

Martin Nilsson, Lars Westerling, Peter Skoglund

Karaktärisering/simulering av hårdmetallprojektiler. Lägesrapport.

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--0296--SE

December 2001

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Martin Nilsson, Lars Westerling, Peter Skoglund

Karaktärisering/simulering av hårdmetallprojektiler. Lägesrapport.

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0296--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år December 2001	Projektnummer E2022
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Martin Nilsson Lars Westerling Peter Skoglund	Projektledare Ewa Lidén	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Karaktärisering/simulering av hårdmetallprojektiler. Lägesrapport.		
Sammanfattning (högst 200 ord) Finkalibriga pansarbrytande projektiler har en kärna av hårt stål eller volframkarbid (WC). En kärna av WC resulterar i mycket hög penetrationsförmåga och studier av hur man kan skydda sig mot denna typ av projektiler är prioriterade. Då kontinuumdynamiska simuleringar skall genomföras krävs materialmodeller lämpade för denna typ av material och framtagning av materialdata som beskriver beteendet hos WC vid de aktuella belastningarna. WC är ett mycket hårt material och uppvisar ingen plastisk töjning vid drag- eller böjprovning. Vid de höga tryck som kännetecknar penetration av pansarmaterial kommer dock projektilen att deformeras plastiskt. I denna inledande rapport diskuteras metoder för provning och simulering av hårda och spröda material som WC och andra hårdmetallkompositer och keramer. I rapporten redogörs kortfattat för metoder för tryck-, skjuv- och hårdhetsprovning av hårda och spröda material. En grundligare genomgång görs av den valda provningsmetoden - dynamisk indentering - och hur data från indentering kan användas för att utveckla konstitutiva samband. En kortfattad sammanställning av några relevanta materialmodeller och vilka data som behövs för att kunna använda dessa görs. Framtida arbete kommer att bestå av verifiering av provningsmetoden med hjälp av metalliska provmaterial, exempelvis aluminium och stål. Därefter kommer försök på hårda och spröda material som WC att genomföras. Materialsambanden kan sedan implementeras i lämpliga materialmodeller och beräkningarna verifieras mot ballistiska försök.		
Nyckelord volframkarbid, hårdmetall, karaktärisering, simulering, indentering, hårdhetsmätning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 17 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--0296--SE	Report type User report
	Research area code 5. Combat	
	Month year December 2001	Project no. E2022
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Martin Nilsson Lars Westerling Peter Skoglund	Project manager Ewa Lidén	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Characterisation/simulation of hard metal projectiles. Progress report.		
Abstract (not more than 200 words) <p>Small calibre armour piercing projectiles have a core made of hardened steel or tungsten carbide (WC). The WC core results in very high penetration and a study of protection against this threat is of high priority. When continuum mechanical calculations are made there is a need for material models to describe the behaviour of this kind of materials and material data describing WC. WC is a very hard material and shows no plastic strain in tension or bending. At the high pressures signifying penetration of armour materials, the projectile will deform plastically. In this initial report, methods for testing and simulating of hard and brittle materials like WC, other hard metal composites and ceramic materials are discussed. In the report, there is a brief description of methods of compressive, shear and hardness testing of hard and brittle materials. A more thorough description is made of the chosen testing method - dynamic indentation – and how data from indentation testing can be used to develop constitutive relationships. A brief compilation of some relevant material models is done. Future work will consist of verifying the testing method with metallic materials for example steel and aluminium. Thereafter testing of hard and brittle materials like WC will be done. Material relationships are implemented in a suitable material model and the calculations are verified against ballistic tests.</p>		
Keywords tungsten carbide, hard metal, characterisation, simulation, indentation, hardness testing		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 17 p.	
	Price acc. to pricelist Security classification	

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
2 Intressanta provningsmetoder	6
2.1 Tryckprovning.....	6
2.2 Skjuvprovning	7
2.3 Indentering	7
3 Vald provningsmetod - dynamisk indentering	10
4 Materialmodeller för spröda material.....	11
5 Fortsatt arbete	12
6 Slutsatser	13
Referenser	14

