



Indentering - en metod för att rangordna pansarkeramer?

Pernilla Magnusson, Patrik Lundberg, Peter Skoglund

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

Indentering - en metod för att rangordna pansarkeramer?

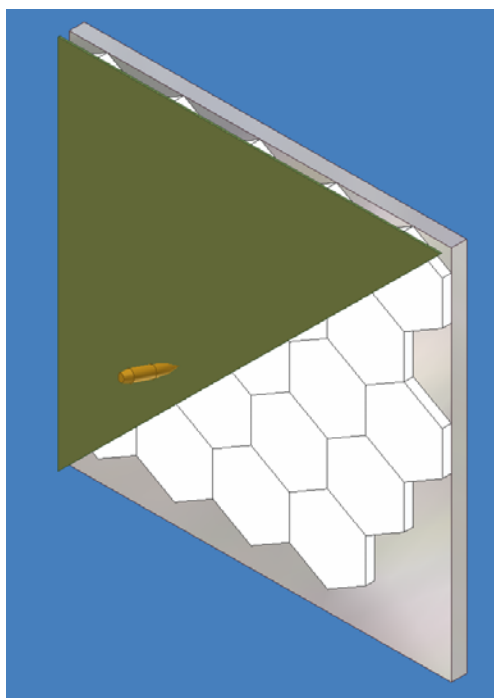
Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1776--SE	Klassificering Teknisk
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år November 2005	Projektnumm E2033
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Pernilla Magnusson, Patrik Lundberg, Peter Skoglund	Projektledare John Ottosson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt	
Rapportens titel Indentering - en metod för att rangordna pansarkeramer?		
Sammanfattning <p>Keramiska material har länge använts i skyddsapplikationer på grund av hög hårdhet och relativt låg vikt. I takt med ökande krav på skyddet har en omfattande forskning skett för att utveckla nya typer av kerambaserade skydd. Det finns nu en stor mängd potentiella skyddskeramer vars egenskaper dessutom kan påverkas av framställningsmetoden. Detta i kombination med de höga kostnader som är förknippade med skjutförsök har lett till ett omfattande arbete med att försöka korrelera lätt mätbara mekaniska egenskaper till ballistisk skyddsförmåga. I denna rapport görs en kort genomgång av olika metoder att karakterisera keramer med hjälp av indenteringsmetoder och speciell fokus riktas mot möjligheter och problem med att använda dessa mätningar som grund för en ballistisk rankning. Dessutom presenteras en undersökning där olika keramers hårdhet och brottseghet har uppmätts och jämförts med deras ballistiska skyddsförmåga. Två olika testserier har genomförts. I det första fallet har tre olika keramer jämförts (kiselkarbid, borkarbid och titandiborid) och i den andra serien har fyra olika kvaliteter av kiselkarbid undersökts. Undersökningen och redovisade litteraturdata visar att det finns potential för att använda indentering som en del i en metodik för att ranka pansarkeramer. För keramer av samma typ kunde en ökande brottseghet korreleras mot en förbättrad skyddsförmåga, medan inget samband mellan hårdhet och skyddsegenskaper kunde ses. För keramer av olika typ kunde varken hårdhet eller brottseghet korreleras mot skyddsförmåga.</p>		
Nyckelord Ballistiskt skydd, kerampansar, indentering, hårdhet, brottseghet		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 20 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--1776--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year November 2005	Project no. E2033
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Pernilla Magnusson, Patrik Lundberg, Peter Skoglund	Project manager John Ottosson	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Indentation - a method for classification of armour ceramics?		
Abstract <p>Ceramics have been used in armour applications for a long time due to their hardness and relatively low weight. The increasing demand of ballistic protection has given a rapid development of a large number of new types of ceramics with potential as armour. This trend in connection with the high cost of ballistic testing has shown a need for a fast and non-expensive mechanical test that can be related to the ballistic performance of the developed ceramics.</p> <p>In this report the possibility of using different indentation methods as a tool for ranking of armour ceramics are discussed. In addition, an investigation where the hardness, fracture toughness and ballistic performance of some ceramics are presented. Two test series are done. In the first three different ceramics (silicon carbide, titanium diboride and boron carbide) are compared and in the second series four different qualities of silicon carbide.</p> <p>The literature study in connection with the results found in this investigation show that indentation methods can be used, at least as a part in a programme to rank armour ceramics. The result also show that for ceramics of the same type (silicon carbide) but different qualities an increase in fracture toughness may be related to an increase in ballistic performance. On the other hand the hardness did not correlate to protectional capability. For ceramics of different types no correlation between hardness, fracture toughness and ballistic performance could be seen.</p>		
Keywords Ballistic protection, armour ceramics, indentation, hardness, fracture toughness		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 20 p.	
	Price acc. to pricelist	

1 INTRODUKTION	5
2 INDENTERINGSMETODER.....	8
2.1 Vickersprovning	9
2.1.1 Hårdhet	9
2.1.2 Brottseghet	9
2.2 Knoopprovning.....	10
2.3 Brinellprovning.....	10
2.4 Rockwellprovning.....	10
2.5 Utvärdering av indenteringsmetoderna	11
3 EXPERIMENT	13
3.1 Material.....	13
3.2 Vickershårdhet och brottseghet.....	13
3.3 Ballistiska experiment.....	13
4 RESULTAT	15
4.1 Korrelation mellan hårdhet, brottseghet och transitions hastighet	15
5 SLUTSATSER.....	17
6 FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE	18
7 REFERENSER	19

1 INTRODUKTION

I takt med utvecklingen av nya projektiler med mycket hög penetrationsförmåga i metalliska skyddsmaterial har kraven på nya typer av skydd accentuerats. Ett vanligt sätt att skydda sig mot projektiler är att använda sig av ett mycket hårt frontmaterial som slår sönder projektilen vid anslag varefter bildade fragment kan stoppas med mera duktila bakomliggande skyddsmaterial av metall eller fiberkomposit. Samtidigt som de nya skyddsmaterialen måste kunna motstå penetration är det också önskvärt att vikten på skyddet är låg. Eftersom många keramiska material har både hög hårdhet och låg vikt har de sedan länge använts i olika ballistiska skyddsapplikationer. Keramiska material har i allmänhet en mycket större hållfasthet under tryckbelastning än under dragbelastning. Denna egenskap i kombination med materialgruppens sprödhet innebär att keramer är uppbackade på baksidan av ett mera duktilt material. Ett sätt att ytterligare förbättra kerampansarets prestanda är att omge det med ett lateralt stöd som dels ökar keramens hållfasthet och dels håller eventuellt krossade kerambitar på plats och därmed försvårar fortsatt projektilpenetration i keramen. I figur 1 visas schematiskt hur ett keramkompositpansar stöds av ett omgivande material för att förbättra penetrationsmotståndet.



