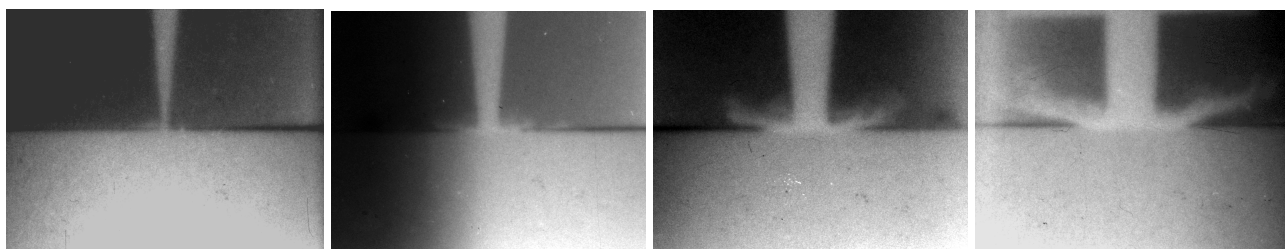


Patrik Lundberg, René Renström

Inverkan av projektilspetsen på möjligheten att erhålla "interface defeat" med kerampansar



Patrik Lundberg, René Renström

Inverkan av projektilspetsen på möjligheten att erhålla "interface defeat" med kerampansar

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0141--SE	Klassificering Vetenskaplig rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år Juni 2001	Projektnummer E 2008, E 2022
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Patrik Lundberg René Renström	Projektledare Lars Holmberg, Ewa Lidén	
	Godkänd av 	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Patrik Lundberg	
Rapportens titel Inverkan av projektilspetsen på möjligheten att erhålla "interface defeat" med kerampansar		
Sammanfattning (högst 200 ord) I denna rapport redovisas en modell för bestämning av hur en projektils nosform påverkar möjligheterna att erhålla "interface defeat". Med "interface defeat" menas att skyddet har sådana egenskaper att en projektil inte nämnvärt penetrerar målmaterialet utan istället flyter ut på dess yta. Modellen visar att skyddsförmågan hos skydd baserade på "interface defeat" starkt påverkas av projektilens nosform. Trots att konsumtionen av nosen kan vara kortvarig kan denna nedsätta skyddets prestanda avsevärt om projektilen tillåts träffa kerammaterialet direkt. För att erhålla högsta möjliga skyddsförmåga bör nosdelen först eroderas bort innan "interface defeat" utnyttjas. För finkalibertillämpningar ligger än så länge projektilhastigheterna vanligtvis under den kritiska hastigheten även för spetsiga projektiler, varför keramen i denna tillämpning kan utgöra den yttre komponenten i skyddet.		
Nyckelord Projektil, nosform, tungmetall, hårdmetall, kerammål, "interface defeat", penetration, transitions hastighet		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 15 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--0141--SE	Report type Scientific report
	Research area code 5. Combat	
	Month year June 2001	Project no. E 2008, E 2022
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Patrik Lundberg René Renström	Project manager Lars Holmberg, Ewa Lidén	
	Approved by 	
	Scientifically and technically responsible Patrik Lundberg	
Report title (In translation) Influence of the projectile nose shape on the possibility of obtaining interface defeat in ceramic armour		
Abstract (not more than 200 words) A model for determining the influence of the projectile nose shape on the possibility of obtaining interface defeat in ceramic armours has been suggested. Interface defeat means that the projectile material is forced to flow radially outwards on the surface of the ceramic material without penetrating significantly. The model indicates that the nose shape of the projectile strongly influences the protection capability of this type of armour. Despite the short duration of the interaction, this could significantly lower the protection capability if the projectile is allowed to hit the ceramic layer directly. Therefore, to get the best protection capability out of the ceramic armour, the projectile nose should be eroded before interface defeat is established. In small arms applications, the projectile velocity is usually lower than the critical velocity even for projectiles with sharp nose designs. In this cases the ceramic tile can be mounted as an outside armour component.		
Keywords projectile, nose shape, tungsten, tungsten carbide, ceramic target, "interface defeat", penetration, transition velocity		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 15 p.	
Price acc. to pricelist Security classification		

Inledning

Behovet av stridsfordon med större rörlighet, mer eldkraft och samtidigt förbättrat ballistiskt skydd ökar i takt med att försvaret får förändrade uppgifter. Rörligare förband innebär t.ex. att fordon ska kunna transporteras snabbt inom vårt territorium och ändå kunna ställas mot en tungt beväpnad angripare. Vidare kräver ett deltagande i internationella operationer av såväl fredsbevarande som fredsframtvingande natur, förutom möjligheter till långväga transporter, att riskerna för den egna personalen minimeras.

När det gäller utvecklingen av ballistiska skydd ska kraven på ett lättare och mindre fordon samsas med en ökad skyddsförmåga inte bara frontalt som tidigare utan nu även i alla övriga riktningar. Detta innebär att större ytor än tidigare behöver hög skyddsnivå vilket ytterligare driver upp kravet på såväl volyms- som viktseffektivitet hos skydden. Det är inte troligt att ett skyddskoncept ensamt kommer att klara dessa krav utan flera olika skyddsprinciper (såväl aktiva som passiva) behöver användas.

Ett passivt skyddskoncept, som framförallt studeras i USA för eventuellt utnyttjande i nästa generation stridsfordon, bygger på så kallad "interface defeat" eller "dwell" (fritt översatt till "stela vägen" på svenska).

Med "interface defeat" menas att skyddet har sådana egenskaper att en projektil inte nämnvärt penetrerar målmaterialet utan istället flyter ut på dess yta (likt en vattenstråle som spolas mot en vägg). "Interface defeat" är i sig inget nytt (jämför finkalibrig blyprojektil mot pansarstål), men det som gjort att frågan aktualiserats är att vissa höghållfasta målmaterial (företrädesvis keramiska) kan ge "interface defeat" även mot tyngre hot. Fenomenet har observerats vid anslagshastigheter upp mot 2000 m/s för projektiler av tungmetall.

De flesta teoretiska och experimentella studier av "interface defeat" har gjorts med långa slanka cylindriska projektiler av tungmetall motsvarande stora KE-projektiler för bekämpning av väl skyddade plattformar som tunga stridsfordon. Skyddsprincipen är dock intressant även för skydd mot fin- och mellankaliber projektiler. Redovisade experiment har genomförts i modellskala med stiliserade projektiler [1-4]. De skyddskonstruktioner som använts har alltid haft en stark fördämning kring det keramiska materialet. Fördämningen, antingen påkrympt eller hetisostatpressad, har bl.a. haft till uppgift att ta hand om den initialt uppkomna anslagsstöten, påbörja erosionen av projektilen samt undertrycka målmaterialets fragmentering.

På FOI har flera olika studier av "interface defeat" genomförts. Bland annat har den så kallade transitionskastigheten bestämts för ett antal olika keramiska mål [4]. Med transitionskastighet menas den hastighet vid vilken man får omslag från "interface defeat" till penetration. Vidare har en modell utvecklats med vilken transitionskastigheten kan uppskattas utifrån projektil- och målmateriadata [4]. Vi har också studerat möjligheterna att upprätthålla "interface defeat" över tider så långa som flera hundra mikrosekunder [5].

En aspekt som inte redovisats i någon studie är hur andra projektilformer än den cylindriska inverkar på transitionskastigheten. I såväl fin- som mellankalibersammanhang har man vanligtvis inte någon speciell skyddsanordning (fördämning) framför målmaterialet utan låter projektilen träffa direkt. Det finns sannolikt skyddsmaterial för vilka behovet av dämpande komponenter framför är ringa eller obefintligt även om det är en fullstor KE-projektil som träffar. I frånvaron av sådana är det en spetsig kon (projektilspetsen) som först träffar keramytan, och det kommer att vara konsumtionen av denna som genererar de initiala kontaktkrafterna.