1 Inledning

En variant av finkalibriga pansarbrytande projektiler innehåller en kärna, en penetrator, av volframkarbid (WC). WC är ett mycket hårt material och uppvisar ingen plastisk töjning vid drag- eller böjprovning. Vid de höga tryck som kännetecknar penetration av pansarmaterial kommer dock projektilen att deformeras plastiskt. Det är alltså av stort värde att finna en provningsmetod som tillåter att materialet plasticeras och att uppmätta fysikaliska storheter sedan kan användas i en relevant matematiskt effektiv materialmodell för att genomföra numeriska simuleringar. I denna inledande rapport diskuteras metoder för provning och simulering av hårda och spröda material som WC, samt andra hårdmetallkompositer och keramer.

2 Intressanta provningsmetoder

2.1 Tryckprovning

Tryckprov är en enkel metod för att mekaniskt prova keramer. Dock är det viktigt att se till så att lastvägen är rak och att kantbelastning eller böjning inte uppstår. Ett sätt att minska risken för dessa problem är att göra radiella tryckprov på cylindrar, fig. 1 och fig. 2, kallat Brazilianförsök. Metoden utnyttjar det faktum att det spröda materialet är starkare i tryck än i drag och ger ett värde på dragbrottsstressen, ekv. 1. För att undvika lokal krossning av provkroppen bör inte kraften överföras i en punkt utan överföras via en mindre yta m h a mellanlägg av exempelvis koppar. Metoden är etablerad och används bland annat för provning av geologiska material. Provnigen genomförs oftast kvasistatiskt och det finns färdiga fixturer att köpa [1].

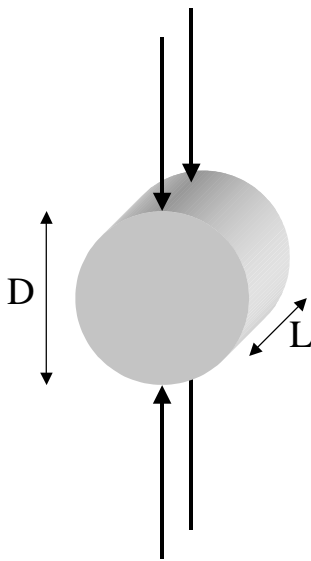


fig. 1. Cylinderformat tryckprov, radiellt belastat, även kallat Brazilianförsök.

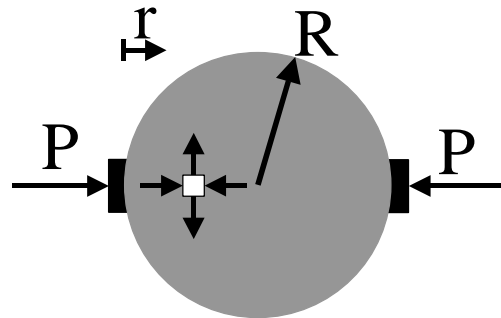


fig. 2. Brazilianförsök, provkroppen frilagd [2]

$$s_{TRYCK} = \frac{2P}{pLD} \frac{D^2}{r(D-r)} \quad \text{ekv. 1}$$

$$s_{DRAG} = \frac{2P}{pLD}$$

I ekv. 1 är L och D höjd respektive diameter hos cylindern och r avståndet från elementet till den punkt där kraften P appliceras. Material innanför cirka 80 % av radien R kommer att utsättas för spänning enligt ekv. 1 och fig. 1 och fig. 2 [3].

Att göra försöken vid olika och högre töjningshastigheter ökar relevansen av provningen för penetrationsmekaniska beräkningar. Det finns flera exempel på sådan provning i litteraturen, bland annat Zhao och Li [4] som använder en dynamisk hydropneumatisk dragprovningssmaskin för att utföra Brazilianförsök på granit vid olika belastningshastigheter och Rodríguez et al [2, 5] som gör Brazilianförsök med keramer. Rodríguez et al [2, 5] använder en tryck-Hopkinson för dynamiska försök och en konventionell provningssmaskin för kvasistatiska

försök. De dynamiska försöken övervakas med kameror för att kunna följa sprickförloppet.