Figur 1. Principbild på ett kerambaserat skydd. Ett antal keramplattor monterade på ett bakomliggande uppbackningsmaterial och täckta av ett frontmaterial för att hålla eventuella fragment på plats.

Under 1960- och 70-talen genomfördes omfattande studier av keramkompositpansar som bland annat resulterade i ett antal empiriska resultat som kan användas vid design av kerambaserade skydd mot lätta och medeltunga projektiler. Dessa empiriska resultat diskuteras av Swab [1] och bland annat framkom att:

- keramen ska vara lika hård eller hårdare än projektilen,
- keramens tjocklek ska vara minst hälften av projektildiametern och
- keramens tjocklek ska vara ungefär 1/3 av den totala komposittjockleken.

Andra viktiga slutsatser var att keramen måste kunna slå sönder projektilen och att uppbackningsmaterialet ska kunna fånga upp eventuella penetrerande fragment utan att gå till brott.

Medvedovsky [2] har sammanställt några av de vanligaste skyddskeramerna tillsammans med viktiga fysikaliska och mekaniska storheter, se tabell 1.

Tabell 1. Vanliga skyddskeramer tillsammans med viktiga storheter [2].

Keram	Densitet g/cm ³	Vickers- hårdhet GPa	Brottseghet K_{Ic} MPa m ^{0,5}	E- modul GPa	Ljud- hastighet km/s	Böjhåll- fasthet MPa
Aluminiumoxid (sintrad)	3,60- 3,95	12-18	3,0-4,5	300-450	9,5-11,6	200-400
Aluminiumoxid- zirkoniumoxid (sintrad)	4,05- 4,40	15-20	3,8-4,5	300-340	9,8-10,2	350-550
Kiselkarbid (sintrad)	3,10- 3,20	22-23	3,0-4,0	400-420	11,0-11,4	300-340
Kiselkarbid (varmpressad)	3,25- 3,28	20	5,0-5,5	440-450	11,2-12,0	500-730
Kiselnitrid (varmpressad)	3,20- 3,45	16-19	6,3-9,0	-	-	690-830
Borkarbid (varmpressad)	2,45- 2,52	29-35	2,0-4,7	440-460	13,0-13,7	200-500
Titandiborid (sintrad)	4,55	21-23	8,0	550	-	350
Titandiborid (varmpressad)	4,48- 4,51	22-25	6,7-6,95	550	11,0-11,3	270-700
Aluminiumnitrid (varmpressad)	3,20- 3,26	12	2,5	280-330	-	300-400

De keramer som nämns i tabell 1 har alla låg densitet och är användbara i skyddstillämpningar, speciellt mot fin- och mellankaliberprojektiler [1]. Flera av de i tabell 1 nämnda keramerna har också studerats i ballistiska applikationer av Lundberg m. fl. [3, 4] där speciellt effekten av uppbackning och fördämning av skyddskeramen har utvärderats. Dessutom har olika varianter av aluminiumoxid, titandiborid och gradientmaterial av titandiborid - titan framställts med den så kallade SPS-tekniken (Spark Plasma Sintering, se Pettersson m. fl. [5]) i syfte att förbättra skyddsegenskaperna [6].

Den stora mängden av keramiska material och de stora variationer i mekaniska egenskaper som kan fås beroende på framställningsmetod i kombination med de höga kostnader som är förknippade med skjutförsök har lett till ett omfattande arbete med att försöka korrelera mekaniska egenskaper till ballistisk skyddsförmåga [1, 7]. Följande statistiska mekaniska egenskaper anses positivt påverka den ballistiska skyddsförmågan [7]:

- hög hårdhet,
- hög ljudhastighet,
- hög E-modul,
- låg tvärkontraktion (Poissons tal),
- låg densitet och
- låg porositet.

Hårdheten hos skyddet bör vara högre än projektilens och hög ljudhastighet gör att anslagsenergin elastiskt kan spridas över en större yta. Ett lågt värde på tvärkontraktionen är gynnsamt för den initiala skadeutvecklingen under penetrationen då keramen utsätts för tryckbelastning. Hög mekanisk impedans är också önskvärt ur vågutbredningssynpunkt och detta uppnås med hög E-modul och låg densitet.

Förutom de ovan nämnda egenskaperna är keramens drag- och tryckhållfasthet också viktiga för dess ballistiska förmåga, men de värden som uppmätts på traditionellt sätt har enligt den Reijer [7] inte kunnat ge någon tydlig korrelation till ballistisk skyddsförmåga. Detta troligen beroende på att dessa metoder mäter hållfastheten hos den svagaste delen i materialet, det vill säga där porer eller andra defekter finns i keramen. I en ballistisk tillämpning är det hållfastheten hos individuella korn eller korngränser som bestämmer penetrationsmotståndet [7].

Under penetrationsförloppet så kommer projektilen att växelverka med krossade delar av keramen vilkas penetrationsmotstånd också är beroende av trycket. Dessutom tillkommer till exempel friktionsegenskaper som även dessa kan vara tryckberoende. Effekter av dynamisk belastning på keramens mekaniska egenskaper och dess skyddsförmåga diskuteras av Lankford [8].

Av diskussionen ovan framgår att en mängd olika processer bidrar till att bestämma utgången av växelverkan mellan en projektil och ett kerambaserat skydd. Detta försvårar naturligtvis möjligheten att hitta en enkel mätmetod för att kunna karakterisera en kerams skyddsförmåga. Trots dessa svårigheter har under de senaste åren flera arbeten [1, 9-11] indikerat att olika typer av hårdhetsmätningar kan ge en uppskattning av keramers ballistiska skyddsförmåga. En viktig orsak är att de trycknivåer som uppnås vid indentering är av samma storleksordning som de vid ballistiska försök.

