

Annika Pettersson, Pernilla Pettersson

Utvärdering av mekaniska egenskaper hos SPS-tillverkade Al_2O_3 - och TiB_2 -baserade material



Annika Pettersson, Pernilla Pettersson

Utvärdering av mekaniska egenskaper hos SPS-tillverkade Al_2O_3 - och TiB_2 -baserade material

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0406--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år Mars 2002	Projektnummer I231
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51. VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Annika Pettersson Pemilla Pettersson	Projektledare Magnus Oskarsson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Utvärdering av mekaniska egenskaper hos SPS-tillverkade Al ₂ O ₃ - och TiB ₂ -baserade material		
Sammanfattning (högst 200 ord) De mekaniska egenskaperna har undersökts för submikron Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ med 25 vol% SiC och (Ti) _{0,05} (TiB ₂) _{0,95} genom hårdhetsmätning, brottseghetsanalyser och 4-punktböjprov. Fraktografisk undersökning gjordes på de prover som genomgått 4-punktböjprovning. Samtliga SPS-tillverkade material visade liknande mekaniska egenskaper som kommersiella material. Tillsats av en liten mängd titan i TiB ₂ ((Ti) _{0,05} (TiB ₂) _{0,95}) för att förbättra sintringen gav lika bra eller bättre egenskaper än enfasig TiB ₂ . Relativt stor spridning på böjhållfasthetsresultaten har erhållits på grund av ytans inverkan på resultaten, vilken även bekräftats genom fraktografisk-analys. Arbetet har bedrivits i samverkan med projektet Lätta Skydd.		
Nyckelord SPS, Spark Plasma Sintering, Al ₂ O ₃ , aluminiumoxid, TiB ₂ , titandiborid, Ti, titan		
Övriga bibliografiska uppgifter Bild på försättsbladet: Brottyta hos Al ₂ O ₃ provad av Svenska Keram institutet.	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 20	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organisation FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--0406--SE	Report type Methodology report
	Research area code 5. Combat	
	Month year Mars 2002	Project no. I231
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 51. Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Annika Pettersson Pernilla Pettersson	Project manager Magnus Oskarsson	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Evaluation of the mechanical properties of SPS-manufactured Al ₂ O ₃ - and TiB ₂ -based materials		
Abstract (not more than 200 words) The mechanical properties have been tested for submicron Al₂O₃, Al₂O₃ with 25 vol% SiC whiskers and (Ti)_{0.05}(TiB₂)_{0.95} through Vickers hardness, fracture toughness and 4-point bending strength. A fractographic investigation was made on the samples that were subjected to 4-point bending strength testing. All the materials show similar mechanical properties as the commercial materials. Addition of a small amount of titanium to TiB₂-materials ((Ti)_{0.05}(TiB₂)_{0.95}) to increase the sinterability gave equal or even better properties than monophasic TiB₂. The bending strength results gave a relatively high standard deviation, which partly can be explained by the influence of the surface finish, which also has been confirmed through the fractography analysis. The work has been performed in cooperation with the project Light Weight Armour.		
Keywords SPS, Spark Plasma Sintering, Al ₂ O ₃ , Alumina, TiB ₂ , Titaniumboride, Ti, Titanium		
Further bibliographic information Picture on the cover: Fracture surface of Al ₂ O ₃ tested at Swedish Ceramic Institute.	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 20 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1.	<i>Inledning</i>	5
2.	<i>Tillverkningsmetod</i>	6
3.	<i>Material</i>	6
4.	<i>Indenteringsanalyser</i>	6
5.	<i>Böjhållfasthet genom 4-punktböj</i>	8
6.	<i>Fraktografi</i>	11
7.	<i>Diskussion</i>	17
8.	<i>Summering</i>	17
9.	<i>Referenser</i>	18
	<i>Bilaga</i>	19

1. Inledning

Den nya Spark Plasma Sintering (SPS) tekniken ger helt nya möjligheter att ta fram material med speciella egenskaper och att kombinera olika materialtyper för att utnyttja olika positiva egenskaper hos olika material [1]. SPS-tekniken gör det möjligt att bibehålla ursprungsmaterialets kornstorlek, detta har tidigare varit svårt eller omöjligt eftersom andra tekniker har betydligt lägre uppvärmningshastighet och därmed får kornen tid på sig att växa till. Det är de korta processtiderna som är SPS-teknikens största fördel, vilket gör att det är mycket lätt att genom att variera sintringstiden kunna variera mikrostrukturen. Man kan med andra ord lätt undersöka ett materials optimala kornstorlek och form för att gynna vissa egenskaper. Genom ett sammarbete med Stockholms Universitet har FOI tillgång till denna teknik.

Denna rapport innehåller en sammanställning över SPS-tillverkade material och de mekaniska egenskaper som erhållits. Material som tillverkats och testats innefattar bland annat ren Al_2O_3 , Al_2O_3 kompositer med 25 vol% SiC whiskers och $(\text{Ti})_{0,05}(\text{TiB}_2)_{0,95}$.

2. Tillverkningsmetod

Alla material utom ”kommersiell TiB₂” (se resultatdelen nedan) har tillverkats med den moderna spark plasma sintering (SPS) tekniken. Med denna teknik värms endast provet upp, inte hela ugnskammaren som i andra tekniker, värmningen sker genom att en stark likström pulsas genom provet. Det bildas ett slags gnistplasma mellan kornen i materialet (därav ordet spark i namnet) vilket leder till att materialet ”självvärms” (self-heating) detta ökar sintringshastigheten. Man får både snabb uppvärmning och avsvälning med SPS-metoden och detta kombinerat med gnistplasma-fenomenet gör att man kan tillverka helt täta prover på några minuter. Traditionella sintringsmetoder tar ofta flera timmar. Ett enaxligt tryck kan läggas på under sintringen. SPS-tekniken beskrivs utförligare i FOI-R--0128--SE [1].

3. Material

En stor mängd material har framställts med SPS-tekniken för FOIs räkning, men den här rapporten kommer bara att diskutera materialen i tabell 1.

- Al₂O₃ proverna är tillverkade av pulver med submikron storlek, två olika avsvälningshastigheter har använts (se tabell 1).
- En slurry av SiC whiskers, Al₂O₃ och dispergeringsmedel (Dispex A40) har blandats genom rullmalning. Vätskan frystorkades sedan bort och pulverblandningen värmebehandlades för att få bort resterna av dispergeringsmedlet.
- Ti- och TiB₂-pulvren har blandats och sedan malts för att ge en så bra blandning som möjligt.