I denna rapport redovisas en modell för bestämning av hur projektilens nosform påverkar transitions hastigheten för en given kombination av projektil- och målmaterial.

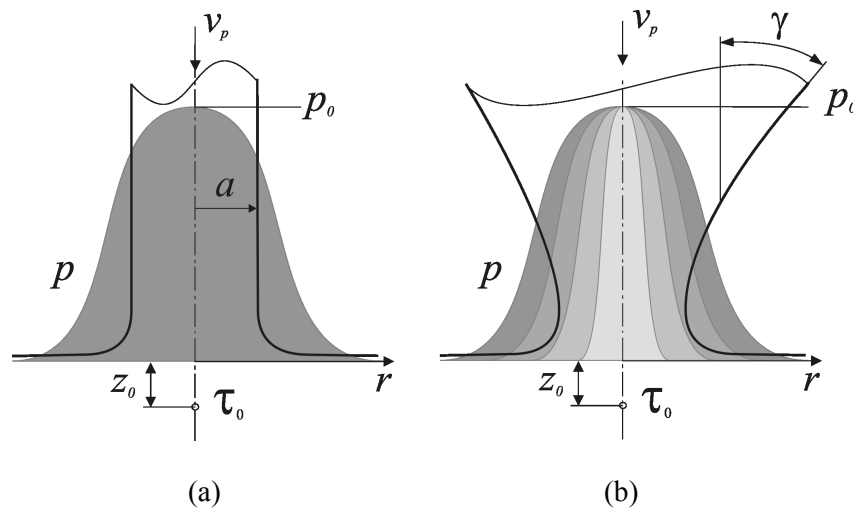
Utifrån modellen redovisas också exempel där nosformens inverkan på transitions hastigheten för kiselkarbid uppskattats för två olika projektilmaterial, nämligen tungmetall respektive hårdmetall.

Tungmetallprojektiler är representativa för mellan- och grovkalibriga KE-projektillämpningar medan hårdmetallprojektiler används i många fin- och mellankalibertillämpningar och anses som ett allvarligt hot mot flertalet lätta stridsfordon.

Modell

Kontakttrycket på målmaterialets yta

En lång projektil med hastigheten v_p och nosvinkeln γ (vinkeln $\gamma = 0$ motsvarar cylinderinströmning) strömmar in vinkelrätt mot en stel friktionsfri målyta med enligt Figur 1. Projektilmaterialet antas vara elastiskt idealplastiskt med bulkmodulen K_p , flytspänningen σ_p och densiteten ρ_p .



Figur 1 (a) Cylinder- och (b) konisk inströmning.

Inströmningen ger upphov till kontakttrycket p på målets yta och speciellt trycket p_0 på symmetriaxeln. I modellen bortses från eventuell anslagsstöt och vi antar att den radiella utströmningen sker momentant då projektilen träffar. Inte heller inflytandet av att lasten expanderar radiellt modelleras.

För fallet med en cylindrisk projektil ($\gamma = 0$) och en stel, friktionsfri yta $z = 0$, se Figur 1(a), har det i [4] visats att kontakttrycket på symmetriaxeln kan uttryckas som

$$p_0 = q_p (1 + \phi + \psi) \quad (1)$$

där

$$q_p = \frac{\rho_p v_p^2}{2}. \quad (2)$$

Funktionerna ϕ och ψ representerar i huvudsak ”elastiska” respektive ”plastiska” effekter och antas bero endast av de dimensionslösa storheterna

$$\alpha = \frac{K_p}{q_p}, \quad \beta = \frac{\sigma_{yp}}{q_p}. \quad (3)$$

Då den inströmmande projektilen är konisk, antas att uttrycket ovan kan skrivas som

$$p_0 = q_p (1 + f)(1 + \phi + \psi) \quad (4)$$

där f representerar inverkan av projektilens nosform. Vidare antas att funktionen f endast beror av konvinkeln γ .

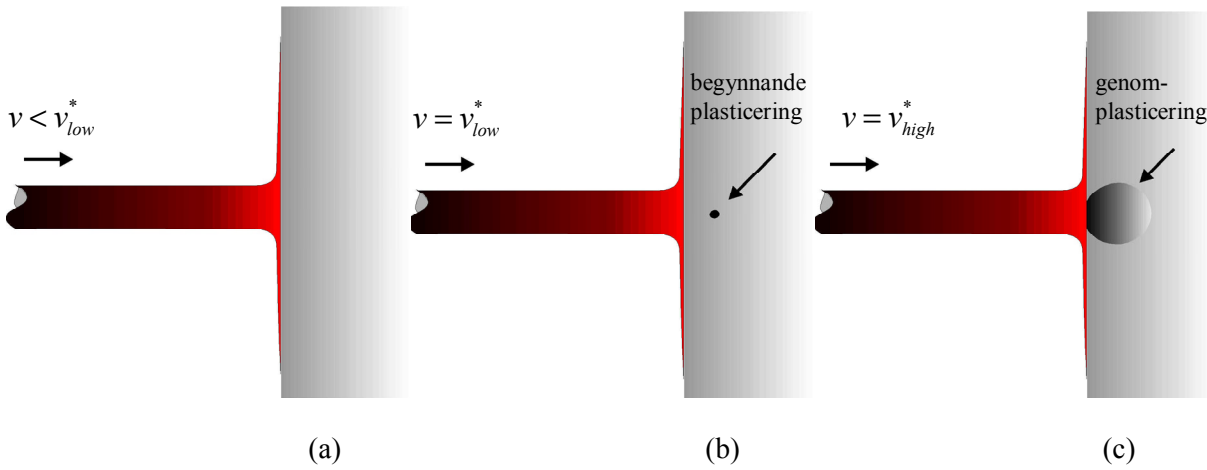
Funktionerna $f(\gamma)$, $\phi(\alpha)$ och $\psi(\beta)$ bestäms numeriskt utifrån kontinuumdynamiska simuleringar, varvid det föreskrivs att $f(0) = 0$, $\phi(\infty) = 0$ och $\psi(0) = 0$.

Skjuvspänningstillståndet i målet

För ett elastiskt målmateriel med skjuvhållfastheten τ_y kommer vid successivt ökande projektilhastighet den maximala skjuvspänningen τ_0 att öka pga ökande kontakttryck. Vid någon projektilhastighet uppnås målmaterialets skjuvhållfasthet τ_y , varvid ”plasticering” i en punkt på avståndet z_0 från ytan initieras.

För ett målmateriel med möjlighet att ”plasticera” kommer ytterligare ökad projektilhastighet innebära att det plasticerade området växer tills genomplasticering sker (området når målmaterialets yta).

Den hastighet vid vilken plasticering enligt ovan initieras, antas vara den lägsta hastighet v_{low}^* vid vilken omslag från ”interface defeat” till penetration kan ske. Den hastighet vid vilken genomplasticering sker antas på motsvarande sätt vara den högsta möjliga hastighet v_{high}^* för vilken ”interface defeat” kan upprätthållas. Förloppet illustreras schematiskt i Figur 2(a)-(c).



Figur 2 Inströmning med hastighet (a) lägre än lägsta transitions hastigheten v_{low}^* , (b) lika med lägsta transitions hastigheten v_{low}^* och (c) lika med högsta transitions hastigheten v_{high}^* . Observera att formen på det plasticerade området är schematisk.