I denna rapport görs en kort genomgång av olika metoder att karakterisera keramiska material med hjälp av indenteringsmetoder. Speciell fokus riktas mot möjligheter och problem med att använda dessa hårdhetsmätningar som grund för en ballistisk rankning av potentiella skyddskeramer. Dessutom har en undersökning gjorts där olika keramers hårdhet och brottseghet har uppmätts och jämförts med deras ballistiska skyddsförmåga.

2 INDENTERINGSMETODER

Indentering innebär att en spets eller en kula av ett hårt material pressas mot det material som skall provas med en tillräckligt stor kraft för att ett permanent intryck ska bildas. Ett karakteristiskt mått hos det kvarvarande intrycket används därefter för att beräkna ett hårdhetsmått. I de fall där kraften ej är entydigt specificerad används även den i formeln för att beräkna hårdheten. Många material uppvisar också en så kallad ”Indentor Size Effect” (ISE), det vill säga att ett materials beräknade hårdhet är beroende av den pålagda kraften. För små krafter är hårdheten hög och vid ökande krafter sjunker hårdheten och vanligen uppnås ett läge då hårdheten är konstant med ökande last. Vid små laster dominerar elastisk och plastisk deformation medan materialbrott blir den dominerande deformationsmekanismen vid högre laster [12]. Vid den kritiska last då materialbrott dominerar deformationen uppnås också en hårdhet som är oberoende av ytterligare ökad last. Det finns flera olika hårdhetsmått och några av dem som är relevanta för att prova hårda material finns samlade i tabell 2.

Tabell 2. En sammanställning av några av de vanligaste hårdhetsmåten.

Metod	Indentor	Tillämpning
Vickers (HV)	Diamantpyramid med kvadratisk basyta. Toppvinkel 136°.	Metaller, keramiska och geologiska material.
Knoop (HK)	Diamantpyramid med rombisk basyta. Toppvinkel mellan motstående ytor 172° 30' och 130° 00'.	Metaller, keramiska och geologiska material.
Brinell (HB)	Stål- eller volframkarbidkula.	Metaller.
Rockwell B (HRB)	Stålkula.	Metaller.
Rockwell C (HRC)	Diamantkon. Toppvinkel 120°.	Hårda metaller.

En annan viktig mekanisk egenskap för material i allmänhet och keramer i synnerhet är brottseghet, vilket är ett mått på risken för materialet att gå sönder på grund av sprickor. Dessa sprickor kan bildas antingen vid tillverkningen, under bearbetningen eller på grund av användning. Brottseghet betecknas ofta, K_{Ic} , där indexen hänvisar till den kritiska belastning då spricktillväxt initieras för fallet att belastningen är vinkelrät mot sprickans längdutbredning.

Det finns många olika metoder att mäta K_{Ic} , det vanligaste är att ett stavformat prov belastas tills det går sönder, därefter bestäms K_{Ic} utifrån provgeometrin och den maximala lasten (dvs lasten då provet gick sönder). Denna metod kräver tämligen mycket material och lämpar sig därför inte om endast små provmängder finns tillgängliga. En indenteringsmetod är då att föredra eftersom en stor mängd intryck kan göras på en liten provbit. En annan skillnad är att böjmetoderna ger ett medelvärde för hela provet medan intrycksmetoderna ger punktvärden. Därför bör ett antal intryck spridda över hela provet utföras och ett medelvärde bestämmas. De båda metoderna är av dessa skäl inte jämförbara. Indenteringsmetoder kan bara användas på hårda och spröda material - det måste ju bildas sprickor som kan mätas.

I det följande ges en kort beskrivning av några olika metoder för att mäta hårdhet och brottseghet. Vickersmätningar för att bestämma hårdhet och brottseghet har använts i detta arbete och presenteras därför något mer detaljerat. För en omfattande genomgång och diskussion om fördelar och nackdelar med de olika metoderna hänvisas till böckerna av

Fischer-Cripps [13], Dieter [14] eller Meyers och Chawla [15]. Övriga detaljer beträffande krav på provmaterial, provningsutförandet och resulterande provintryck kan studeras i respektive standard.

2.1 Vickersprovning

2.1.1 Hårdhet

Vid hårdhetsprovning enligt Vickers (HV) används en diamantpyramid med kvadratisk bas och en toppvinkel på 136° . Diamantens utformning säkerställer att intryck med olika djup har samma geometriska form. Pyramiden trycks med en viss kraft mot provföremålet och hårdhetstalet enligt Vickers definieras som kraften i kilogram dividerat med intryckets mantelarea och ges av,

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}.$$

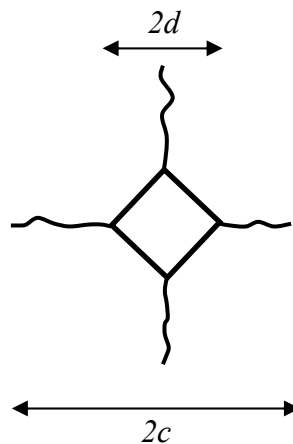
Där P är belastningen uttryckt i kilogram och d är medelvärdet av intryckets ytdiagonaler mätt i millimeter. Ofta används istället intryckets projicerade area och hårdheten blir då enligt Anstis [16],

$$H = \frac{P}{\alpha_0 d^2}.$$

Där P är belastningen i Newton, α_0 är en konstant som beror av indentorns form, för Vickersintryck är $\alpha_0 = 2$ om d är medelvärdet av intryckets *halva* diagonaler i meter, se figur 2. Detta uttryck har använts för beräkning av alla hårdheter som bestämts i detta arbete.

2.1.2 Brottseghet

När en Vickersdiamant (eller Knoop) trycks in i ett sprött material bildas sprickor i alla fyra hörnen, se figur 2.



Figur 2. En schematisk skiss över ett Vickersintryck med sprickor.