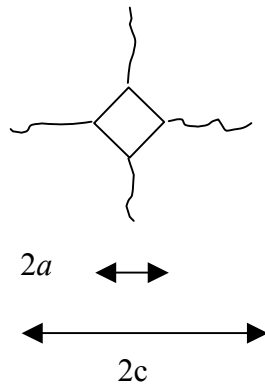
Tabell 1: Material tillverkade med SPS-teknik för mekanisk provning.

Provnr.	Material	Temp. [°C]	Tid [min]	Tryck [MPa]	Övrigt
1711	Al ₂ O ₃	1200	5	100	
1712	Al ₂ O ₃	1200	5	100	
1909	Al ₂ O ₃	1175	5	100	långsam avsvälning
1969	25 vol% SiC/Al ₂ O ₃	1450	5	90	
1971	25 vol% SiC/Al ₂ O ₃	1450	5	90	
1911	(Ti) _{0,05} (TiB ₂) _{0,95}	1500	5	75	
1728	(Ti) _{0,1} (TiB ₂) _{0,9}	1500	5	75	
1914	(Ti) _{0,8} (TiB ₂) _{0,2}	1200	20	30	

4. Indenteringsanalyser

Hårdhet, H

Hårdhetsanalys görs med hjälp av en indenter och en specificerad last. För hårda och spröda material används oftast en Vickers- eller Knoop-indenter, där skillnaden ligger i utseendet hos diamantspetsen. Hårdheten i materialet är sedan relaterat till den resulterande kontaktytan hos det kvarvarande intrycket. För dessa material har intrycken gjorts med en Vickersdiamant, -en pyramid med kvadratisk bas. Storleken på detta intryck kan mätas i ett ljusoptiskt mikroskop, se figur 1.



Figur 1: Definition av intrycket med dess sprickor efter Vickers indentering.

Hårdheten räknas ut med följande formel, där P är den pålagda lasten (i Newton) med vilken intrycket är gjort, a är medelvärdet av intryckets diagonaler.

$$H = \frac{P}{2a^2} \quad (1)$$

Då man mäter hårdhet med Vickers intryck med en last av 10 kg (98N) kan man beteckna hårdheten; HV₁₀ för att tydliggöra ursprunget.

Brottseghet, K_{IC}

Brottsegheten uttrycker hur lätt det är för en spricka att propagera genom ett material.

Det finns många olika metoder att mäta K_{IC} , det vanligaste är att man belastar ett stavformat prov tills det går sönder, man räknar sedan ut K_{IC} utifrån provgeometrin och den maximala lasten (dvs lasten då provet gick sönder). Man måste mäta på ett antal stavar för att få bra statistik. Dessa metoder är mycket materialkrävande och lämpar sig inte för material som fortfarande är på forskningsstadiet eftersom det ofta är svårt att tillverka stora mängder av dessa material. En indenteringsmetod lämpar sig därför bättre för denna studie då det går att göra en stor mängd intryck på samma provbit. Man bör dock hålla i minnet att böjmetoderna ger ett medelvärde för hela provet medan intrycksmetoderna ger punktvärden, man bör därför se till att man gör ett antal intryck spridda över hela provet. Man bör också tillägga att man generellt får högre K_{IC} -värden då man använder böjmetoderna än indenteringsmetoderna. De båda methodsorterna är av dessa skäl inte jämförbara. Indenteringsmetoder kan bara användas på hårda och spröda material, -det måste ju bildas sprickor som man kan mäta.

Sprickor introduceras i materialet med en Vickers- (eller Knoop) indentor, varefter spricklängderna mäts. K_{IC} beräknas med en formel given av Anstis m.fl. [3]:

$$K_{IC} = A \cdot \sqrt{\frac{E}{H}} \cdot \frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

A är en konstant för radiella sprickor från en Vickersindentor (0,016 har använts av Lawn m.fl. [4]), E är E-modulen, H är hårdheten, P är lasten ($P = 98\text{N}$) och c är spricklängden, enligt figur 1 ovan.

En noterbar svårighet med att mäta brottseghet på detta vis kan ligga i svårigheten att exakt definiera eller lokalisera sprickornas slut.

Tabell 2: Hårdhet och brottseghet uträknade med ekvation 1 och 2, med standardavvikelse.

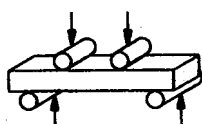
Provnr.	Material	Medel Hv [GPa]	Medel K_{IC} [MPa $m^{\frac{1}{2}}$]
1712	Al ₂ O ₃	22,1±1,7	3,1±0,2
1909	Al ₂ O ₃	24,9±0,5	4,1±0,1
1971	25 vol% SiC/Al ₂ O ₃	24,2±0,6	5,2±0,6
1911	(Ti) _{0,05} (TiB ₂) _{0,95}	26,1±8,6	4,5±0,5
1728	(Ti) _{0,1} (TiB ₂) _{0,9}	25,0±0,3	3,8±0,2
1914	(Ti) _{0,8} (TiB ₂) _{0,2}	5,5±0,1	-*
-	TiB ₂ kommersiell	18,6±1,0**	4,1±0,2**

*Då detta material inte gav några sprickor vid indenteringen kunde inget K_{IC} räknas ut på likvärdigt sätt.

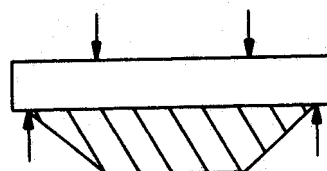
**Uppmätt på FOI.

5. Böjhållfasthet genom 4-punktböj

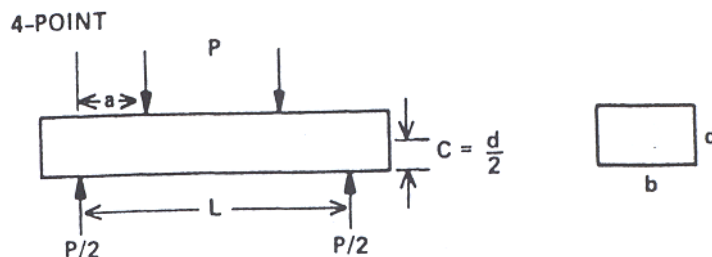
Böjstyrkan definieras som den maximala dragspänningen vid brott och refereras ofta till MOR (modulus of rupture) [5]. På grund av att böjtestning är relativt enkelt är det en vanlig testmetod för keramiska material, detta trots att det kan ligga svårigheter i att tolka resultaten. Problematiken ligger i den icke uniforma spänningsfördelningen över provet, speciellt vid ökande töjning och om viss plastisk töjning förekommer [2]. Det finns 3-punkt och 4-punktböjtest, och fördelen med 4-punktböj är att en jämnare spänningsfördelning är möjlig [2, 8], se figur 2, 3.



