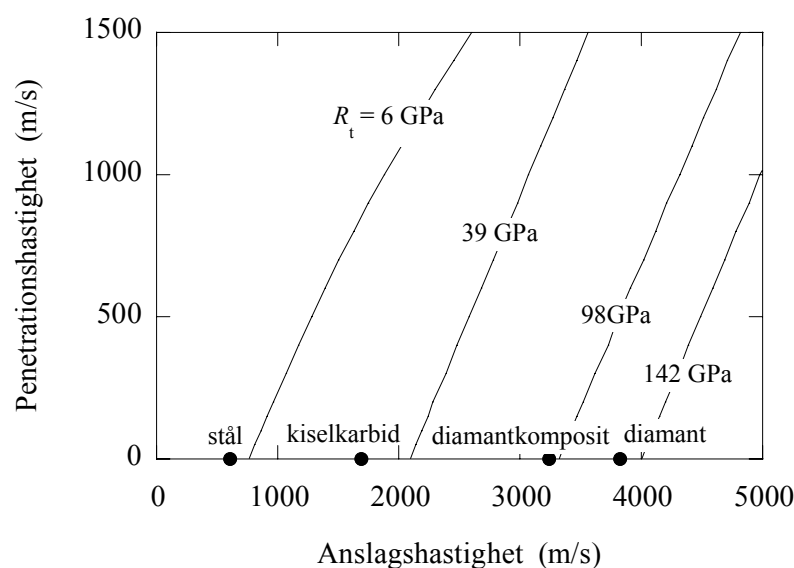


Fig. 3. Beräknade transitions- (● symboler) respektive penetrationshastigheter (heldragna linjer) i pansarstål ($R_t = 6$ GPa), kiselkarbid ($R_t = 39$ GPa), diamantkomposit ($R_t = 98$ GPa) respektive polykristallin diamant ($R_t = 142$ GPa) som funktion av anslagshastigheten.

I Tabell 5 redovisas beräknade transitionshastigheter och penetrationsmotstånd för materialen i tabell 4. Vidare redovisas också tillgängliga experimentella data för stål [13,19], kiselkarbid [14] samt två olika diamantkompositer: Syndie [14] och Skeleton [20]. Delar av tabell 5 sammanfattas i figur 4.

Tabell 5.

	Transitions-hastighet			Penetrationsmotstånd	
	Modell A v^* (m/s)	Modell B v^* (m/s)	Experiment v^* (m/s)	Modell B R_t (GPa)	Experiment R_t (GPa)
Stål	610	760	500	6	6
Kiselkarbid	1690	2090	1675	39	12
Syndie	3240	3320	2110	98	18
Skeleton	2690	2740	< 1500	67	Ca 12
Diamant	3830	4000	-	142	-

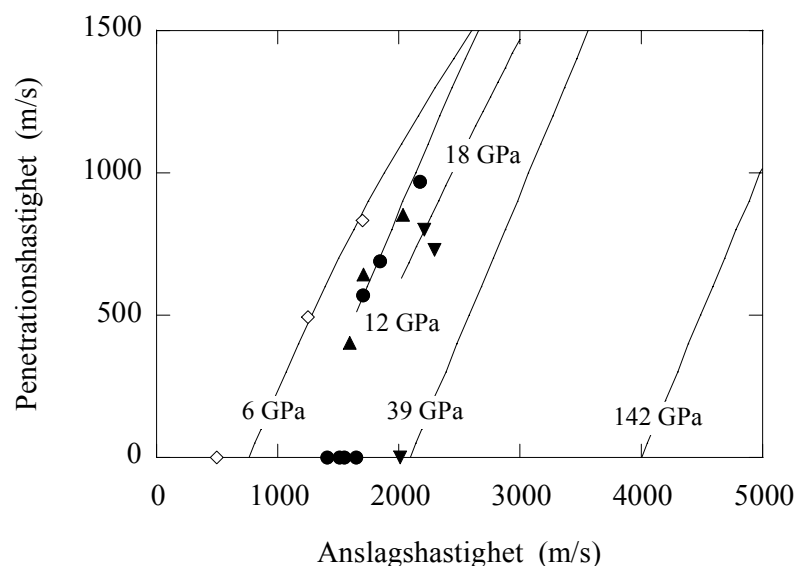


Fig. 4 Beräknade (linjer) och experimentellt (punkter) bestämda penetrationshastigheter i stål \diamond ($R_t = 6$ GPa), kiselkarbid \bullet ($R_t = 12$ GPa), Syndie \blacktriangledown ($R_t = 18$ GPa) och Skeleton \blacktriangle ($R_t = 12$ GPa) samt uppskattade penetrationshastigheter i kiselkarbid ($R_t = 39$ GPa) respektive diamant ($R_t = 142$ GPa) under antagandet att motståndet styrs av plastisk deformation.

5. Diskussion

Utvecklingen inom materialområdet möjliggör framtagning av ännu starkare keramiska material som kan vara användbara i olika typer av ballistiska skydd. Den övre gränsen för den hållfasthetsrelaterade delen av penetrationsmotståndet, beräknat till över 140 GPa enligt en modifierad Tatemodell, ges av hållfastheten hos det starkaste material vi känner, diamant. Denna gräns pekar på en stor utvecklingspotential för keramiska skydd om man dels kan finna nya hårdämnen som kan tillverkas med ordinära tillverkningsmetoder, dels kan finna tekniker att undertrycka det spröda beteendet under penetrationsförloppet.