Spricklängden c mäts i ett optiskt mikroskop och brottsegheten, K_{Ic} , kan därefter enligt Anstis [16] beräknas från

$$K_{Ic} = A \sqrt{\frac{E}{H}} \cdot \frac{P}{c^{3/2}}.$$

Där A är en konstant för Vickersproducerade radiella sprickor ($A = 0,016$ [17] har använts här), E är E-modulen, H är hårdheten beräknad enligt Anstis ekvation ovan, P är belastningen i Newton och c är spricklängden i meter. Detta uttryck har använts för alla beräkningar av brottseghet som utförts i denna undersökning.

2.2 Knoopprovning

Hårdhetsprovning enligt Knoop utförs som Vickersprovning men en annan typ av indentor används. Knoopindentorn har en rombisk basyta där den långa diagonalen är sju gånger längre än den korta. Vinkeln mellan ytorna är $172^\circ 30'$ och $130^\circ 00'$. Belastningen är oftast 1 eller 2 kg. Hårdhetstalet enligt Knoop beräknas från

$$HK = 14,228 \frac{P}{d^2}.$$

Där P är belastningen i kilogram och d den långa ytdiagonalen i millimeter mätt efter avlastning. Den rombiska formen hos indentorn ger bättre noggrannhet vid mätningar av intryckets diagonal än för Vickers. Intryckningsdjupet är mindre än för Vickers vilket möjliggör hårdhetsmätning på mycket tunna detaljer. Indentorns form gör det också möjligt att mäta i olika vinklar och därmed uppskatta anisotropi [18].

2.3 Brinellprovning

En kula av stål eller hårdmetall trycks mot aktuellt material och sedan beräknas Brinellhårdheten enligt

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)},$$

där P är den pålagda belastningen i kilogram, D och d är kuldiameter respektive intryckets diameter i millimeter.

2.4 Rockwellprovning

Vid hårdhetsprovning enligt Rockwell B (HRB) används en härdad stålkula med en diameter av $1/16$ tum ($\approx 1,59$ mm). En förbelastning på 10 kg appliceras och därefter belastas kulan med 100 kg varefter kraften minskas till 10 kg. Hårdhetstalet grundar sig på den permanenta ökning av intrycksdjupet som uppstår och beräknas enligt följande,

$$HRB = 130 - e,$$

där e är intrycksdjupets ökning i multiplar av 0,002 mm.

Vid hårdhetsprovning enligt Rockwell C (HRC) används en diamantkon med en toppvinkel av 120° och en sfäriskt rund spets med en radie av 0,2 mm. En förbelastning på 10 kg appliceras och sedan belastas konen med 150 kg varefter kraften minskas till 10 kg. Hårdhetstalet grundar sig på den ökning av intrycksdjupet som uppstår och fås från,

$$HRC = 100 - e,$$

där e är intrycksdjupets ökning i multiplar av 0,002 mm.

2.5 Utvärdering av indenteringsmetoderna

Av de ovan nämnda indenteringsmetoderna har Swab [1] i detalj studerat och jämfört Vickers- och Knoopårdhetsmätning på olika pansarkeramer, bland andra aluminiumoxid, kiselkarbid och borkarbid. Olika indenteringskrafter användes och vid Vickersprovningen noterades en ISE-effekt på borkarbidmaterialen medan sprickbildning vid hörnen på intrycken gjorde det svårt att få konsistenta resultat på aluminiumoxid och kiselkarbid. Knoopårdhetsmätningen gav mycket mindre sprickbildning men en ISE-effekt noterades för alla undersökta keramer.

Skillnaden i sprickbildning vid intryckshörnen mellan Vickers- och Knoopårdhetsmätningen beror på geometrin på indentorn. Knoopindentorn ger ett grundare intryck och en mindre intrycksarea än Vickersmetoden för en given diagonallängd eller last. Detta leder till att risken för sprickbildning och spricktillväxt vid intryckshörnen minskar.

Swab anser att Knoopårdhetsmätningar skall användas och att hårdheten skall bestämmas vid flera olika laster men det nämns också att för alla av Swab undersökta pansarkeramer räcker en belastning på 2 kg för att uppnå en lastoberoende hårdhet.

Flinders m. fl. [19] har försökt korrelera egenskaper som hårdhet och brottseghet till ballistisk skyddsförmåga hos ett antal olika kiselkarbidkeramer. De noterar att materialens hårdhet mätt i Knoop respektive Vickers, i båda fallen med en last på 1 kg, resulterar i olika rangordning av keramerna med avseende på deras hårdhet. Flinders med medarbetare besköt keramerna med 7,62 mm AP-ammunition med WC/Co-kärna. Anslagshastigheten var 907 m/s restpenetrationen i en direkt bakomliggande aluminiumplatta uppmättes. De fann att trots att alla keramer var väsentligt hårdare än projektilen gav en ökande keramhårdhet, mätt i Knoop, en minskande penetration i aluminiumplåten. Skjutningar med 14,5 mm BS41 projektil, WC/Co-kärna, mot 12,7 mm tjocka keramer visade att den hastighet då hälften av projektilerna penetrerar keramen ligger mellan 722 och 750 m/s. Ingen signifikant skillnad kunde ses beroende på keramernas hårdhet eller brottseghet. Det fanns heller ingen korrelation mellan det nämnda restpenetrationsdjupet i det första fallet och gränshastigheten i det andra fallet. Flinders m.fl. menar att tyngre ballistiska hot behövs för att kunna särskilja de undersökta materialen. De indikerar också att dynamiska mekaniska data är bättre än statiska data för att förutsäga skyddsförmågan.