Figur 2: Uppställning för 4-punktböjtest, efter Richerson [5].



Figur 3: Spänningsfördelningen vid 4-punktböjtest, efter Richerson [5].



Figur 4: Definition av parametrar vid 4-punktböjtest, efter Richerson [5].

För böjtest har material skickats till Svenska Keraminstitutet (SCI) i Göteborg. Där har rektangulära provstavar tagits fram enligt EN 843-1:1995, dvs. $\geq 25 \text{ mm} \cdot 2,5 \pm 0,2 \text{ mm} \cdot 2,0 \pm 0,2 \text{ mm}$ (l, b, d). Böjprovstavarnas dragytor är således kapade, men inte polerade. En delstudie där kapad dragyta jämfördes med planslipad dito utfördes på provet ”kommersiell TiB_2 ”. Proven utsattes för 4-punktböj med en nermatningshastighet på 0,5 mm/min vilket ger brott inom 15-20 sek. Testupställningen har varit enligt figur 3 och tabell 3.

Tabell 3: Uppställningsparametrar.

Uppställning:	
Lastrullar P [mm]:	10
Stödrullar L [mm]:	20
a [mm]:	5

Resultat

Här summeras resultaten från böjhållfasthetsmätningarna, resultaten från individuella böjprovstavar finns i bilagan, tabell B1-B5.

Al_2O_3

Två av de tre Al_2O_3 -proverna användes för att mäta böjhållfastheten (de två med ”normal” avsvaingshastighet), prov 1711 gav 6 böjstavar och prov 1712 gav 4. Det första provet gav en större spridning av resultaten än det andra och de fick olika medelböjstyrka, se tabell 4.

Tabell 4: Resultat från böjhållfasthetsmätningarna av Al_2O_3 .

1711	Antal prov	6
	Medelböjstyrka [MPa]:	470,3
	Standardavvikelse [MPa]:	115,7
1712	Antal prov	4
	Medelböjstyrka [MPa]:	345,1
	Standardavvikelse [MPa]:	84,3
Medel båda proverna		420,3±
		118,3

Al₂O₃-SiC whiskers

Sammanlagt 11 böjstavar testades, 6 från prov 1969 och 5 från prov 1971. Det är en ganska stor spridning i resultaten, men medelböjstyrkan är jämförbar med litteraturvärden, detta redovisas ytterligare i diskussionsdelen.

Tabell 5: Resultat från böjhållfasthetsmätningarna av Al₂O₃-SiC whiskers.

1969 + 1971	Antal prov	11
	Medelböjstyrka [MPa]:	581,7
	Standardavvikelse [MPa]:	75,3

(Ti)_{0,05}(TiB₂)_{0,95}

För detta material testades 4 böjstavar från prov 1911, de gav relativt likvärda resultat med en liten spridning. Resultaten är sammanställda i tabell 6

Tabell 6: Resultat från böjhållfasthetsmätningarna av (Ti)_{0,05}(TiB₂)_{0,95}.

1911	Antal prov	4
	Medelböjstyrka [MPa]:	639,5
	Standardavvikelse [MPa]:	27,4

TiB₂, kommersiellt material

Detta material är referensmaterial till (Ti)_{0,05}(TiB₂)_{0,95}. Med detta material testades hur resultaten påverkas av dragytans ytstruktur, se tabell 8 för resultat. I tabell 7 redovisas medelböjstyrkan för båda stavsorterna, resultaten har en förhållandevis liten spridning. Jämförelsen mellan de olika provsorterna visar att ytstrukturen inte har så stor inverkan.

Tabell 7: Resultat från böjhållfasthetsmätningarna av kommersiell TiB₂, båda ytstruktursorterna.

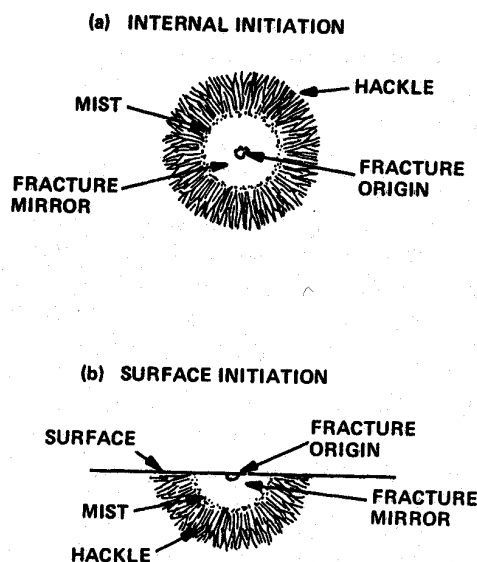
Antal prov	7
Medelböjstyrka [MPa]:	474,9
Standardavvikelse [MPa]:	41,8

Tabell 8: Jämförelse av böjhållfasthet mellan sågad och planslipad dragyta genom 4-punktböjtest för det kommersiella TiB₂-materialet.

Sågad dragyta		Planslipad dragyta	
Provstav	Böjstyrka [MPa]	Provstav	Böjstyrka [MPa]
Sa	464,0	PSd	519,5
Sb	499,6	PSe	521,2
Sc	475,6	PSf	415,4
-	-	PSg	429,3
Medelböjstyrka	480 ± 18	Medelböjstyrka	471 ± 57

6. Fraktografi

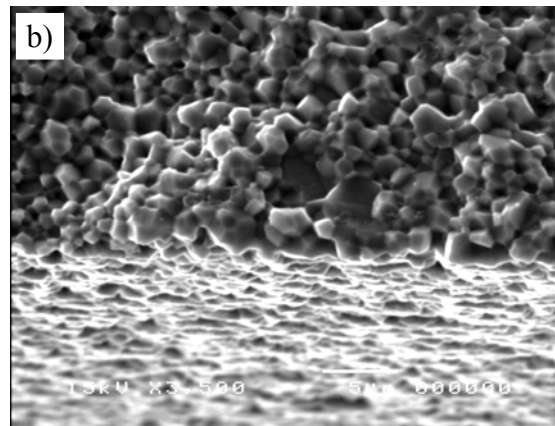
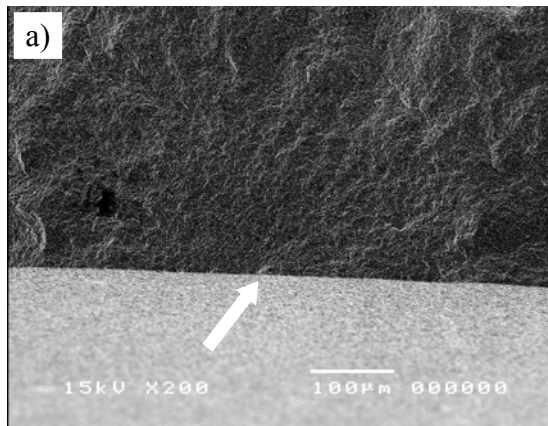
När man får en sprickinitiering vid en anvisning (fracture origin) startar sprickan i ett radiellt plan vilket kallas för brottspegel (fracture mirror). I detta plan accelererar sprickan till en kritisk hastighet då den avviker något från det ursprungliga sprickplanet. Detta resulterar i ett radiellt vågmönster som går från ett mindre vågmönster (mist) till ett större vågmönster (hackle) [5], se figur 5.