Relationen mellan kontakttryck på symmetriaxeln p_0 och maximal skjuvspänning τ_0 för ett elastiskt målmaterial med Poissons tal ν har bestämts numeriskt med hjälp av en punktlastmodell enligt Boussinesq [6] utifrån de numeriskt beräknade tryckfördelningarna. På så sätt erhöles ett samband

$$p_0 = c \tau_0 \quad (5)$$

där proportionalitetsfaktorn c antas bero av nosvinkeln γ och Poissons tal ν . Genom att sätta maximala skjuvspänningen lika med målmateriallets skjuvhållfasthet erhåller man

$$p_0^{low} = c \tau_y, \quad (6)$$

där p_0^{low} är kontakttrycket på symmetriaxeln vid den lägsta transitions hastigheten v_{low}^* .

För den högsta transitions hastigheten har en modell för hur en stel cylinder trycks in i ett stelt idealplastiskt underlag använts [7-10] för uppskattning av förhållandet mellan kontakttrycket på symmetriaxeln p_0 och målmateriallets skjuvhållfasthet τ_y . Denna modell ger relationen

$$p_0^{high} = 5.70 \tau_y. \quad (7)$$

Sambanden (6) och (7) ger ett transitionsintervall

$$\frac{c \sigma_y}{2} \leq p_0^* \leq 2.85 \sigma_y \quad (8)$$

för det kritiska kontakttrycket på symmetriaxeln, där $\sigma_y = 2 \tau_y$ är målmateriallets flytspänning vid enaxlig spänning enligt Tresca. Eftersom ekvationerna (2)-(4) ger ett samband mellan kontakttrycket på symmetriaxeln p_0 och projektilens inströmnings hastighet v_p kan ett motsvarande intervall för transitions hastigheten v_p^* bestämmas.

Kontinuumdynamiska simuleringar

Simuleringsprogramet Autodyn [11,12] användes för beräkning av amplitud och radiell fördelning av kontakttrycket. Autodyn är en kopplad (Euler-Lagrange, ALE) finit-differenskod för lösning av kontinuumdynamiska problem. Simuleringarna var här rena tvådimensionella Euler-simuleringar med cylindersymmetri. Projektilmaterialet modellerades som elastiskt, idealplastiskt följande von Mises flytkriterium och associerade flytlag samt med en linjär tillståndsekvation. Använda data redovisas i Tabell 1. Observera att för cylinderinströmning ($\gamma=0$) har fyra kombinationer av bulkmodul och flytspänning simulerats för varje anslagshastighet (285,1), (285, 0.001), (28500, 1) (28500, 0.001).

Tabell 1 Data för projektilmaterialet.

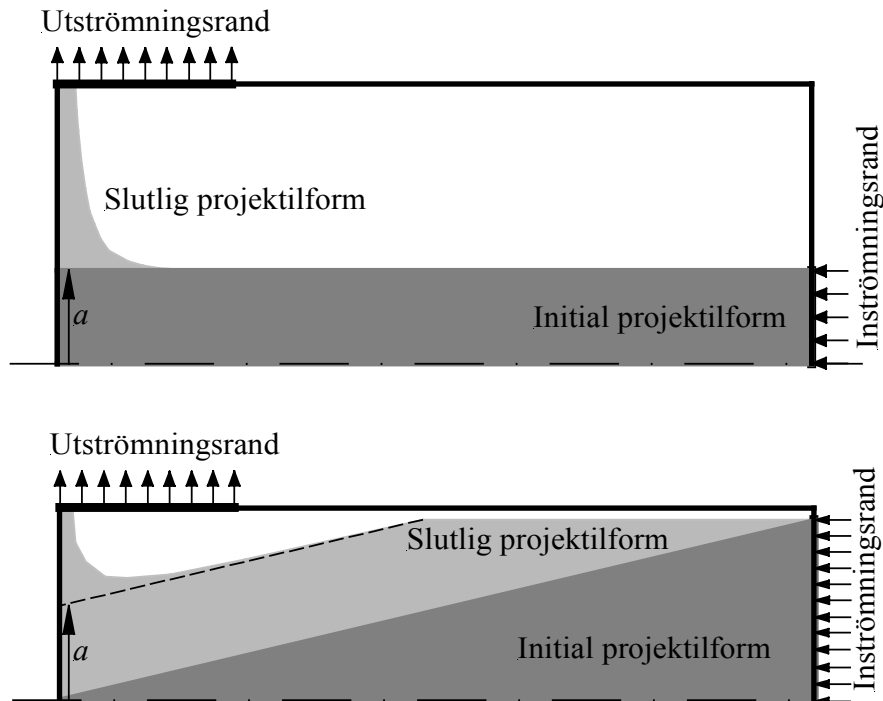
Nosvinkel γ	Projektilhastighet v_p (m/s)	Projektildensitet ρ_p (kg/m ³)	Bulkmodul K_p (GPa)	Flytspänning σ_p (GPa)
0°	1000	17600	285, 28500	1, 0.001
	1500	17600	285, 28500	1, 0.001
	2000	17600	285, 28500	1, 0.001
	2500	17600	285, 28500	1, 0.001
	3000	17600	285, 28500	1, 0.001
5°	1000	17600	285	1
	1500	17600	285	1
	2000	17600	285	1
15°	1000	17600	285	1
	1500	17600	285	1
	2000	17600	285	1
30°	1000	17600	285	1
	1500	17600	285	1
	2000	17600	285	1
45°	1000	17600	285	1
	1500	17600	285	1
	2000	17600	285	1

Kontaktytan mellan projektil och mål modellerades som en stel friktionsfri rand. Randvillkor för in- och utflöde av projektilmaterial användes för att modellera en oändligt lång projektil och för att låta projektilmaterialet lämna nätet. Projektilmaterialet strömmade in i nätet med en konstant hastighet v_p och densitet ρ_p .

Två olika nät användes. För cylinderinströmning utnyttjades ett nät bestående av 9600 rektangulära zoner, 160 i axiell och 60 i radiell riktning. Sidlängden på den första zonen, kvadratisk och placerad i stagnationspunkten, var ca 1/200 projektilradie. Storleken ökade därifrån geometriskt med 2.2% per zon i axiell och 6.3% per zon i radiell riktning. Vid simuleringens början bestod projektilen av 43 zoner radiellt. Nätets totala storlek var 8 x 3 projektilradier.

För simuleringarna med konisk projektil användes ett nät bestående av 101 element i radiell riktning. Antalet zoner i axiell riktning anpassades för varje nosvinkel så att zonstorlekarna förblev desamma mellan näten. Sidlängden på den första zonen, kvadratisk och placerad i stagnationspunkten, var densamma som ovan, men storleksökningen var här mycket långsammare än för fallet med cylinderinströmning, 0.54% per zon i axiell och 2.38% per zon i radiell riktning. Figur 3 visar nätens begränsningar samt de delar av ränderna där in- och utströmning sker.

Beroende på fall kördes problemen olika länge. För cylindriska projektiler, $\gamma = 0$, söktes den stationära lösningen, vilket för vissa kombinationer av materialdata resulterade i långa simuleringstider. För simuleringarna av konisk projektil avbröts körningen då projektillängden $a/\tan \gamma$ strömmat in. Projektilens radie på den stela randen (i det odeformerade fallet) var då densamma som i det cylindriska fallet, dvs a , se Figur 3.



Figur 3 Eulernätens utformning för simulering av en cylinder respektive kon.