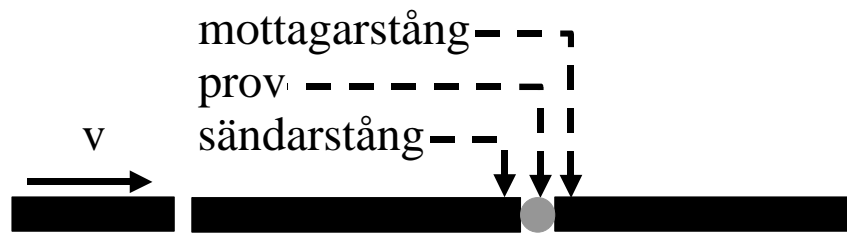


fig. 3. Dynamiskt Brazilianförsök i SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar).

2.2 Skjuvprovning

En metod som används för att prova metaller vid höga töjningshastigheter är vrid-Hopkinson-provning [6]. Vid provning av metaller används en komplicerad provgeometri men vid provning av hårda och spröda material är den mycket svår och dyr att tillverka och istället får kubformade provstavar användas. Chiem och Liu [7] gör försök med kolfiberarmerad plast och Lee et al [8] gör försök med polykristallin volfram. Provkroppsinfästningen visas i fig. 4 och ekvationerna nödvändiga för utvärdering i ekv. 2.

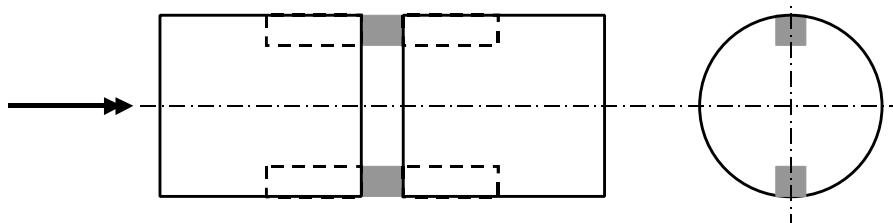


fig. 4. Vrid-Hopkinson anpassad för kubformade provstavar, $n = \text{antalet provstavar} = 2$ [7, 8].

$$\begin{aligned}\dot{g} &= \frac{2T_R r_m}{Jrc_0 h_3} \\ g &= \frac{2r_m}{Jrc_0 h_3} \int_0^t T_R dt \\ t &= \frac{T_T}{2nh_1 h_2 r_m}\end{aligned}\quad \text{ekv. 2}$$

Där c_0 är skjuvvågens hastighet, T_R och T_T är amplituden på reflekterade och transmitterade vågor (vridmoment), n är antalet prov (≥ 2), r_m är provets medelradie, h_1 , h_2 och h_3 är höjd, bredd och livlängd hos provet, ρ är densiteten och J är stångens yttröghetsmoment.

2.3 Indentering

Indentering innebär att en spets eller en kula av ett hårt material pressas mot det material som skall provas. Det finns ett antal olika hårdhetsmått och för några av dem redogörs kortfattat i tab. 1.

tab. 1. Sammanställning över olika hårdhetsmått.

Metod	Indentor	Last	Tillämpning
Brinell (HB)	Stålkula	500-3000 kg	Metaller
Rockwell B (HRB)	Stålkula	100 kg	Metaller
Rockwell C (HRC)	Diamantspets	150 kg	Härdade metaller
Vickers (HV) [9]	Diamantpyramid med kvadratisk basyta. Toppvinkel 136°.	9,81 N (1 g - 50 kg)	Metalliska, keramiska och geologiska material
Berkovich	Diamantpyramid med triangulär basyta.		Metalliska, keramiska och geologiska material
Knoop (HK) [10]	Diamantpyramid med rombisk basyta. Toppvinklarna mellan ytorna är 172,50° resp. 130,00°	9,81 N eller 19,61 N	Metalliska, keramiska och geologiska material