Enligt Wereszczak [11] är skadeutvecklingen som fås vid intryck med en sfärisk indentor av liknande typ som de som uppstår vid ballistiska försök. Indentorer av denna typ leder till att så kallade Herzsprickor bildas cirkulärt runt intrycket, se till exempel Lawn [20]. Sprickor av

denna typ börjar som en cirkulär ytspricka utanför indentorns kontaktområde med det provade kerammaterialet och uppstår på grund av stora radiella dragspänningar. Vid en viss kritisk belastning börjar sprickorna att sprida sig nedåt och bildar ett konformat område. Wereszczak [11] har studerat olika typer av kiselkarbider med instrumenterad Hertzindentering, det vill säga last och förskjutning mäts kontinuerligt. Från dessa mätningar kan både övergången mellan elastisk och plastisk deformation, σ_y , samt övergången från plastisk deformation till materialbrott och sprickbildning, σ_c , bestämmas. Wereszczak hävdar att σ_y och σ_c samt skillnaden mellan dessa är ett möjligt sätt att ranka pansarkeramer utifrån deras statiska egenskaper. Metodiken diskuteras utförligt av Wereszczak och Kraft [11] där också experimentella resultat på två kiselkarbidkvalitéer presenteras. Holmquist [9] redovisar numeriskt arbete där Hertztryck på kiselkarbid simulerats i avsikt att härleda parametrar till materialmodeller. Det visas att för små intryck överensstämmer simulering med experiment bra, både vid på- och avlastning, och trycket uppgick till mer än 10 GPa. Det nämns också att stora indenteringsintryck behövs för att kunna studera skadeutveckling och brottegenskaper i nämnda kiselkarbidmaterial. Ett problem är också att den numeriska skadeutvecklingen, sprickutbredningen, bland annat är beroende av cellstorlek.

De ovan beskrivna indenteringsmetoderna gäller alla under statiska förhållanden, men under senare år har även metoder för dynamisk indentering utvecklats [21-23]. Koepfel and Subhash [22] använde sig av en Vickersindenter fäst i änden på en metallstång. En projektil träffar stångens andra ände och genererar en elastisk våg som när den når indentorn trycker in densamma i det testade materialet. Typiska töjningshastigheter med denna typ av utrustning är 10^3 s^{-1} . Utrustningen användes för att undersöka dynamisk Vickershårdhet på en mängd olika metalliska material. De fann hårdhetsökningar på upp till 30% jämfört med statiska resultat. Nilsson [23] använde en liknande utrustning men med både en Vickersindenter och en konisk indenter för att bestämma dynamisk hårdhet och brottseghet på metalliska och keramiska material. Nyligen presenterade Wang och Wereszczak [21] en undersökning där de också framgångsrikt utnyttjat Hopkinsontekniker för att göra dynamiska Vickersintryck i keramer.

Ovanstående litteraturgenomgång visar att det finns flera indikationer på att indentering kan användas som ett verktyg för att rangordna pansarkeramkandidater. Dock är resultaten inte entydiga beträffande vilken indenteringsmetod som bör användas och hur resultaten skall analyseras. Både Vickers-, Knoop- och Hertzintryck har använts och dessutom har både dynamiska och statiska mättekniker utnyttjats. Flera arbeten visar att simuleringar av intrycken kan ge ökad information om materialbeteendet, kanske speciellt beträffande skadeutveckling.

Med ovanstående litteraturgenomgång som grund utfördes statiska Vickershårdhetsmätningar och brottseghetsmätningar på tre olika keramiska material (kiselkarbid, titandiborid och borkarbid) och inom kiselkarbidgruppen genomfördes dessutom en jämförelse mellan fyra olika kvalitéer. Dessa data korrelerades mot keramernas ballistiska skyddsförmåga som klassificerades med hjälp av transitions hastigheten, det vill säga den hastighet vid vilken projektilen ej ”flyter ut” på keramytan utan påbörjar penetration av densamma [3, 4].

3 EXPERIMENT

I det följande beskrivs valda material samt utrustning och metodik för att bestämma Vickershårdhet, brottseghet och transitions hastighet för aktuella material.

3.1 Material

Tre olika keramiska material (kiselkarbid SiC-B, titandiborid och borkarbid) har valts ut för jämförelse av hårdhet, brottseghet och ballistisk transitions hastighet. Inom keramgruppen kiselkarbid har dessutom fyra olika kvaliteter studerats (SiC-B, SiC-N, SiC-SC-1RN och SiC-HPN). Materialen är också samlade i tabell 3 tillsammans med densitet och hårdhet.

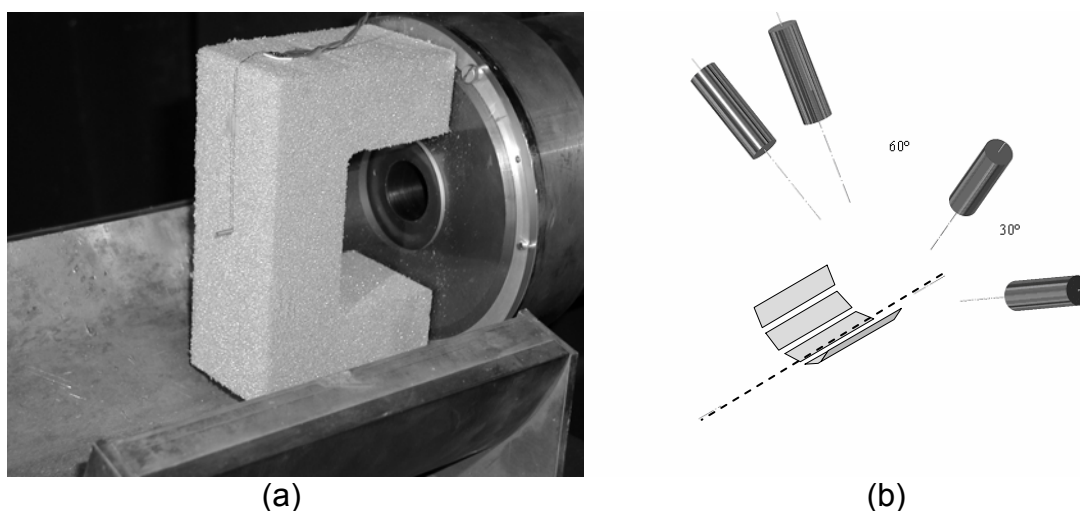
3.2 Vickershårdhet och brottseghet

Provmaterialens hårdhet och brottseghet mättes med Vickersindentering vid en belastning på 98 N (10 kg). Alla beräkningar utfördes enligt metoder beskrivna i avsnitt 2.1 och sex till tio intryck gjordes på varje material varefter medelvärde och standardavvikelse beräknades.