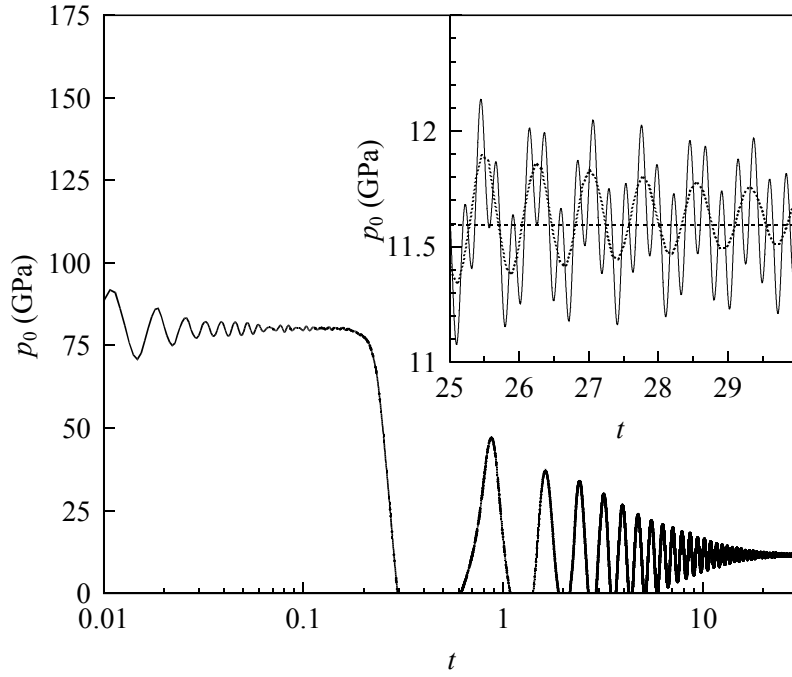
För utvärdering av kontakttrycket p loggades detta i ett antal punkter under beräkningens gång. Dessa var placerade längs den stela randytan ($z = 0$) med start på symmetriaxeln ($r = 0, z = 0$) och med inbördes avstånd $a/10$.

Eftersom kontakttrycket i vissa av simuleringarna fortfarande svängde, trots många beräkningscykler, skattades det troligaste steady-state värdet i dessa fall. Två olika utvärderingsmetoder utnyttjades:

- (i) Medelvärde över ett antal svängningar beräknades efter det att man nått så bra steady-state-förhållanden som möjligt.
- (ii) En dämpad sinusfunktion

$$p = p_0 + ae^{-\frac{t}{d}} \sin\left(\frac{2\pi t}{b} + c\right)$$

anpassades till data (enligt minsta kvadratanpassning) så att ett värde för kontakttrycket p_0 kunde bestämmas. Detta provades för olika delar av insvängningsförloppet med gott resultat. Figur 4 visar hur ett insvängningsförlopp kan se ut.



Figur 4 Typiskt insvängningsförlopp för kontaktrycket p_0 då projektilen är cylindrisk. Det mindre diagrammet visar svängningarnas utseende mellan tiderna 25 och 30 tidsenheter. Kontaktrycket utvärderat dels som tidsmedelvärdet över ett antal perioder ($p_0 = 11.59$ GPa, streckad linje) dels utifrån en anpassning av en dämpad sinusvängning över hela simuleringstiden ($p_0 = 11.60$ GPa prickad kurva).

Bestämning av $\phi(\alpha)$, $\psi(\beta)$, $f(\gamma)$ och $c(\gamma, \nu)$

Inverkan av projektilmaterialets kompressibilitet $\phi(\alpha)$ och hållfasthet $\psi(\beta)$ bestämdes approximativt utifrån simuleringarna med cylinderinströmning $\gamma = 0$. Först undertrycktes inverkan av hållfasthet genom att låta projektilmaterialets flytspänning i simuleringarna vara liten, 1/1000 av den normala, se tabell 1. Därigenom kunde funktionen $\phi(\alpha)$ bestämmas approximativt genom att anpassa ett lämpligt polynom till funktionsdata. Därefter undertrycktes på samma sätt inverkan av kompressibiliteten genom att låta projektilmaterialets bulkmodul i simuleringarna vara 100 gånger för stor, se Tabell 1, varvid $\psi(\beta)$ kunde bestämmas.

Funktionen $f(\gamma)$, som styr inverkan av nosformen, bestämdes utifrån simuleringarna med olika spetsvinklar $\gamma = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ genom att beräkna

$$f = \frac{P_0}{q_p (1 + \phi + \psi)} - 1 \quad (9)$$

för bestämda värden på q_p , ϕ och ψ (beräknade utifrån resultaten enligt Tabell 2) och på liknande sätt som ovan anpassa ett polynom.

Numeriska värden för $c(\gamma, \nu)$ bestämdes på samma sätt som ovan för ett elastiskt material med Poissons tal $\nu = 0.17$ vilket är representativt för ett intressant keramiska material, kiselkarbid.

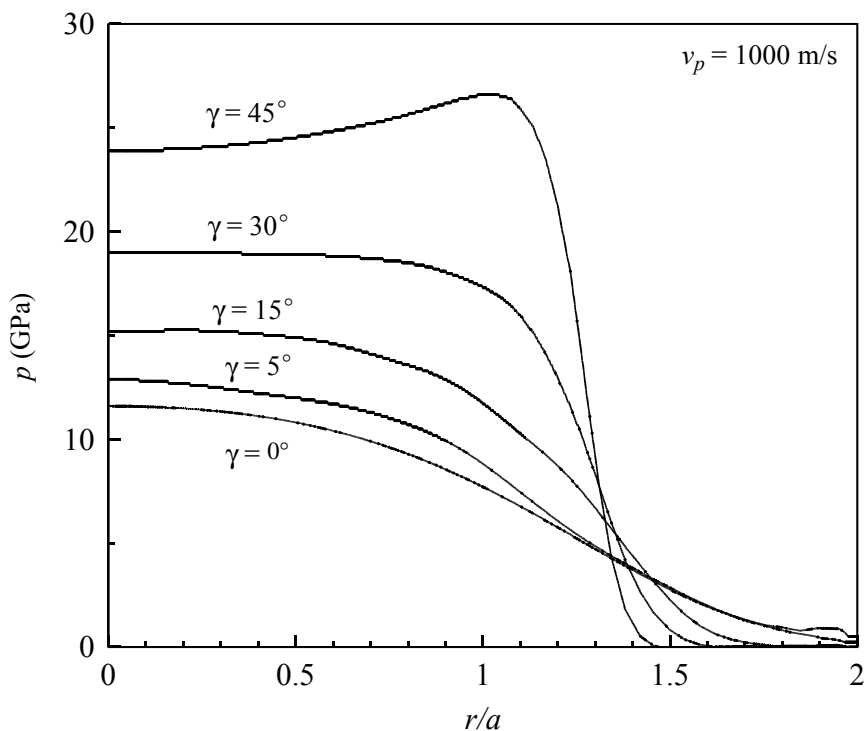
Resultat

Det beräknade kontakttrycket på symmetriaxeln p_0 redovisas i Tabell 2 för olika kombinationer av projektilform, materialegenskaper och hastighet. Figurerna 5-7 visar kontakttrycket p för olika nosvinklar och projektilhastigheter.