Men även idag tillgängliga keramiska material har en stor outnyttjad skyddspotential. Kiselkarbid uppvisar experimentellt en transitions hastighet på 1675 m/s (för en tungmetallprojektil) vilket överensstämmer bra med vad materialets maximala skjuvhållfasthet bör ge. Den experimentellt bestämda transitions hastigheten för kiselkarbid stämmer också bra överens med den beräknade (1690 m/s för modell A). Givet att man skulle kunna utnyttja kiselkarbidens fulla hållfasthet även under penetrationen så pekar modell B på att $R_t = 40$ GPa kan vara möjligt.

Men vid skjutförsök i kiselkarbid erhåller man endast en tredjedel av det förväntade hållfasthetsrelaterade penetrationsmotståndet, $R_t = 12$ GPa istället för 39 GPa. För diamantkompositerna Syndie och Skeleton är utbytet ännu lägre. I stället för $R_t = 98$ GPa respektive 67 GPa erhåller man $R_t = 18$ GPa för Syndie respektive ca 12 GPa för Skeleton, dvs. ca en femtedel av vad som borde vara möjligt. Detta ska jämföras med stål där man i

princip får ut ett hållfasthetsrelaterat penetrationsmotstånd som direkt svarar mot materialets maximala hållfasthet, se figur 4.

Orsaken till att man än så länge endast lyckats tillgodogöra sig en mindre del av keramernas potentiella skyddsförmåga är att man ännu inte kan hantera de brottmekanismer som styr penetrationsmotståndet. Förbättrade material och fördämningstekniker gör dock att det finns gott hopp om att kunna åstadkomma keramiska pansar med penetrationsmotstånd som närmar sig de teoretiskt möjliga. Detta skulle radikalt minska vikten på framtida konsumerande pansarskydd.

6. Fortsatt arbete

Det krävs sannolikt en kombination av fortsatt materialutveckling med inriktning mot starka strukturer med ökad seghet och framtagning av viktseffektiva skyddskonstruktioner som genererar ett sammanhållande tryckfält kring kerammaterialet för att radikalt öka penetrationsmotståndet hos keramiska pansar.

Utvecklingen av nanostrukturella makromaterial (t.ex. nanostrukturell kiselkarbid) tillsammans med nya typer av mikrostrukturell armering (t.ex. nanotuber) verkar lovande och kan vara ett viktigt steg mot en ny generation högpresterande keramiska skyddsmaterial.

Då det gäller skyddskonstruktioner som genererar yttre tryck kan man förutom passiv förspänning även tänka sig ”dynamiska” fördämningar där man med olika aktiva metoder komprimerar den del av pansaret som träffas.

7. Referenser

1. P. Lundberg, Kerampansar mot tyngre KE-hot. FOI-R--0596--SE, Okt 2002.
2. B.A. Cook, J.L. Haringa, T.L. Lewis and A. M. Russell, A new class of ultra-hard materials based on AlMgB₁₄. *Scripta mater*, 42 (2000) 597-602.
3. G.E. Hauver, E.J. Rapacki, P.H. Netherwood and R.F. Benck. Interface defeat of long – rod projectiles by ceramic armour. ARL-TR-3590, September 2005.
4. P. Magnusson, P. Lundberg, P. Skoglund. Indentering – en metod för att rangordna pansarkeramer? *FOI-rapport*, FOI-R--1776--SE (2005).
5. A. Bochko, G. Bobrovnitchii. Superhard composites based on cubic boron nitride.
6. A. Bakon and A. Szymanski. Practical use of diamond. *Ellis Horwood Limited*, ISBN 0-13-739095-5, 1993.
7. V.L. Solozhenko, D. Andrault, G. Fiquet, M. Mezouar, D.C. Rubie. Synthesis of superhard cubic BC₂N. *Applied physical letters*, Vol. 78:10 (2001).
8. V.L. Solozhenko and Eugene Gregoryanz. Synthesis of superhard materials. *Materials Today*, november 2005.
9. H. Sumiya and T. Irifune. Indention hardness of nano-polycrystalline diamond prepared from graphite by direct conversion. *Diamond and Related Materials* 13 (2004) 1771 – 1776.
10. Tool materials, *ASM Specialty Handbook*. ISBN 0-87170-545-1, 1995.
11. Personal communication, Skeleton technologies.
12. L. Westerling, P. Lundberg and B. Lundberg. Tungsten long rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities. *Int. J. Impact Engng* 25(7), 703-714 (2001) .
13. C.E. Anderson, V. Hohler, J. Walker and A. Stilp, Time-resolved penetration of long rods into steel targets. *Int. J. Impact Engng* Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 1995.
14. P. Lundberg, R. Renström and B. Lundberg, Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration. *Int. J. Impact Engng* 24, 259-275 (2000).
15. P. Lundberg, R. Renström, L. Westerling. Transition between interface defeat and penetration for a given combination of projectile- and ceramic material., in *Ceramic Armour by Design*, Edited by J.W. McCauley *et. al.*, Ceramic Transactions, Vol. 134, 2002.
16. A. Tate, Further results in the theory of long rod penetration. *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 17, pp. 141-150 (1969).
17. J. D. Walker and C.D. Anderson, A time- dependent model for long-rod penetration.. *Int. J. Impact Engng* Vol. 16, No. 1, pp. 19-48, 1995.
18. N. Bourne, J. Millett, I. Pickup. Delayed failure in shocked silicon carbide. *J Appl Phys*. 81(9), 1 May 1997.
19. V. Hohler and A.J. Stilp. Penetration of steel- and high density rods in semi-infinite steel targets. *Third Int. Symp of Ballistics*, 1977.
20. En detaljerad avrapportering av försöken planeras att genomföras under 2006.