3.3 Ballistiska experiment

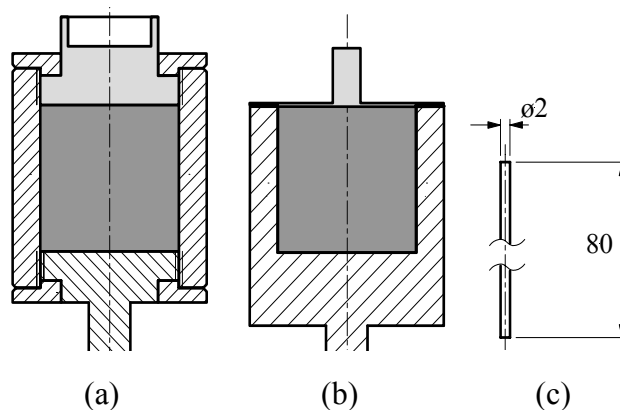
Skjutförsöken genomfördes med omvänd skjutteknik i FOIs lättgaskanonanläggning. Den omvända skjuttekniken innebär att målet skjuts mot en stationär projektil som är monterad i skottlinjen. Denna försöksteknik ger god kontroll på anslagsgeometrin och möjliggör försök med förenklade projektilgeometrier. Genom att genomföra experimenten i modellskala kan röntgenblixtrar användas för att i detalj följa interaktionen mellan projektil och mål. Experimenten beskrivs fullständigt av Lundberg m. fl. [3, 4].

Projektilen var tillverkad av tungmetall (DX2 HCMF eller Y925) och i form av en cylinder med diameter 2 mm, längd 80 mm och med plana ändytor. Projektilen sattes fast i en hållare av skumplast (Divinycell H45) som monterades direkt på kanonens mynning. I figur 3 framgår experimentuppställningen.



Figur 3. (a) Projektilen monterad i divinycellfixturen och placerad direkt mot eldrörsmynningen samt (b) röntgenblixtrarna och filmens placering i förhållande till skottlinjen.

Målen bestod av en cylinder av keram fastkrympt i en fördämning av höghållfast stål. Framför keramcylindern monterades ett lock av stål eller koppar. Lockets huvuduppgift är att dämpa ut anslagsstöten och påbörja erosionen av projektilen. En drivspegel av plast (Lexan) fungerade som stöd och tätning mot eldröret under utskjutningen. Två olika skjutserier har genomförts, Lundberg [3, 4], med delvis olika målkonfigurationer och i figur 4 visas hur fördämning och kopparlock är utformade i de olika fallen. I tabell 3 sammanfattas de undersökta materialens densitet och E-modul tillsammans med aktuell måluppställning.



Figur 4. Utformning av kerammålen i de två skjutserierna från (a) Lundberg [3] och (b) Lundberg [4] samt (c) projektilens dimensioner.

Tabell 3. Undersökta keramers densitet, E-modul och målkonfiguration.

Material / beteckning	Måluppställning	Densitet (kg/m ³)	E-modul (GPa)
Borkarbid, B ₄ C	Enligt figur 4a	2490	460
Titandiborid, TiB ₂	Enligt figur 4a	4400	570
Kiselkarbid, SiC-B	Enligt figur 4a och 4b	3230	448
Kiselkarbid, SiC-N	Enligt figur 4b	3230	448
Kiselkarbid, SiC-SC-1RN	Enligt figur 4b	3210	448
Kiselkarbid, SiC-HPN	Enligt figur 4b	3220	448

Målets hastighet bestämdes utifrån två röntgenblyxtbilder tagna under projektil-målinteraktionen. För att avgöra om projektilen penetrerar eller inte avbildades dess växelverkan med målet med fyra 450 kV röntgenblyxtar. Genom att variera anslagshastigheten kunde ett intervall bestämmas inom vilket transitionshastigheten ligger.

4 RESULTAT

I det följande presenteras resultaten av hårdhets- och brottseghetsmätningarna på de olika keramerna samt de uppmätta transitions hastigheterna. Jämförelserna görs dels mellan olika keramiska material, tabell 4, och dels mellan olika kvalitéer av kiselkarbid, tabell 5.

4.1 Korrelation mellan hårdhet, brottseghet och transitions hastighet

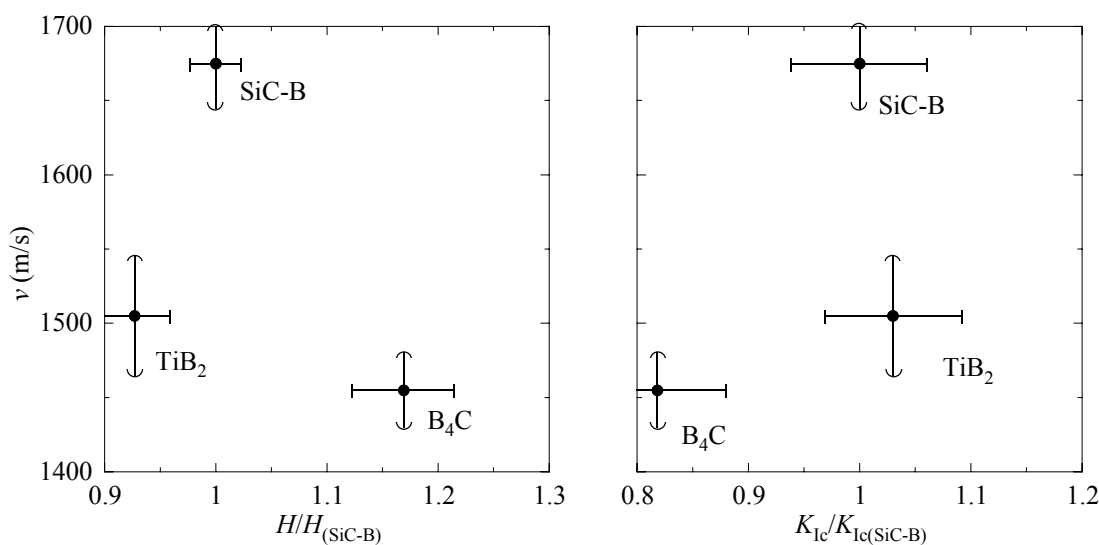
Det framgår från tabell 4 att borkarbid, som väntat, är väsentligt hårdare än kiselkarbid och titandiborid medan skillnaden mellan de två sistnämnda är relativt liten. Materialens brottseghet uppvisar det omvända förhållandet med lägst brottseghet för borkarbid följt av kiselkarbid och titandiborid. Även för brottsegheten gäller att borkarbid är tydligt sprödare än både kiselkarbid och titandiborid medan skillnaden mellan de två sistnämnda är mycket liten.