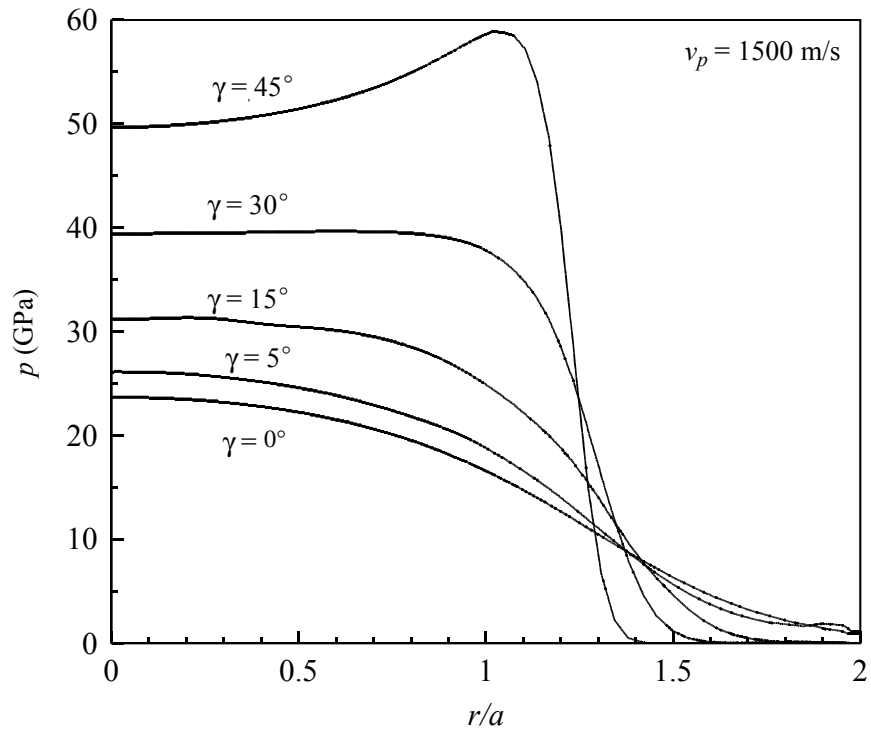
Funktionsvärdena för $\phi(\alpha)$, $\psi(\beta)$ och $f(\gamma)$ från Autodynsimuleringarna är plottade i Figurerna 8-10 tillsammans med polynomen anpassade enligt minsta kvaratmetoden. I Figur 11 är på samma sätt faktorn $c(\gamma, \nu)$ plottad som funktion av nosvinkeln γ .

Tabell 2 Beräknade kontakttryck p_0 för olika kombinationer av nosvinkel γ , bulkmodul K_p , flytspänning σ_{yp} och projektilhastighet v_p .

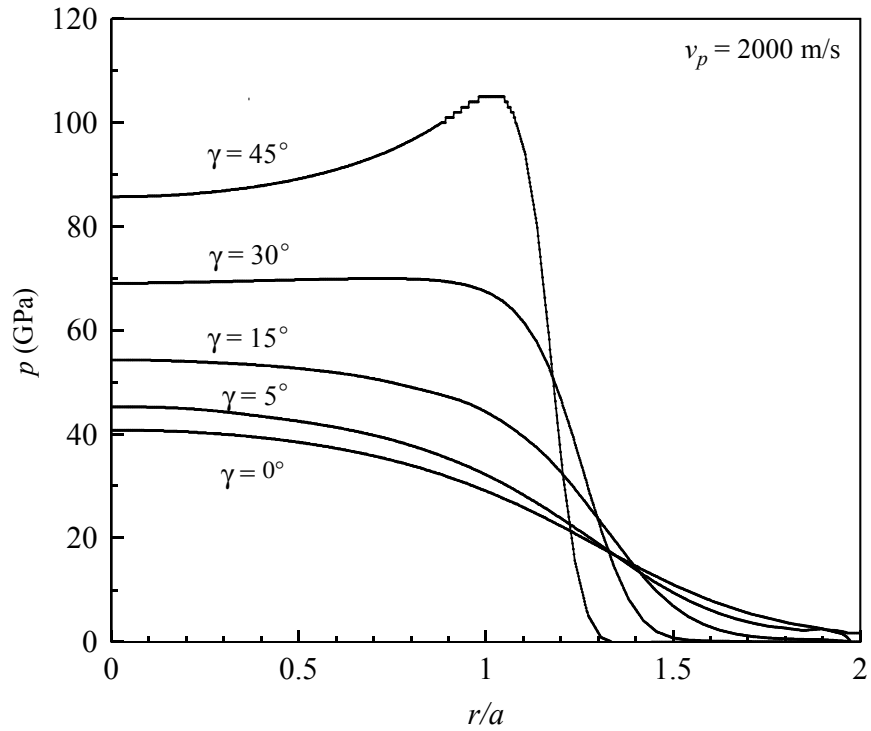
Spetsvinkel $\gamma(^{\circ})$	Bulkmodul K_p (GPa)	flytspänning σ_{yp} (GPa)	p_0 (GPa)				
			$v_p = 1000$ m/s	$v_p = 1500$ m/s	$v_p = 2000$ m/s	$v_p = 2500$ m/s	$v_p = 3000$ m/s
0	285	1	11.59	23.70	40.80	63.85	93.99
0	285	0.001	8.99	20.57	37.33	60.43	90.78
0	28500	1	11.63	23.04	38.67	58.49	82.87
0	28500	0.001	8.77	19.74	35.14	54.93	79.21
5	285	1	12.88	26.14	45.30	-	-
15	285	1	15.21	31.16	54.30	-	-
30	285	1	18.99	39.43	69.10	-	-
45	285	1	23.89	49.68	85.74	-	-



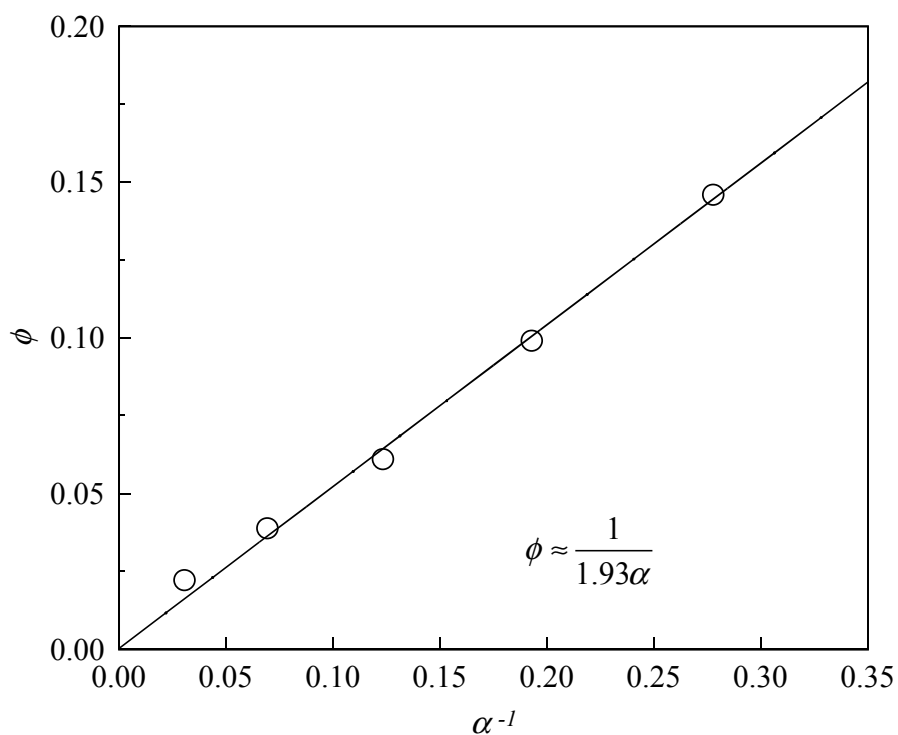
Figur 5 Kontakttryck p för olika nosvinklar γ vid anslagshastighet 1000 m/s. Projektildensitet, bulkmodul och flytspänning är $\rho_p = 17600$ kg/m³, $K_p = 285$ GPa respektive $\sigma_{yp} = 1$ GPa.