Vid *universell hårdhetsprovning* (HU) registreras last och förskjutning under försöket och hårdheten bestäms som last dividerat med intryckets mantelarea (inte den projicerade area som basytan ger) medan lasten är applicerad. En Vickersindentor enligt ovan, tab. 1, används. Övriga försöksparametrar för HU ges av DIN 50359-1 [11]. Försöket kan ske antingen med kraft- eller lägeskontroll. Det kan betonas att kraftkontroll kan ge upphov till kryp och lägeskontroll ger spänningsrelaxation.

Giannakopoulos *et al.* [12-19] har genomfört arbeten som gör det möjligt att bestämma mekaniska egenskaper ur indenteringsförsök. I [19] visar författarna med hjälp av numeriska simuleringar att för ett idealplastiskt material och en stor last är resultatet från Vickers-indentering oberoende av indenteringsdjup. Töjningen under en indentering blir alltså inte beroende av indenteringsdjupet utan beror endast på indentorns geometri. Detta faktum används också av Milman *et al.* [20-24] i resonemanget nedan. Giannakopoulos *et al.* [19] redovisar också ett uttryck för E-modulen som kan erhållas med hjälp av indenteringsförsök, ekv. 3.

$$\frac{E}{1-\nu^2} = \frac{1}{1.142\sqrt{A_{\max}}} \frac{dP}{dh} \Rightarrow$$

$$E = \frac{1-\nu^2}{1.142\sqrt{A_{\max}}} \frac{dP}{dh}$$

ekv. 3

I ekv. 3 är A_{\max} den sanna projicerade arean vid pålastningens slut, det vill säga maximal kraft applicerad, och styvheten dP/dh beräknas som initiala lutningen på avlastningskurvan, det vill säga den linje som går igenom punkten $h=h_r$ i fig. 6.

Milman *et al* [20, 21] använder indentering för att bestämma duktilitet och spänningstöjningskurva för olika keramiska och metalliska material [20, 21]. I [20] används Vickershårdhet och i [21] Meier-hårdhet. Som indentor för att mäta Meier-hårdhet användes 8 olika diamantpyramider med 3 sidor och toppvinklarna $\theta = 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ och 80° . Resultatet av

indenteringen kan omräknas som flytspänning i tryck och resultatet är därför analogt med spänningstöjningskurvor. P s s som för vanliga spänningstöjningskurvor går det att bestämma proportionalitetsgräns, undre sträckgräns och brottgräns. Olika tillvägagångssättet finns tillgängliga i litteraturen [20-28].

Dal Maschio och Nobile [29] använder en Vickersindentor, toppvinkel 136° , och en annan pyramidformad indentor med en toppvinkel av 128° för att utveckla en metod för att mäta brottsegheten K_{IC} hos spröda material. De gör försök med sodaglas och får K_{IC} -värden på $0,57 - 0,78 \text{ MPam}^{1/2}$ beroende på pålagd kraft. Motsvarande värde mätt med hjälp av SENB (single-edge-notched-beam) är $0,75 \text{ MPam}^{1/2}$. Dal Maschio och Nobile [29] anser att det är en god approximation. För att beräkna K_{IC} använder de ekv. 4.

$$K_{IC} = 0,014 \sqrt{\frac{E}{H}} \frac{P}{c^{3/2}} \quad \text{för } 2\mathbf{y} = 136^\circ$$

$$K_{IC} = 0,0157 \sqrt{\frac{E}{H}} \frac{P}{c^{3/2}} \quad \text{för } 2\mathbf{y} = 128^\circ$$

ekv. 4

I ekv. 4 är E E-modulen, H är ett enkelt hårdhetsmått $H=P/2a^2$ där a är diagonalen av intrycket, \mathbf{y} är indentorns toppvinkel, P är kraften och c är spricklängden.