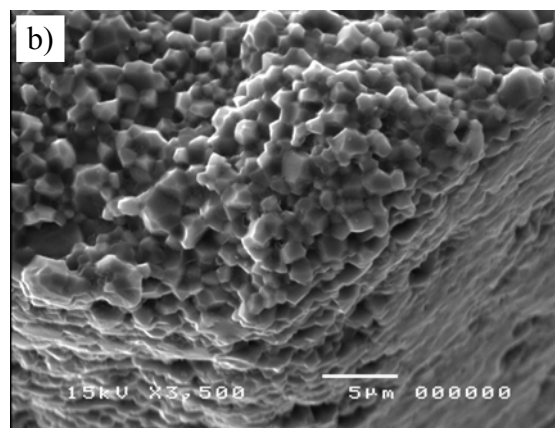
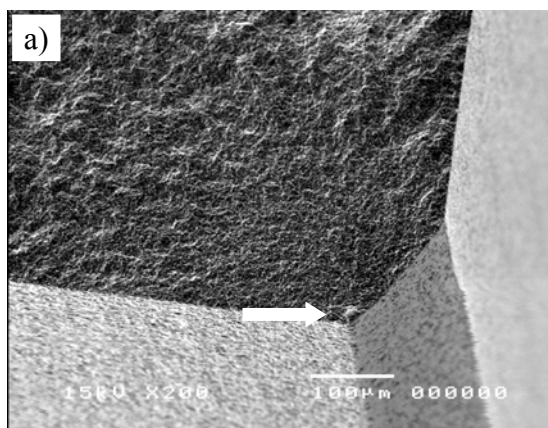
Figur 5: Sprickinitiering, brottspegel och vågmönster som uppstår vid interna eller ytliga sprickor i spröda keramer, efter Richerson [5].

Fraktografisk-undersökning har gjorts på de provstavar som har genomgått 4-punktböjtestet. Målet med den fraktografiska-undersökningen var att se var och möjligen varför brotten uppstått. Polering hade minskat inflytandet av anvisningar i ytan [5], där de flesta initieringarna nu har funnits. På eller i närheten av ytorna har vissa tendenser till större korn observerats. Samtliga bilder visar på en brottinitiering i ytan genom en brottspegel eller kvarvarande sprickor förutom för det kommersiella TiB_2 -materialet, figurer 18-19. Vissa resultat kan vara svåra att tyda då ingen hel brottyta har kunnat studeras.

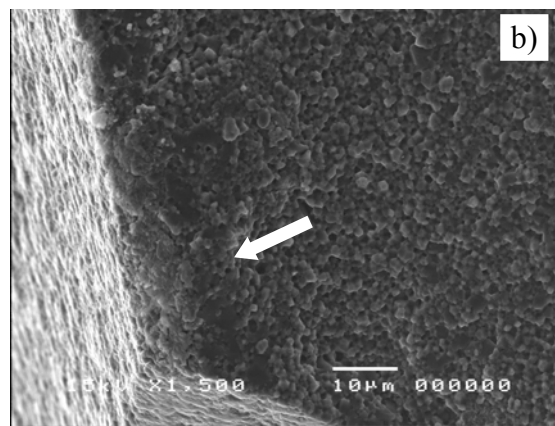
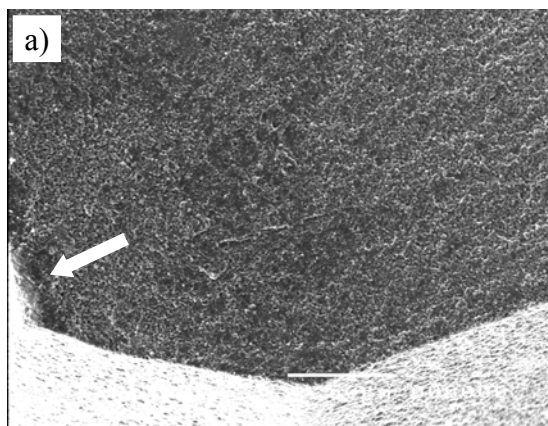
Provstavarna har tagits fram enligt EN 843-1:1995 utan en efterföljande polering av ytan.



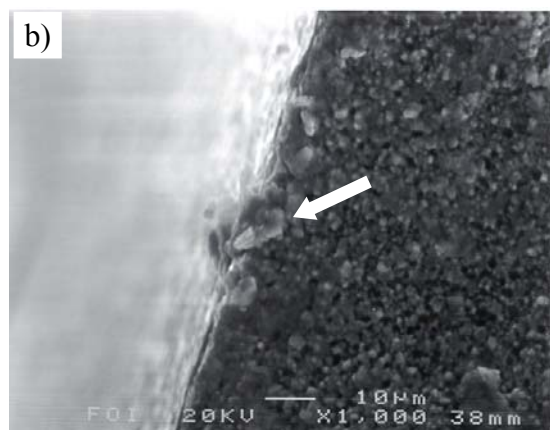
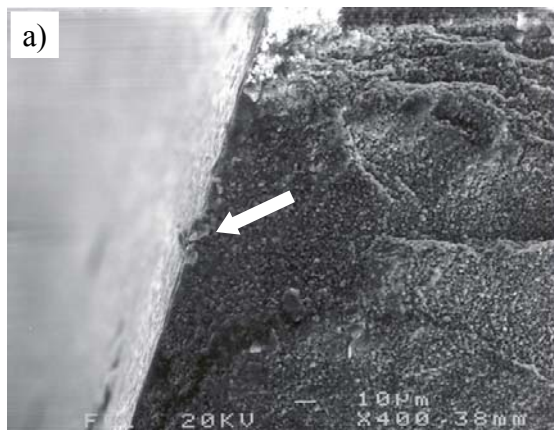
Figur 6: Al_2O_3 , 1711d. Agglomerat alternativt stort korn vid dragytan. (SCI)