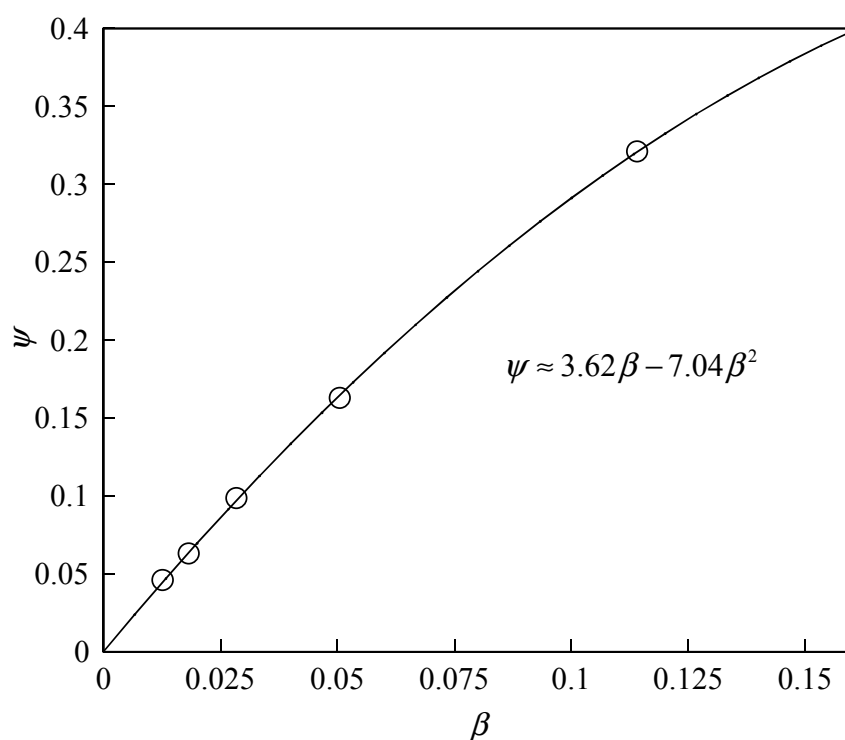
Figur 6 Kontakttryck p för olika nosvinklar γ vid anslagshastigheten 1500 m/s. Projektildensitet, bulkmodul och flytspänning är $\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$, $K_p = 285 \text{ GPa}$ respektive $\sigma_{yp} = 1 \text{ GPa}$.



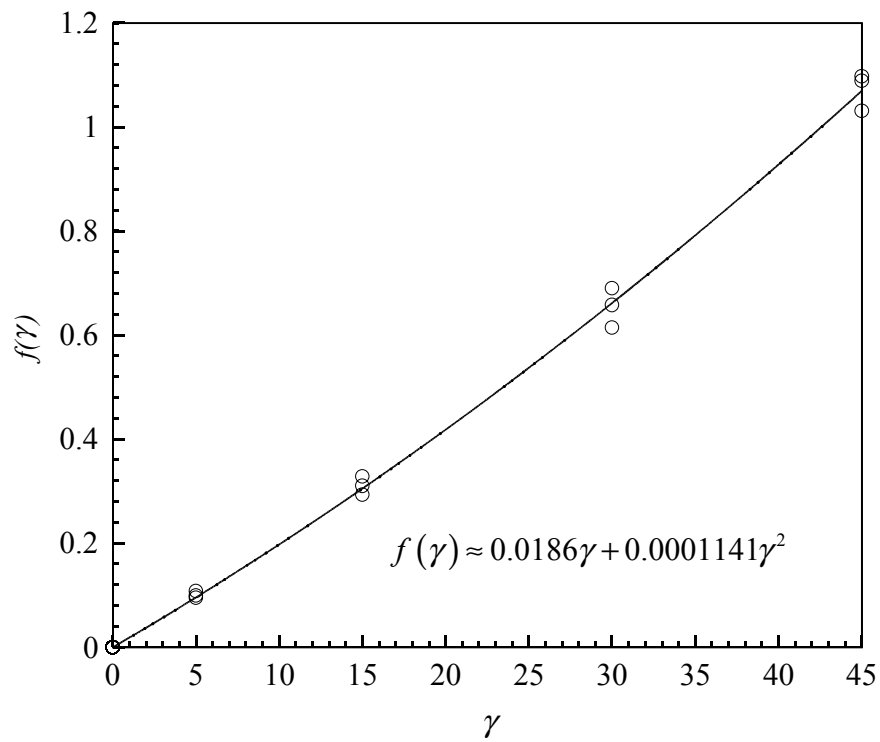
Figur 7 Kontakttryck p för olika nosvinklar γ vid anslagshastigheten 2000 m/s. Projektildensitet, bulkmodul och flytspänning är $\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$, $K_p = 285 \text{ GPa}$ respektive $\sigma_{yp} = 1 \text{ GPa}$.



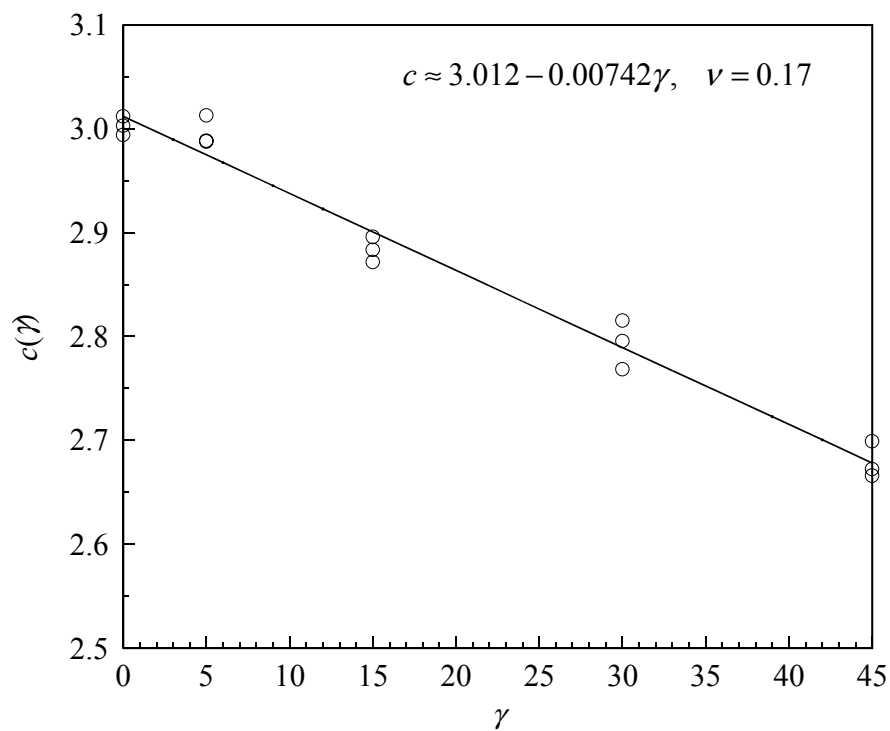
Figur 8 Kompressibilitetsbidrag ϕ som funktion av dimensionslös bulkmodul α för små β (< 0.000114). Projektdensitet $\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$. Öppna cirklar representerar simuleringar och heldragen kurva det anpassade polynomet.