3 Vald provningsmetod - dynamisk indentering

I litteraturen finns flera exempel på utrustningar som medger indentering under höga deformationshastigheter. Marsh [25] fäster en Vickersindenter på en elektrisk transduktor och gör indenteringar med en varaktighet under 0,1 s. Koepfel och Subhash [30-33] använder en Hopkinsonstång för att belasta provet och mäter med hjälp av kraftcell.

Den valda provningsmetoden bygger på användandet av Hopkinsonsteori för att mäta kraft och inträngning under ett snabbt indenteringsförlopp. En Vickersindenter sitter fast i en sändarstång av metall och provet i en mottagarstång, även den av metall, fig. 5. Kraften genereras med hjälp av en projektil som skjuts mot sändarstången med hjälp av tryckluft. Typiska hastigheter för projektilen är 10 m/s. På sändar- och mottagarstång finns töjningsgivare som registrerar töjningarna i stängerna. Töjningsregistreringarna kan sedan användas för att beräkna kraft och inträngning under provningsförloppet [34, 35]. För att ta hänsyn till reflektioner på grund av areaförändringen i sändarstången används den av Lundberg *et al.* [34, 36] utvecklade metoden att med hjälp av töjningsmätningar i 2 tvärsnitt räkna sig förbi dessa.

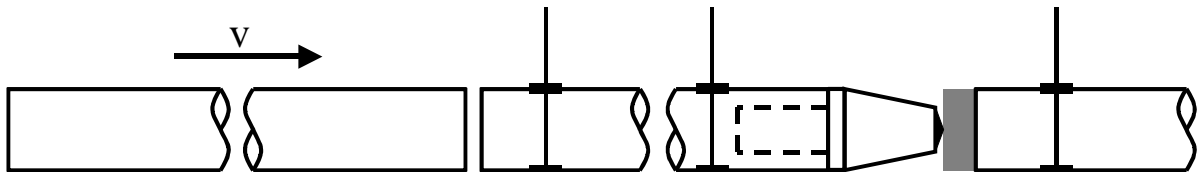


fig. 5. Projektil, sändarstång, indenter, prov och mottagarstång.

Utrustningen är färdigställd och inledande försök med metallprov har gjorts. Inga resultat är dock ännu färdiga att presentera.

Det principiella utseendet hos ett indenteringsförlopp med kraft-väg-registrering visas i fig. 6. Den räta linjen genom h_r det vill säga lutningen på det initiala avlastningsförloppet ger E-modulen enligt ekv. 3

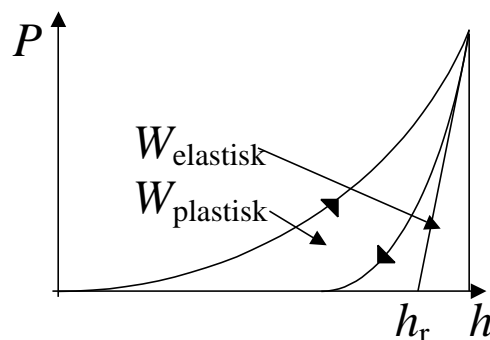


fig. 6. Det principiella utseendet hos ett indenteringsförlopp med kraft-väg-registrering. På- och avlastningsförlopp, plastiska och elastiska delar av indenteringsarbetet.

$$W = \int Pdh \quad \text{ekv. 5}$$

$$W_{total} = W_{plastisk} + W_{elastisk} \quad \text{ekv. 6}$$

4 Materialmodeller för spröda material

En genomgång av materialmodeller för spröda material, som även inkluderar modeller som inte är implementerade i Autodyn, finns redovisade i [37]. I simuleringsprogramvaran Autodyn finns bland annat materialmodellerna CM1 och JH2 införda för att beskriva spröda materials mekaniska uppförande. CM1-modellen eller Cumulative Damage modellen som den också kallas programmerades ursprungligen av Åke Persson [38] som en användarrutin till Autodyn. Modellen innehåller en skadevariabel och skadeutvecklingen drivs av den plastiska deformationen. Skadan leder till att flytspänningen, som beror av trycket, minskar och även de elastiska modulerna påverkas. Det fullt skadade materialet kan ges en viss hållfasthet genom att mata in ett maxvärde (mindre än ett) för skadevariabeln.