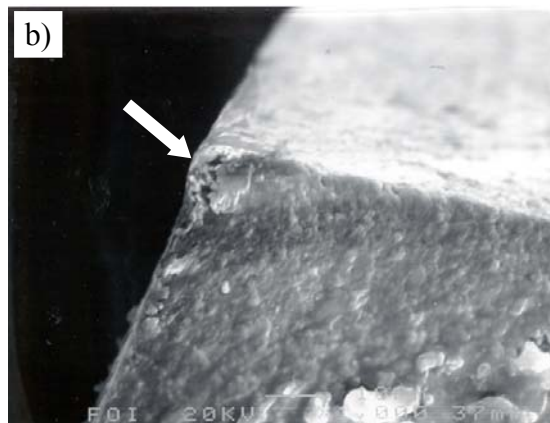
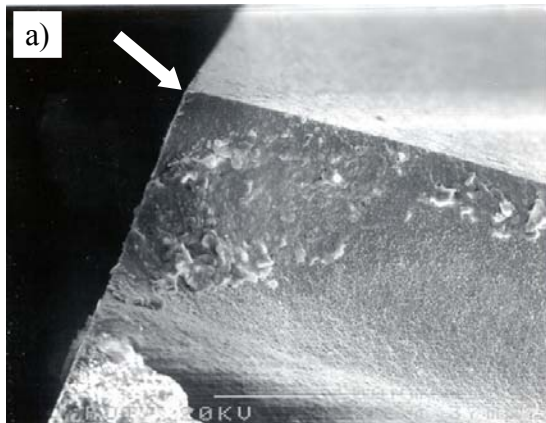
Figur 7: Al_2O_3 , 1711f. Agglomerat i hörn (intill kantbrytningen). (SCI)



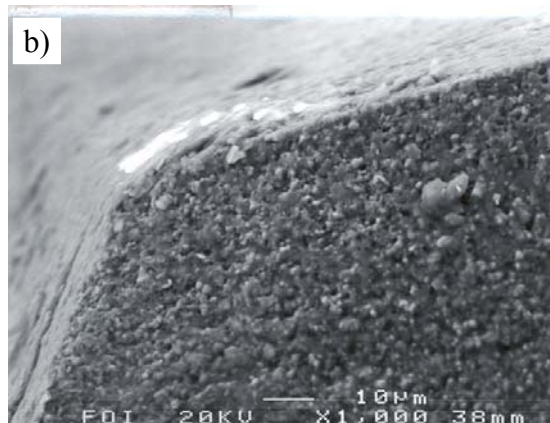
Figur 8: Al_2O_3 , 1712b. Område med "amorft" utseende i hörn. (SCI)



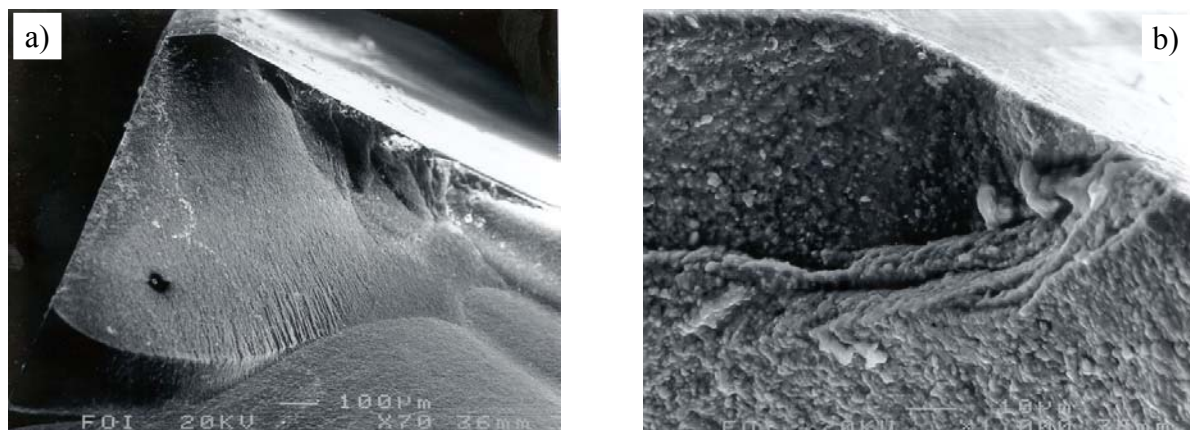
Figur 9: Al_2O_3 , 1711a. Anvisning i ytan med brottspegel. Tendens till större korn.



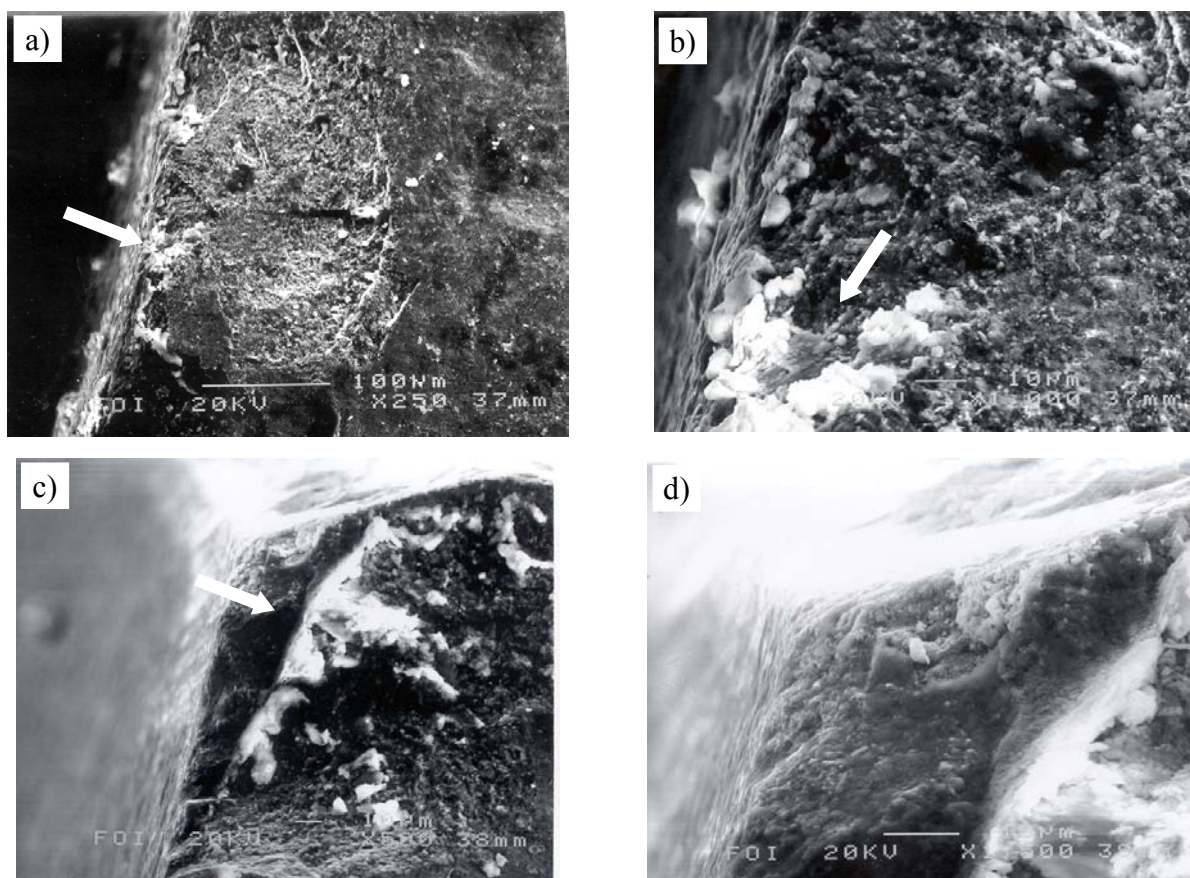
Figur 10: Al_2O_3 , 1711b. Brottanvisning i hörn. Korn i form av flaga.