Figur 9 Hållfasthetsbidrag ψ som funktion av dimensionslös flytspänning β för stora α (> 3240). Projektdensitet $\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$. Öppna cirklar representerar simuleringar och heldragen linje det anpassade polynomet.



Figur 10 Nosformsbidrag $f(\gamma)$ som funktion av nosvinkeln γ för $\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_{yp} = 1 \text{ GPa}$ och $K_p = 285 \text{ GPa}$. Öppna cirklar representerar simuleringar och heldragen linje det anpassade polynomet.



Figur 11 Proportionalitetsfaktorn $c(\gamma, \nu)$ som funktion av nosvinkel γ för Poissons tal $\nu = 0.17$. Öppna cirklar representerar simuleringar och heldragen linje det anpassade polynomet.

Utifrån de uppskattade funktionerna erhålls det approximativa uttrycket

$$p_0 = q_p \left(1 + 0.0186\gamma + 0.0001141\gamma^2 \right) \left(1 + \frac{1}{1.93\alpha} + 3.62\beta - 7.04\beta^2 \right) \quad (10)$$

för hur kontakttrycket på symmetriaxeln p_0 beror av anslagshastighet v_p , densitet ρ_p , bulkmodul K_p , flytspänning σ_{yp} och nosvinkel γ . Sambandet mellan proportionalitetsfaktorn $c(\gamma, \nu)$ och nosvinkeln γ för Poissons tal $\nu = 0.17$ kan approximeras med

$$c \approx 3.012 - 0.00742\gamma, \quad \nu = 0.17. \quad (11)$$

Utifrån ekvationerna (2), (3), (8), (10) och (11) kan nu transitions hastigheten v_p^* för en given kombination av projektil- och målmaterial uppskattas. Den kan inte lösas explicit utan måste bestämmas numeriskt.

Diskussion

I rapporten redovisas en modell för hur projektilens nosform påverkar transitions hastigheten för omslag mellan ”interface defeat” och penetration. Modellen utgår från ett tidigare arbete [4] där ett uttryck för det maximala kontakttrycket på symmetriaxeln p_0 bestämdes analytiskt som funktion av projektilens anslagshastighet, densitet, bulkmodul och flytspänning. Denna modell har här utvidgats till att även innefatta inverkan av projektilens nosform. Nosen antas här vara en kon.

Modellen har ett antal begränsningar. För stora nosvinklar blir den radiella hastigheten varmed lasten expanderar stor i förhållande till ljudutbrednings hastigheten i målmaterial. Det går då inte att försumma expansionen då maximala skjuvspänningen i målmaterial bestämms. I en verklig tillämpning är vanligtvis inte nosvinklar större än ca 30° (dubbla nosvinkeln = 60°) aktuella varför vi här endast studerat nosvinklar upp till 45° .

Modellen beskriver hur olika materialegenskaper inverkar då projektilen likt en vätskestråle flyter ut på målets yta. Detta fenomen existerar bara så länge inverkan av projektilens hållfasthet är måttlig i förhållande till stagnationstrycket q_p (p_0 för vätskeinströmning då nosvinkeln är $\gamma = 0^\circ$). I simuleringarna har β -värden upp till 0.114 använts. Det anpassade polynomet till de simulerade funktionsvärdena för $\psi(\beta)$ antar ett maximum för $\beta \approx 0.257$ vilket är ofysikaliskt. Redan för $\beta > 0.114$ (högsta simulerade β -värdet) blir modellen osäker, varför sådana resultat har begränsad relevans.

Två olika målmaterialbeteenden har använts. I ena fallet går målet sönder globalt så snart man når skjuvhållfastheten i någon punkt (instabilt beteende) och penetrationen startar. I det andra fallet kan ”plastisk” deformation utvecklas (metallbeteende) och det plastiska området tillväxa till följd av ökande ytlast. Penetrationen startar då genomplasticering sker.

Nedan redovisas exempel på nosformens inverkan på transitions hastigheten. Två olika projektilmaterial har studerats, tungmetall och hårdmetall. Målmaterial var kiselkarbid.

Kiselkarbid har vid tester med cylindriska projektiler [4] uppvisat en transitions hastighet som motsvarar ett ”plastiskt” materialbeteende, dvs enligt den högsta gränsen i modellen.

Tungmetallprojektil mot kiselkarbid

Transitions hastigheten för cylindriska tungmetallprojektiler (DX2 HCMF) mot en typ av kiselkarbid (SiC PAD B) har undersökts experimentellt på FOI [4]. Det observerade transitionsintervall var ca 1645-1705 m/s (de angivna hastigheterna motsvarar högsta hastighet då ”interface defeat” observerades respektive lägsta hastighet då man hade penetration).

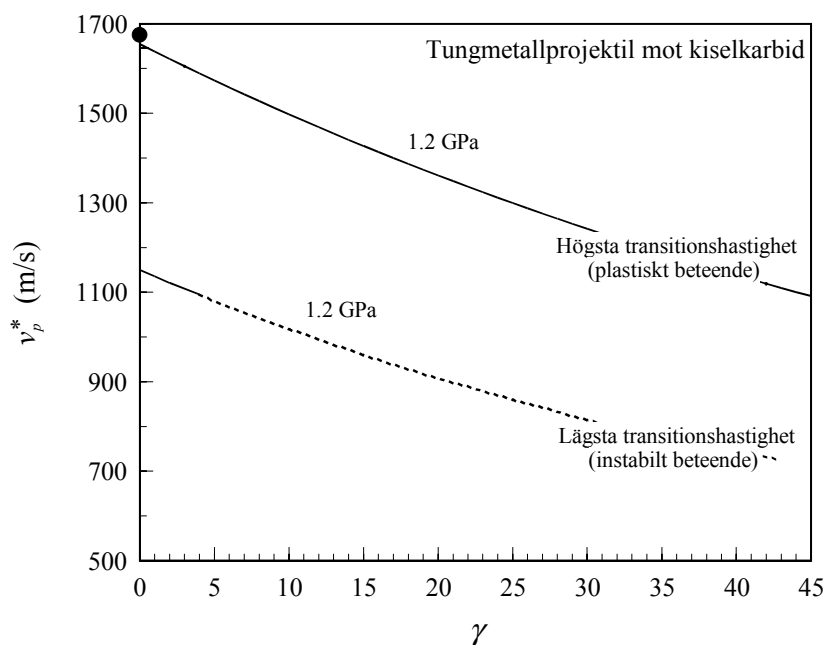
Tungmetallen har följande materialdata [4]:

Tungmetall (DX2 HCMF):	Sammansättning	93% W, 2.5% Fe, 4.5 % Cu
	Densitet	$\rho_p = 17600 \text{ kg/m}^3$
	Bulkmodul	$K_p = 285 \text{ GPa}$
	Flyt- respektive brottspänning	$\sigma_{yp} = 1$ respektive 1.2 GPa

Kiselkarbiden, som är tillverkad av Cercom, har följande materialdata [4]:

Kiselkarbid (SiC PAD B):	Sammansättning	99.32 % SiC, 0.68 % N+Fe+O
	Densitet	$\rho_k = 3220 \text{ kg/m}^3$
	Poissons tal	$\nu = 0.17$
	Flytspänning	$\sigma_y = 10.2 \text{ GPa}$

Utifrån ovan givna materialdata har inverkan av nosvinkeln beräknats och plottats i Figur 12.