Transitions hastigheten som här utnyttjas som ett mått på ballistisk skyddsförmåga indikerar att kiselkarbid har högst skyddsförmåga, med en transitions hastighet tydligt över både titandiborid och borkarbid för aktuell målkonfiguration och hot. Skillnaden mellan titandiborid och kiselkarbid är mindre, men en något högre transitions hastighet för titandiborid kan noteras.

Tabell 4. Olika keramiska materials hårdhet, brottseghet och transitions hastighet.

Keram	Vickershårdhet H (GPa)	Brottseghet K_{Ic} (MPam ^{1/2})	Transitions hastighet v_0^* (m/s)
SiC-B	21,9 ± 0,5	3,3 ± 0,2	1675 ± 30
TiB ₂	20,3 ± 0,7	3,4 ± 0,2	1505 ± 40
B ₄ C	25,6 ± 1,0	2,7 ± 0,2	1455 ± 25

En jämförelse mellan de i tabell 4 noterade resultaten indikerar att Vickershårdhet i det aktuella fallet inte kan användas för att rangordna olika keramer. Borkarbid, med den lägsta brottsegheten, uppvisar däremot också den lägsta transitions hastigheten. I figur 5 nedan redovisas resultaten grafiskt där hårdhet och brottseghet har normaliserats mot de värden som gäller för kiselkarbid, SiC-B.



Figur 5. Transitions hastighet som funktion av hårdhet (vänstra delen) och brottseghet (högra delen). Både hårdhet och brottseghet är normaliserad mot de värden som gäller för kiselkarbid, SiC-B.

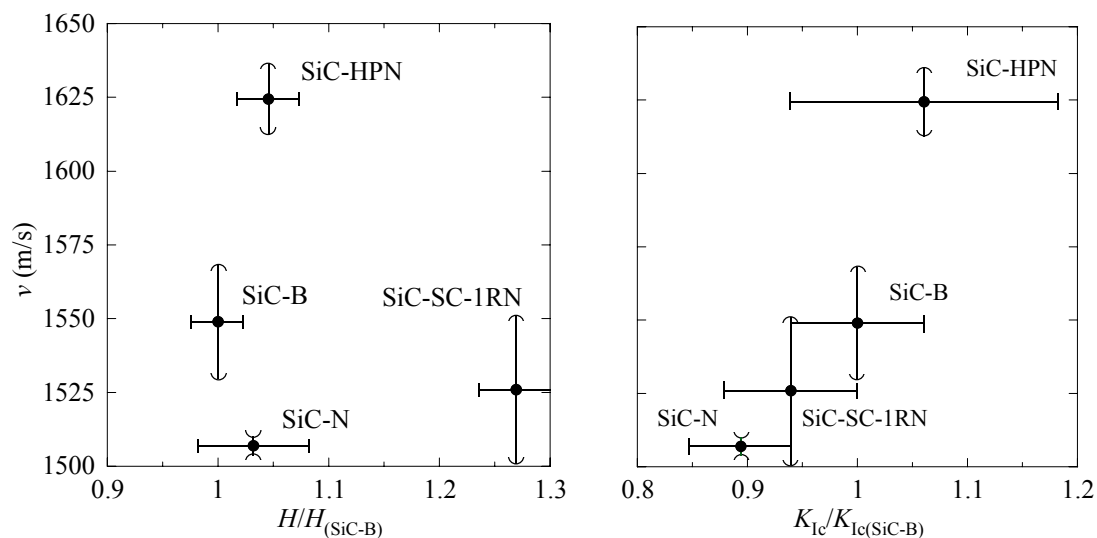
Det framgår tydligt ur figur 5 att den uppmätta hårdheten i det aktuella fallet inte kan användas för att rangordna olika keramer. Inte heller brottsegheten uppvisar någon övertygande korrelation med skjutförsöken.

I tabell 5 redovisas hårdhet, brottseghet och transitions hastighet för några olika kiselkarbidkvaliteter. Det framgår att en av de fyra undersökta kiselkarbiderna har en betydligt högre hårdhet än de övriga tre, vilkas värden med hänsyn till feluppskattningen överlappar varandra. Resultaten indikerar också att SiC-HPN har en högre brottseghet än de andra undersökta materialen och skillnaden mellan resterande tre kvaliteter är liten. Transitions hastigheten är också högst för material SiC-HPN medan de övriga tre ligger inom ett snävare hastighetsintervall.

Tabell 5. Olika kiselkarbidkvaliteters Vickershårdhet, brottseghet och transitions hastighet.

Keram	Hårdhet H (GPa)	Brottseghet K_{Ic} (MPam ^{1/2})	Transitions hastighet v_0 (m/s)
SiC-B	21,9 ± 0,5	3,3 ± 0,2	1549 ± 19
SiC-N	22,6 ± 1,1	2,95 ± 0,1	1507 ± 5
SiC-SC-1RN	27,8 ± 0,7	3,1 ± 0,2	1526 ± 25
SiC-HPN	22,9 ± 0,6	3,5 ± 0,4	1625 ± 12

En grafisk jämförelse mellan de olika kiselkarbidkeramernas transitions hastighet som funktion av hårdhet respektive brottseghet kan ses i figur 6. Även i denna figur är hårdhet och brottseghet normaliserade mot de värden som gäller för SiC-B.



Figur 6. Transitions hastighet som funktion av hårdhet (vänstra delen) och brottseghet (högra delen). Både hårdhet och brottseghet är normaliserade mot de värden som gäller för kiselkarbiden, SiC-B.