Modellen JH2 [39, 40] innehåller en skadevariabel som drivs av plastiska deformationen på ett sådant sätt att ett högt tryck gör skadeutvecklingen långsammare. Det intakta (oskadade) materialet har en tryckberoende flytspänningen. Det gäller även det fragmenterade (fullt skadade) materialet, som har hållfasthet under förutsättning att trycket är positivt. Skadeutvecklingen leder till volymstillväxt, på grund av att fragmenten måste ha mellanrum mellan sig för att kunna röra sig. Denna volymstillväxt (bulking) finns med i modellen.

Övriga modeller som inte finns implementerade i Autodyn innefattar bland annat JH1 [41]. Denna är en föregångare till JH2 men har dock på nytt börjat användas av Johnson och Holmqvist för att modellera så kallat "interface defeat" (stela väggen) [42]. Det finns vidare andra materialsamband som bygger på mikromekanik och brottmekaniska teorier för spricktillväxt, se till exempel Seaman *et al.* [43] samt Rajendran [44].

För att bestämma materialkonstanterna till de samband som diskuteras kan en simulering av ett känt indenteringsförsök göras. I simuleringen beskrivs materialet med en modell som finns implementerad i mjukvaran och parametrarna i modellen varierar tills det simulerade kraftvägförloppet överensstämmer med det experimentellt uppmätta.

Slutligen ges den i många beräkningssammanhang viktiga brottparametern K_{IC} direkt av den diskuterade dynamiska indenteringsmetoden, se ekv. 4. Till exempel används K_{IC} i Autodyns "Crack Softening" modell där brottenergin är av intresse.

5 Fortsatt arbete

Det fortsatta arbetet kommer att inriktas på att verifiera den valda provningsmetoden, dynamisk indentering, med hjälp av metalliska provmaterial, exempelvis aluminium och stål. Steget därpå blir provning av hårda och spröda material det vill säga WC. Lovande metoder för att beräkna spänning-töjningssamband ur hårdhetsmätningar finns och dessa skall undersökas vidare.

En möjlighet som kan tillgripas är att simuleringsprogram används i kombination med de experimentella försöken för att bestämma materialparametrar till de modeller som är implementerade i mjukvaran. Programmet får räkna sig igenom olika parameteruppsättningar tills god samstämmighet uppnås. Ballistiska eller andra oberoende mekaniska försök kan sedan användas för att jämföra numeriska beräkningar med experiment.

Det måste också poängteras att det är möjligt att använda andra indentatorer exempelvis Hertz, Rockwell C, Meier eller Knoop. Rotationssymmetriska indentatorer (Rockwell C) har fördelen att försöken kan simuleras i 2D och kraftigt reducera beräkningstiden.

6 Slutsatser

För det första tycks dynamisk indentering vara en intressant och enkel metod för att prova material under förhållanden som påminner om ballistiska försök. Dynamisk hårdhet bör ge möjligheter att inbördes rangordna provade material.

För det andra ger metoden tillgång till flera materialparametrar; hårdhet, brottseghet (K_{IC}) och möjlighet att erhålla flytspänningen i tryck hos hårda och spröda material. Det är svårt att få plastisk töjning i material av denna typ med andra mekaniska provningsmetoder. Brottseghet och flytspänning är parametrar som kan användas som delar av nödvändig indata till materialmodeller.