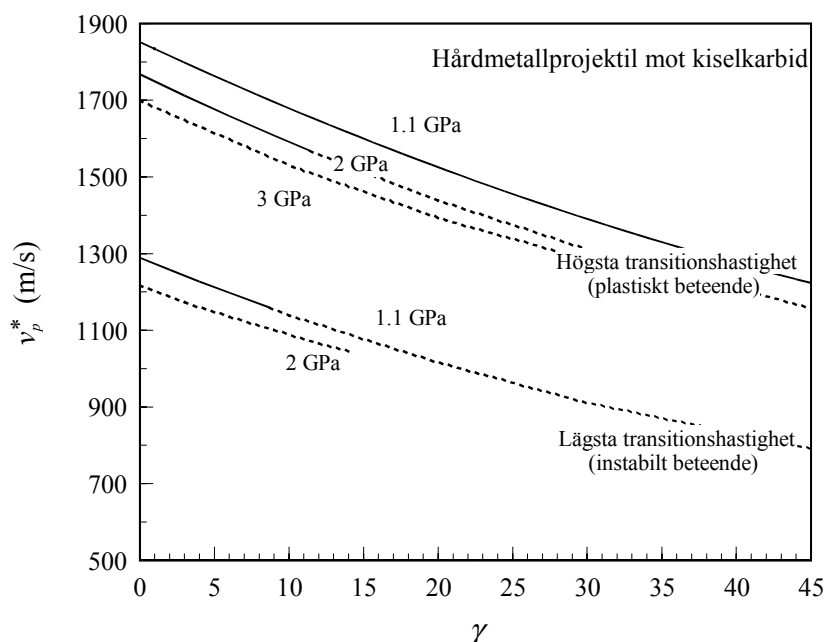
Figur 12 Transitions hastighet v_p^* som funktion av nosvinkel γ för tungmetallprojektil med flytspänningen $\sigma_{yp} = 1.2 \text{ GPa}$ mot kiselkarbid. Den streckade delen av kurvorna motsvarar ett område där modellen har begränsad relevans ($0.114 < \beta < 0.257$). Fylld cirkel motsvarar den experimentellt bestämda transitions hastigheten för en cylindrisk tungmetallprojektil mot kiselkarbid enligt [4].

Hårdmetallprojektil

För hårdmetallprojektiler finns inga kända undersökningar i vilka man bestämt transitionshastigheten. Hårdmetall används dock i flera typer av fin- och mellankaliberprojektiler och materialegenskaperna för ett viktigt projektilmaterial har undersökts på FOI [13]. Detta material, som har beteckningen material B [13], har följande egenskaper:

Hårdmetall (B):	Sammansättning	89 % WC, 11 % Co
	Densitet	$\rho_p = 14300 \text{ kg/m}^3$
	Bulkmodul	$K_p = 350 \text{ GPa}$
	Flyt- respektive brottspänning	$\sigma_{yp} = 1.1$ respektive 5 GPa

Modellen kan inte användas för att studera fallet där projektilen har full hållfasthet eftersom β då blir allt för stort. Projektilens flytspänning har därför begränsats till tre olika nivåer, nämligen $\sigma_{yp} = 1.1, 2$ och 3. Detta behöver inte innebära en begränsning, då hårdmetall troligen har ett relativt sprött beteende vid denna typ av belastning ("interface defeat"). Den effektiva hållfastheten är då troligen mindre än den statistiskt uppmätta (5 GPa). Inverkan av nosvinkeln har plottats i Figur 13.



Figur 13 Transitions hastighet v_p^* som funktion av nosvinkel γ för hårdmetallprojektil med flytspänningen $\sigma_{yp} = 1.1, 2$ och 3 GPa mot kiselkarbid. Den streckade delen av kurvorna motsvarar ett område där modellen har begränsad relevans ($0.114 < \beta < 0.257$).

Modellen visar att transitions hastigheten påverkas kraftigt av ändrad nosform hos projektilen. Då nosvinkeln ökar minskar transitions hastigheten avsevärt. För en tungmetallprojektil med dubbla nosvinkeln $2\gamma = 55^\circ$ som träffar ett kerammål av kiselkarbid kommer transitions hastigheten att minska med ca 30% i jämförelse med om projektilen vore cylindrisk. Det är därför troligt att det kan löna sig att i vissa fall använda någon form av frontskydd och på så sätt erodera bort projektilens nosdel innan denna når kerammaterialet. Detta krävs vanligtvis i alla fall då man vill ta bort initalstöten vid anslag av trubbiga projektiler.

Orsaken till den minskade transitions hastigheten är den avsevärda lastökning (vid samma nominella projektildiameter) som ökande nosvinkel innebär. En analytisk modell för konisk inströmningen är under utveckling och förhoppningsvis kommer denna att kunna förklara i detalj hur nosformen inverkar på kontaktrycket.

En experimentell studie av nosformens inverkan för både tungmetall- och hårdmetallprojektiler har påbörjats. Dessa försöksresultat kommer bland annat att användas för att utvärdera ovanstående modell.

Slutsatser

Skyddsförmågan hos skydd baserade på "interface defeat" påverkas av projektilens nosform. Trots att konsumtionen av nosen kan vara kortvarig kan denna nedsätta skyddets prestanda avsevärt om projektilen tillåts träffa kerammaterialet direkt. För att erhålla högsta möjliga skyddsförmåga bör nosdelen först eroderas bort innan "interface defeat" utnyttjas.

För finkalibertillämpningar ligger än så länge projektilhastigheterna vanligtvis under den kritiska hastigheten även för spetsiga projektiler, varför keramen i denna tillämpning kan utgöra den yttre komponenten i skyddet.

Referenser

- [1] G. E. Hauver, P. H. Netherwood, R. F. Benck and L. J. Kecskes. Ballistic performance of ceramic targets. *Army Symposium On Solid Mechanics*. USA 1993.
- [2] G. E. Hauver, P. H. Netherwood, R. F. Benck and L. J. Kecskes. Enhanced ballistic performance of ceramic targets. *19th Army Science Conference*. USA 1994.
- [3] E. J. Rapacki, G. E. Hauver, P. H. Netherwood and R. F. Benck, Ceramics for armours- a material system perspective. *7th Annual TARDEC Ground Vehicle Survivability Symposium*. USA 1996.
- [4] P. Lundberg, R. Renström, B. Lundberg. Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration. *Int J Impact Engng* 2000;24:259-275.
- [5] P. Lundberg, R. Renström, L. Holmberg. An experimental investigation of interface defeat at extended interaction times. *Proc 19th Int Symp on Ballistics, Switzerland*: 2001;3:1463-1469.
- [6] Y. C. Fung. Foundations of solid mechanics. Prentice-Hall, 1965.
- [7] H. Hencky, *Angew Z. Mat Mech.* 3, 241, 1923.
- [8] A. Haar und Th. von Kármán. Nacher Ges Wiss Göttingen, *Math phys Kl*, p 204, 1909.
- [9] R. T. Shield. On the plastic flow of metals under conditions of axial symmetry. *Proc R Soc, A*, 233, 267, 1955.
- [10] R. Hill. The mathematical theory of plasticity. *Clarendon Press*, 1998.
- [11] K. Birnbaum, M. S. Cowler, M. Itoh, M. Katayama and H. Obata, AUTODYN - an interactive non-linear dynamic analysis program for microcomputers through supercomputers. *Ninth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Lausanne, Switzerland, (1987).
- [12] K. Birnbaum and M. S. Cowler, Numerical simulation of impact phenomena in an interactive computing environment. *International Conference on Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials "IMPACT 87"*. Bremen, Federal Republic of Germany, (1987).
- [13] P. Skoglund. Kvasistatisk tryckprovning av volframkarbid/koboltlegeringar. FOA-R--00-01411-310-SE, Maj 2000.