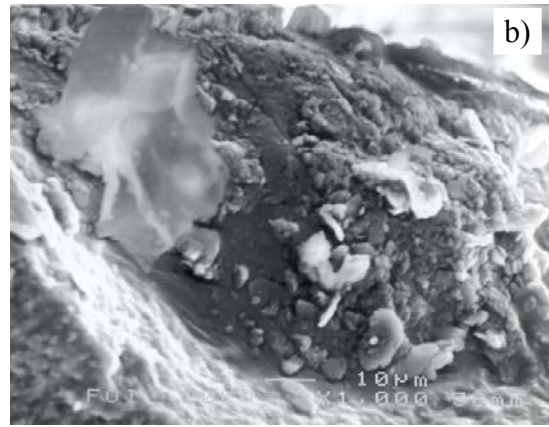
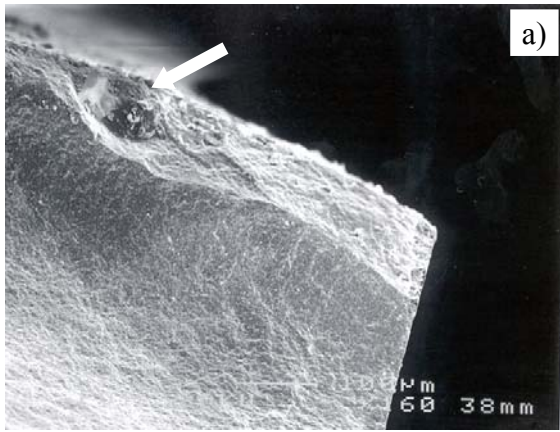
Figur 11: Al_2O_3 , 1712c. Stor brottspegel i anslutning till hörn. Ojämn yta nära brottinitieringen.



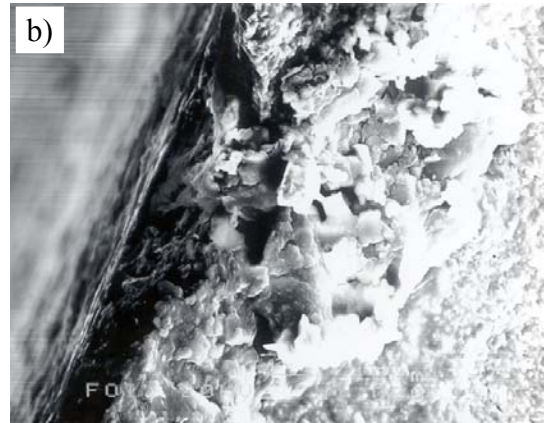
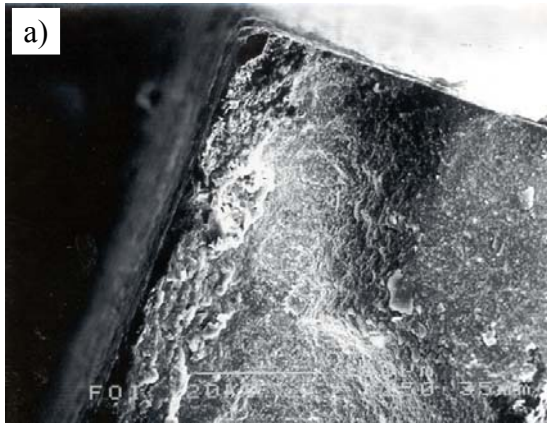
Figur 12: Al_2O_3 , 1712d. Stor brottspegel i anslutning till hörn. Tendens till agglomerat/stora korn.



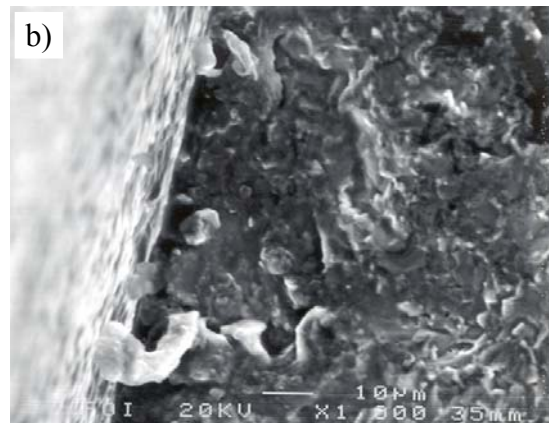
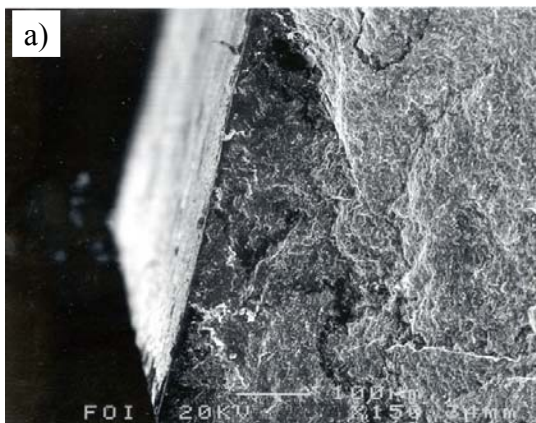
Figur 13: Al_2O_3 med SiC-whiskers, 1969a. Brottanvisning i ytan med brottspegel. Agglomerat av större korn. Även anvisning i hörn. Ingen tydlig orsak.