Referenser

- [1] MTS, "Indirect Tension", MTS, web-page, <http://www.mts.com/menusystem.asp?DataSource=0&NodeID=844>, 2001.
- [2] J. Rodríguez, C. Navarro och V. Sánchez-Gálvez, "Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials", *J. Phys. IV France Colloq. C8 (DYMAT 94)*, vol. 4, s. 101-106, 1994.
- [3] D. E. Lambert och C. A. Ross, "Strain rate effects on dynamic fracture and strength", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, s. 985-998, 2000.
- [4] J. Zhao och H. B. Li, "Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, s. 861-866, 2000.
- [5] F. Gálvez, J. Rodriguez och V. Sánchez, "Tensile strength measurements of ceramic materials at high rates of strain", *J. Phys. IV France Colloq. C3 (DYMAT 97)*, vol. 7, s. 151-156, 1997.
- [6] J. Erikson, A. Pettersson, M. Nilsson och P. Skoglund, "Vrid-Hopkinson - en metod för snabba skjuvbelastningar", FOA, Stockholm, (Metodrapport/Methodology report), FOA-R--00-01775-310--SE, 2001.
- [7] C. Y. Chiem och Z. G. Liu, "High strain-rate behaviour of carbon fiber composites" presenterad vid Mechanical Behaviour of Composites and Laminates, Kupari, Jugoslavien, 1987.
- [8] W.-S. Lee, C.-F. Lin och G.-L. Xie, "Dynamic shear deformation and failure behaviour of pure polycrystalline tungsten", *Materials Science and Engineering A*, vol. 247, s. 102-112, 1998.
- [9] ASTM C1327-99, "Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics"
- [10] ASTM C1326-99, "Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics"
- [11] DIN 50359-1, "Universal hardness test. Part 1: Test method"
- [12] A. Gouldstone, H.-J. Koh, K.-Y. Zeng, A. E. Giannakopoulos och S. Suresh, "Discrete and continuous deformation during nanoindentation of thin films", *Acta Materialia*, vol. 48, s. 2277-2295, 2000.
- [13] T. A. Venkatesh, K. J. Van Vliet, A. E. Giannakopoulos och S. Suresh, "Determination of elasto-plastic properties by instrumented sharp indentation: guidelines for property extraction", *Scripta Materialia*, vol. 42, s. 833-839, 2000.
- [14] A. E. Giannakopoulos och S. Suresh, "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation", *Scripta Materialia*, vol. 40, s. 1191-1198, 1999.

- [15] P.-L. Larsson och A. E. Giannakopoulos, "Tensile stresses and their implication to cracking at pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics", *Materials Science and Engineering A*, vol. 254, s. 268-281, 1998.
- [16] A. E. Giannakopoulos och P.-L. Larsson, "Analysis of pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics", *Mechanics of Materials*, vol. 25, s. 1-35, 1997.
- [17] P.-L. Larsson, A. E. Giannakopoulos, E. Soderlund, D. J. Rowcliffe och R. Vestergaard, "Analysis of Berkovich indentation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, vol. 33, s. 155A, 1996.
- [18] K. Zeng, A. E. Giannakopoulos och D. J. Rowcliffe, "Vickers Indentation in Glass-II. Comparison of Finite Element Analysis and Experiments", *Acta metall.mater.*, vol. 43, s. 1945-1954, 1995.
- [19] A. E. Giannakopoulos, P.-L. Larsson och R. Vestergaard, "Analysis of Vickers Indentation", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 31, s. 2979-2708, 1994.
- [20] Y. V. Milman, B. A. Galanov och S. I. Chugunova, "Plasticity Characteristic Obtained through Hardness Measurement", *Acta metall. mater.*, vol. 41, s. 2523-2532, 1993.
- [21] Y. V. Milman, S. I. Chugunova, I. V. Goncharova och S. Luyckx, "Determination of Ductility and Stress Strain Curve of WC Based Hard Metals by Indentation Method", *Science of Sintering*, vol. 29, s. 155-161, 1997.
- [22] Y. V. Milman och S. I. Chugunova, "Mechanical Properties, Indentation and Dynamic Yield Stress of Ceramic Targets", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 23, s. 629-638, 1999.
- [23] Y. V. Milman, "Physics of the Hardness of Materials. New Possibilities of the Indentation Technique" presenterad vid Sintering, 2000.
- [24] Y. V. Milman, S. Luyckx, V. A. Goncharuck och J. T. Northrop, "Results from bending tests on submicron and micron WC-Co grades at elevated temperatures", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, In Press, Uncorrected Proof.
- [25] D. M. Marsh, "Plastic flow in glass", *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 279, s. 420-435, 1964.
- [26] W. Zhang och G. Subhash, "An elastic-plastic-cracking model for finite element analysis of indentation cracking in brittle materials", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, s. 5893-5913, 2001.
- [27] K. Tanaka, M. Kanari och N. Matsui, "A continuum dislocation model of Vickers indentation on a zirconia", *Acta Materialia*, vol. 47, s. 2243-2257, 1999.
- [28] A. Nayebi, O. Bartier, G. Mauvoisin och R. El Abdi, "New method to determine the mechanical properties of heat treated steels", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, s. 2679-2697, 2001.