Från figur 6 framgår att det är svårt att se någon korrelation mellan de olika kiselkarbidernas hårdhet och den uppmätta transitions hastigheten. Däremot så uppvisar brottsegheten en trend som överensstämmer med transitions hastigheten och med ökande brottseghet ökar transitions hastigheten.

5 SLUTSATSER

Den genomförda undersökningen tillsammans med de litteraturdata som redovisats visar att det finns potential för att använda indentering som åtminstone en del i en metodik för att rangordna pansarkeramer.

Två olika testserier har genomförts. I det första fallet har tre olika keramer jämförts (kiselkarbid, borkarbid och titandiborid) och i den andra serien har fyra olika kvalitéer av kiselkarbid undersökts vad beträffar hårdhet, brottseghet och transitions hastighet.

I denna studie går det inte att se ett samband mellan brottseghet eller hårdhet och transitions hastighet för de här undersökta olika keramtyperna. För prover av samma materialtyp, SiC, men med olika kvalitéer, kan ett samband mellan brottseghetsvärden och transitions hastighet däremot ses, där högre brottseghet leder till högre transitions hastighet. De uppmätta hårdhetsvärdena för kiselkarbiderna uppvisar däremot ingen korrelation med transitions hastigheten.

6 FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE

Det genomförda arbetet visar att det finns en potential för att använda indenteringsresultat som en del i en metodik för att rangordna pansarkeramer.

Den metod som anses mest lovande är att använda instrumenterad indentering. Från ett sådant försök kan belastningsområden med huvudsakligen elastisk respektive plastisk deformation separeras från varandra. Dessutom kan den belastning då deformationen övergår från att vara plastisk till att domineras av materialbrott bestämmas. Dessa två parametrar och skillnaden mellan dem är enligt Wereszczak viktiga för att rangordna pansarkeramer.

Ett nästa steg skulle kunna vara att göra dynamisk (instrumenterad) indentering för att undersöka om ökad belastningshastighet påverkar dels hårdhetsvärdena, och eventuell rangordning, och dels skadeutvecklingen hos keramen.

I kombination med dessa statiska och dynamiska mätresultat bör simuleringar av intrycken göras. Detta eftersom randvillkoren vid intrycken är väl karakteriserade och simuleringresultaten kan då användas för att mera detaljerat studera skadeutveckling och för att härleda parametrar till materialmodeller.

7 REFERENSER

- [1] J. J. Swab, "Hardness and damage associated with pointed indentation in ceramics", State University of New York at Stony Brook, New York, Doctoral Thesis 2004.
- [2] E. Medvedovsky, "Silicon carbide-based ceramics for ballistic protection" presenterad vid Proceedings of the Ceramic Armor and Armor Systems symposium, Nashville, TN, USA, 2003.
- [3] P. Lundberg, R. Renström och B. Lundberg, "Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, s. 259-275, 2000.
- [4] P. Lundberg och B. Lundberg, "Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, s. 781-792, 2005.
- [5] A. Pettersson, M. Oskarsson och J. Pettersson, "Gradient- och matrismaterial - en litteraturstudie", Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, FOI-R--0128--SE, juni 2001.
- [6] A. Pettersson och P. Pettersson, "Utvärdering av mekaniska egenskaper hos SPS-tillverkade Al₂O₃- och TiB₂-baserade material", FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, FOI-R--0406--SE, mars 2002.
- [7] P. C. den Reijer, "Impact on Ceramic Faced Armour", Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, Doctoral Thesis 1991.
- [8] J. Lankford, "The Role of Dynamic Material Properties in the Performance of Ceramic Armor", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 1, s. 205-210, 2005.
- [9] T. Holmquist, "Modeling spherical indentation experiments onto silicon carbide" presenterad vid 29:th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Cocoa Beach, FL, USA, 2005.
- [10] D. K. Kim, J. H. Kim, Y.-G. Kim och C.-S. Lee, "Controlled explosive indentation on ceramics" presenterad vid Proceedings of the Ceramic Armor and Armor Systems Symposium, Nashville, TN, USA, 2003.
- [11] A. Wereszczak och R. H. Kraft, "Instrumented Herzian Indentation of Armor Ceramics" presenterad vid Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2002.
- [12] J. B. Quinn och G. D. Quinn, "Indentation Brittleness of Ceramics: A Fresh Approach", *Journal of materials science*, vol. 32, s. 4331-4336, 1997.
- [13] A. C. Fischer-Cripps, *Introduction to Contact Mechanics*. New York: Springer, 2000.
- [14] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*. London: McGraw-Hill, 1988.
- [15] M. A. Meyers och K. K. Chawla, *Mechanical Metallurgy - Principles and Applications*. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1984.
- [16] 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 American Ceramic Society*, vol. 64, s. 533-538, 1981.
- [17] B. R. Lawn, A. G. Ewans och D. B. Marshall, "Elastic / Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median / Radial Crack System", *Journal of American Ceramic Society*, vol. 63, s. 574-581, 1980.
- [18] H.-J. Kim och Y.-G. Kweon, "Elastic modulus of plasma-sprayed coatings determined by indentation and bend tests", *Thin Solid Films*, vol. 342, s. 201-206, 1999.
- [19] M. Flinders, D. Ray, A. Anderson och R. A. Cutler, "High-Toughness Silicon Carbide as Armor", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 88, s. 2217-2226, 2005.
- [20] B. R. Lawn, "Indentation of Ceramics with Spheres: A Century after Herz", *Journal of American Ceramic Society*, vol. 81, s. 1977-94, 1998.

- [21] H. Wang och A. A. Wereszczak, "Mechanical response of silicon nitrides under dynamic indentation" presenterad vid Proceedings of the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Cocoa Beach, FL, USA, 2005.
- [22] B. J. Koeppel och G. Subhash, "Characteristics of residual plastic zone under static and dynamic Vickers indentations", *Wear*, vol. 224, s. 56-67, 1999.
- [23] M. Nilsson, "Dynamic hardness testing using a split-Hopkinson pressure bar apparatus", FOI, FOI-R--0447--SE, 2002.