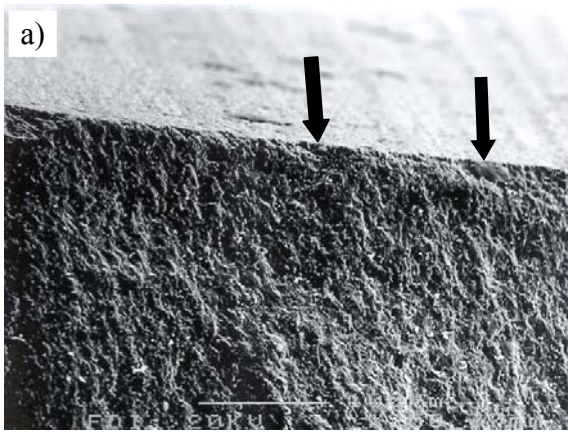
Figur 14: Al_2O_3 med SiC-whiskers, 1969d. Brottanvisning vid hörn med större flakformat korn.



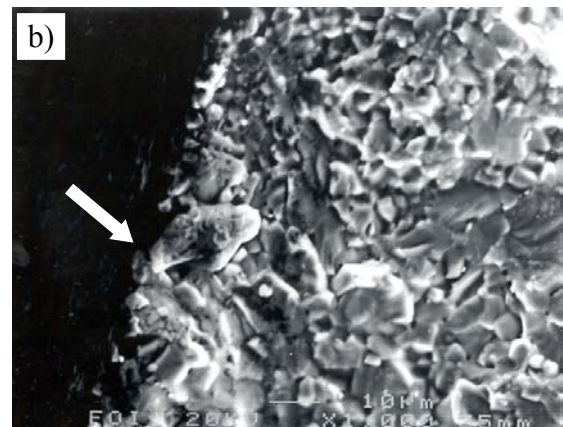
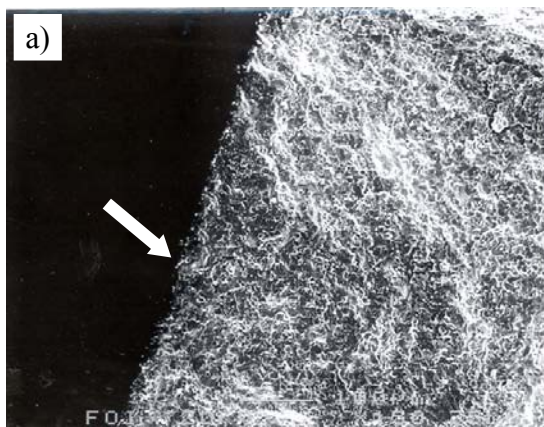
Figur 15: Al_2O_3 med SiC-whiskers, 1971b. Brottinitiering i ytan. Agglomerat av större korn.



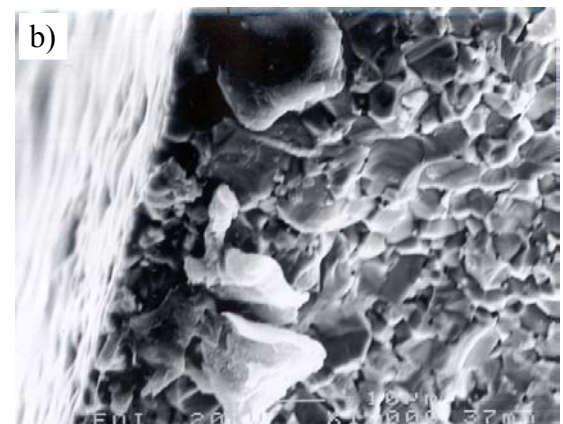
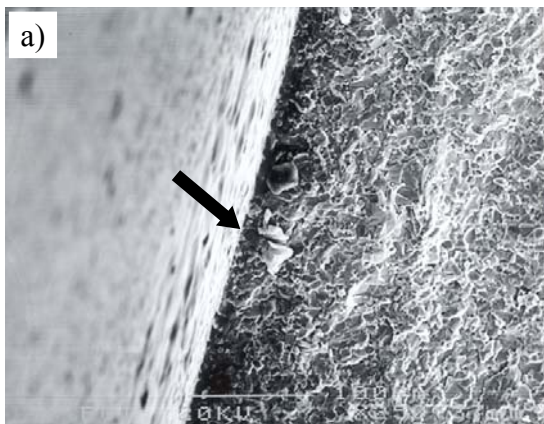
Figur 16: $(\text{TiB}_2)_{0,95}(\text{Ti})_{0,05}$, 1911a. Anvisning vid ytan med brottspegel. Vissa stora korn.



Figur 17: $(\text{TiB}_2)_{0,95}(\text{Ti})_{0,05}$, 1911c. Två närliggande anvisningar i ytan med mindre brottspegelar. Ett större flakformat korn i den högra anvisningen (figur 17b).



Figur 18: TiB_2 kommersiellt material, sågad yta, Sb. Trolig brottinitiering vid ytan. Enstaka större korn.



Figur 19: TiB_2 kommersiellt material, planslipad yta, PSf. Trolig brottinitiering vid ytan. Enstaka större korn.

7. Diskussion

Det är svårt att jämföra värden för brottseghet när man inte känner till vilken metod som har använts för bestämningen, som nämndes tidigare så får man högre värden vid böjmetoder än med indenteringsmetoder. Då vi inte vet vilken metod som har använts för att få fram vissa K_{IC} -värden för kommersiella material (markerade med * i tabellen ovan) så är det inte heller möjligt att jämföra dem med mätvärden för SPS-tillverkade material, dock kan storleksordningen relateras.

Tabell 9: Jämförelse mellan SPS-tillverkade och kommersiella material.

Material	HV (GPa)	K_{IC} (MPa $m^{1/2}$)	Böjstyrka (MPa)	Ref.
Al ₂ O ₃ (SPS)	22-25	3-4	420	
Al ₂ O ₃ (kommersiell)	17,7	4,5*	350	[6]
25 vol% SiC _w / Al ₂ O ₃ (SPS)	24	5	580	
30 vol% SiC _w / Al ₂ O ₃ (kommersiell)	-	5-7,7	550-600	[7,8]
(Ti) _{0.05} (TiB ₂) _{0.95} (SPS)	26	4,5	640	
(Ti) _{0.1} (TiB ₂) _{0.9} (SPS)	25	4	-	
TiB ₂ kommersiell	18,5	4	475	
TiB ₂ kommersiell (CSI)	22	5*	600	[6]

*Okänd mätmetod, alla övriga är uppmätta med indenteringsmetod.