- [29] R. Dal Maschio och L. Nobile, "A simplified approach for ceramic fracture toughness evaluation by indentation", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 51, s. 209-215, 1995.
- [30] B. J. Koeppel och G. Subhash, "Experimental technique to investigate the dynamic indentation hardness of materials", *Experimental Techniques*, vol. 21, s. 16-18, 1997.
- [31] B. J. Koeppel och G. Subhash, "Characteristics of residual plastic zone under static and dynamic Vickers indentations", *Wear*, vol. 224, s. 56-67, 1999.
- [32] G. Subhash, B. J. Koeppel och A. Chandra, "Dynamic indentation hardness and rate sensitivity in metals", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, vol. 121, s. 257-263, 1999.
- [33] R. J. Anton och G. Subhash, "Dynamic Vickers indentation of brittle materials", *Wear*, vol. 239, s. 27-35, 2000.
- [34] J. Carlsson, K. G. Sundin och B. Lundberg, "A method for determination of in-hole dynamic force-penetration from two-point strain measurement on a percussive drill rod", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 27, s. 553-558, 1990.
- [35] L. G. Karlsson, B. Lundberg och K. G. Sundin, "Experimental Study of a Percussive Process for Rock Fragmentation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 26, s. 45-50, 1989.
- [36] B. Lundberg, J. Carlsson och K. G. Sundin, "Analysis of elastic waves in non-uniform rods from two-point strain measurement", *J. Sound Vibration*, vol. 137, s. 483-493, 1990.
- [37] L. Westerling, "Materialmodeller för keramer tillämpade på simulering av penetration i kerampansar", FOA, Stockholm, (Metodrapport/Methodology report), FOA-R--97-00522-310--SE, 1997.
- [38] Å. Persson, "CM1 - a simple model for the dynamic deformation and failure properties of brittle materials" presenterad vid 4th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Engines, Göteborg, Sverige, 1991.
- [39] G. R. Johnson och T. J. Holmquist, "An improved computational constitutive model for brittle materials" i *High Pressure Science and Technology 1993*, S. C. Schmidt, J. W. Shaner, G. A. Samara och M. Ross, Eds. New York: American Institute of Physics, 1994, s. 981-984.
- [40] G. R. Johnson och T. J. Holmquist, "Response of boron carbide to large strains, high strain rates, and high pressures", *J. Appl. Phys.*, vol. 85, s. 8060-8073, 1999.
- [41] G. R. Johnson och T. J. Holmquist, "A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates, and high pressures" presenterad vid EXPLOMET Conference, San Diego, USA, 1990.

- [42] T. J. Holmquist och G. R. Johnson, "Modeling ceramic dwell and interface defeat" presenterad vid PAC RIM 4 International Conference on Advanced Ceramics and Glasses, Maui, Hawaii, USA, 2001.
- [43] L. Seaman, D. R. Curran och W. J. Murri, "A continuum model for dynamic tensile microfracture and fragmentation", *Trans. ASME: J. Appl. Mech.*, vol. 52, s. 593-600, 1985.
- [44] A. M. Rajendran, "Modeling the impact behavior of AD85 ceramic under multiaxial loading", *Int. J. Impact Engng*, vol. 15, s. 749-768, 1994.