Den SPS-tillverkade aluminiumoxiden har lite högre hårdhets- och böjhållfasthetsvärden än den kommersiella.

Den SPS-tillverkade SiC_w / Al₂O₃ kompositen har liknande mekaniska egenskaper som kommersiella kompositer. SiC whisker-förstärkt Al₂O₃ förbättrar de mekaniska egenskaperna jämfört med ren Al₂O₃ vilket ju är idén med att tillsätta en förstärkningsfas.

Anledningen till att (Ti)_{0.05}(TiB₂)_{0.95} kompositen tillverkades var att det var svårt att få enfasig TiB₂ fulltät även med SPS-tekniken, men små tillsatser av titan gör att det är lättare att sintra materialet. I jämförelse med kommersiell TiB₂ så har det nya materialet goda mekaniska egenskaper, både hårdheten och böjhållfastheten har ökat markant. Även (Ti)_{0.1}(TiB₂)_{0.9} visar sig ha mycket bra mekaniska egenskaper.

8. Summering

Resultaten från hårdhets-, brottseghets- och böjhållfasthetstesterna visar att SPS-tekniken ger pålitliga material som har jämförbara värden med kommersiella motsvarigheter. (Ti)_{0.05}(TiB₂)_{0.95} och (Ti)_{0.1}(TiB₂)_{0.9} ger lika bra, för att inte säga bättre, mekaniska egenskaper som kommersiella enfasiga TiB₂. Det är mycket lättare att tillverka fulltät TiB₂-material då man kan blanda i några procent titan än det är att tillverka fulltät enfasiga TiB₂.

Relativt stor spridning på böjhållfasthetsproven har erhållits på grund av ytans inverkan i resultaten vilken bekräftats genom fraktografisk-undersökning.

9. Referenser

- [1] A. Pettersson, M. Oskarsson och J. Petersson, "Gradient- och matrismaterial - en litteraturstudie", Totalförsvarets Forskningsinstitut, Stockholm, FOI-R--0128--SE, juni 2001.
- [2] J. B. Wachtman, Mechanical Properties of Ceramics, *upplaga 1. New York: Wiley-Interscience Publication, Jon Wiley & Sons, Inc., 1996.*
- [3] G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn och D. B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements", *Journal of the American Ceramic Society*, **64**, 533-538, 1981.
- [4] B. R. Lawn, A. G. Evans och D. B. Marshall, "Elastic / Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median / Radial Crack System", *Journal of the American Ceramic Society*, **63**, 574-581, 1980.
- [5] D. W. Richerson, "Modern Ceramic Engineering, properties, processing and use in design", *upplaga 2. New York: Marcel Dekker Inc., 1992.*
- [6] "Några vanliga konstruktionskeramers mekaniska och fysikaliska egenskaper i jämförelse med hårdmetall och stål". Göteborg: Svenska Keraminstitutet, 2000.
- [7] M. I. K. Collin och D. J. Rowcliffe, "Influence of Thermal Conductivity and Fracture Toughness on the Thermal Shock Resistance of Alumina Silicon Carbide Whisker Composites", *Journal of the American Ceramic Society*, **84** [6], 1334-40, (2001).
- [8] K. Xia och T. G. Langdon, "Review: The toughening and strengthening of ceramic materials through discontinuous reinforcement", *Journal of Materials Science*, **29** 5219-5231, (1994).

Bilaga

Tabell B1: Utvärdering av böjhållfasthet genom 4-punktböjtest från Svenska Keram institutet för Al_2O_3 .

Prov	Bredd b [mm]	Höjd d [mm]	Brottlast [N]	Böjstyrka [MPa]
1711a	2,58	2,21	484,60	576,9
1711b	2,58	2,21	361,43	430,2
1711c	2,58	2,63	350,48	293,7
1711d	2,58	2,24	533,51	618,2
1711e	2,58	2,27	930,15	440,2
1711f	2,58	2,30	420,82	462,5

Tabell B2: Utvärdering av böjhållfasthet genom 4-punktböjtest från Svenska Keram institutet för Al_2O_3 .

Prov	Bredd b [mm]	Höjd d [mm]	Brottlast [N]	Böjstyrka [MPa]
1712a	2,59	2,32	206,88	222,6
1712b	2,59	2,24	311,05	359,0
1712c	2,60	2,32	363,14	389,2
1712d	2,58	2,17	331,74	409,6

Tabell B3: Utvärdering av böjhållfasthet genom 4-punktböjtest från Svenska Keram institutet för Al_2O_3 -SiC whiskers.

Prov	Bredd b [mm]	Höjd d [mm]	Brottlast [N]	Böjstyrka [MPa]
1969a	2,50	2,27	488,72	569,1
1969b	2,50	2,18	488,97	617,3
1969c	2,51	2,28	401,59	461,7
1969d	2,50	2,28	532,78	614,9
1969e	2,52	2,13	401,35	526,6
1969e	2,49	2,21	448,32	553,0
1971a	2,47	2,29	587,05	679,8
1971b	2,29	2,28	510,14	642,8
1971c	2,33	2,18	336,60	456,0
1971d	2,42	2,28	526,21	627,4
1971e	2,38	2,35	569,77	650,3

Tabell B4: Utvärdering av böjhållfasthet genom 4-punktböjtest från Svenska Keram institutet för $(\text{Ti})_{0,05}(\text{TiB}_2)_{0,95}$.

Prov	Bredd b [mm]	Höjd d [mm]	Brottlast [N]	Böjstyrka [MPa]
1911a	2,59	2,17	552,73	679,8
1911b	2,57	2,24	531,80	618,6
1911c	2,56	2,27	555,66	631,8
1911d	2,58	2,28	561,26	627,7

Tabell B5: Utvärdering av böjhållfasthet genom 4-punktböjtest från Svenska Keraminstitutet för TiB₂, kommersiellt material.

Prov	Bredd b [mm]	Höjd d [mm]	Brottlast [N]	Böjstyrka [MPa]	Övrigt
Sa	2,61	2,35	445,8	464,0	Sågad
Sb	2,60	2,49	536,9	499,6	Sågad
Sc	2,61	2,29	433,9	475,6	Sågad
PSd	2,60	2,11	400,8	519,5	Planslipad
PSe	2,60	2,08	390,8	521,2	Planslipad
PSf	2,34	2,09	283,0	415,4	Planslipad
PSg	2,21	2,10	278,9	429,3	Planslipad