

Lars Olovsson och Mattias Unosson

Brottmodellering av hårdmetall i KRYP

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--1306--SE

September 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Lars Olovsson och Mattias Unosson

Brottmodellering av hårdmetall i KRYP

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1306--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år September 2004	Projektnummer E2022
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Lars Olovsson Mattias Unosson	Projektledare Ewa Lidén	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Brottmodellering av hårdmetall i KRYP		
Sammanfattning (högst 200 ord) Denna rapport beskriver kortfattat möjliga lösningar till de svårigheter som föreligger vid modellering av sprickpropagering vid snabba dynamiska belastningar. Arbetet är begränsat till en diskussion kring användandet av explicita finita elementprogramvaror för att simulera denna typ av förlopp.		
Nyckelord sprickpropagering, finita elementmetoden		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 12 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1306--SE	Report type Technical report
	Research area code 5. Combat	
	Month year September 2004	Project no. E2022
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Lars Olovsson Mattias Unosson	Project manager Ewa Lidén	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Fracture modelling of hard metal in KRYP		
Abstract (not more than 200 words) This report is basically a brief discussion on possible solutions to difficulties associated with the modelling of crack propagation in transient dynamics. The work is limited to the context of using explicit finite element techniques when simulation such processes.		
Keywords crack propagation, finite element method		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 12 p.	
	Price acc. to pricelist	

Inledning

Många av de mekaniska förlopp som studeras vid FOI involverar snabb dynamisk spricktillväxt. För att analysera en strukturs skyddsförmåga och resthållfasthet i ett visst belastningsfall eller en hårdmetallprojektils sönderbrytning vid penetration av skydd krävs modeller och kriterier för såväl sprickinitiering som sprickpropagering. Utvecklingen på FOI av sådana modeller sker med hjälp av det egenutvecklade beräkningsprogrammet KRYP.

Det finns visserligen en samlad kunskap i forskarvärlden kring de fundamentala mekanismer som styr spricktillväxt i såväl spröda som duktila material, men den är svår att överföra till de numeriska modeller som krävs för att analysera en större struktur. Anledningen är främst att vi måste lämna atomnivån för att hantera större materialvolym. Det faktum att 1mm^3 järn innehåller nästan 10^{20} atomer tydliggör behovet av någon form av homogenisering där inte varje atom modelleras individuellt. Man ser därför vanligtvis materialet som ett homogent kontinuum, för vilket man ställer upp ekvationer för energi- och kraftjämvikt. För att lösa ekvationerna krävs dessutom konstitutiva antaganden (materialsamband), vilka oftast baseras på enkla drag eller vridprov. Brott Kriterier väljs i regel som enkla fenomenologiska funktioner av spänning och plastisk töjning med målet att prediktera sprickinitiering.

De slutliga ekvationssystemen är, med få undantag, alltför komplexa för att lösas analytiskt. Numeriska approximationer är oftast nödvändiga och det dominerande numeriska verktyget för strukturmekaniska analyser är den s.k. finita elementmetoden. Spricktillväxt hanteras vanligtvis med en teknik baserad på eroderande element. Element som representerar fullskadat material tas helt enkelt bort från modellen. Metoden är beräkningsmässigt snabb och enkel.

Ovan beskrivna arbetsgång är den förhärskande i strukturmekaniska sammanhang vid analys av olinjära, dynamiska förlopp. Kontinuumsmekanik och finita element är i regel väl fungerande verktyg vid analys av vad som sker fram till initieellt materialbrott. Vid sprickpropagering uppstår dock vissa problem:

1. Materialvariationer gör att små volymer statistiskt sett klarar större deformationer än stora volymer. Den plastiska zonen vid en sprickspets är i regel mycket liten. Man kan därför vid sprickspetsen sannolikt nå större plastiska deformationer innan brott än vad man mäter upp i t.ex. ett enkelt dragprov. Denna effekt kan inte hanteras med antagandet att materialet är helt homogent.
2. En spricka är i regel mycket skarp, men ingen perfekt singularitet. Med ett grovt elementnät kan man inte lösa upp geometrin och deformationsgradienterna kring sprickspetsen, med underskattade töjningar som följd. En spricka som beskrivs av eroderade element blir skarpare ju finare elementnätet är. Med element som är mindre än sprickspetsens verkliga radie kommer de lokala deformationerna för en viss given yttre last att istället överskattas. Att ha ett så fint elementnät är ovanligt men det visar på ett mycket allvarligt faktum. Brottenergin konvergerar helt enkelt mot noll när elementnätet förfinas!

För att hantera ovan nämnda problem diskuterar vi i denna rapport två ingenjörsmässiga handgrepp.

1. En slumpmässig fördelning av materialdefekter som skapar ett fysikaliskt motiverat storleksberoende hos materialet.
2. Kompensation för elementnätberoendet genom att skala töjningshastigheten för de element som befinner sig vid sprickspetsen. Skalfaktorn kommer att vara en funktion av såväl materialval som elementstorlek.

För att hitta lämpliga defektfördelningar och skalfaktorer krävs experimentella data. Vi föreslår att, förutom data från vanliga dragprov, utgå från sprickenergi och kritisk last för spricktillväxt.

Vi har inga ambitioner att, med dessa enkla handgrepp, beskriva materialets korrekta tillstånd vid sprickspetsen. Målet är begränsat till att åstadkomma en modell som ger rätt kritisk last och sprickenergi och hoppas att detta är tillräckligt för ett realistiskt globalt beteende hos den struktur vi försöker analysera.

Storleksberoende - initiella materialdefekter

Kristallina metaller innehåller imperfektioner i form av bl.a. vakanser, orenheter, mikrosprickor och dislokationer. Beroende på tillverkningsprocess finns även varierande nivåer av mikrospänningar. Olika kombinationer av defekter och mikrospänningar kan såväl sänka som höja materialets lokala hållfasthet. Att försöka förstå och kvantifiera deras samlade inverkan på ett materials styrka och att dessutom implementera denna kunskap i en analys av en makroskopisk struktur ter sig dock föga realistiskt. Detta innebär emellertid inte att det är utsiktslöst att, i en numerisk modell, försöka ta hänsyn till materialinhomogeniteter över huvud taget. Med en fenomenologisk modell kan vi tillåta oss släppa greppet om fysiken bakom materialvariationerna och nöja oss med att beskriva deras inverkan på det vi är intresserade av, d.v.s. materialets hållfasthet.

Weibull [1], [2] var en pionjär inom detta område. Han föreslog en fenomenologisk svagaste länkenmodell där en materialvolym's hållfasthet antogs begränsad av dess största defekt. I samma anda föreslår Unosson et al. [3] en modell som bygger på att koppla initiella defektfördelningar till en vald konstitutivmodell. Från funktioner som beskriver materialets defekttäthet beräknas sannolikheten att hitta en viss defekt med en viss storlek i en given materialvolym. Med hjälp av en slumpvalsgenerator kan modellen användas för att koppla en största defekt till varje element i en finita elementmodell. Denna största defekt översätts sedan till en initiell skada hos varje element.

Unossons defektfördelningsmodell

I en kortfattad beskrivning av modellen, baserad på ett fall med endast en defekttyp, börjar vi med att definiera en defektfördelningsfunktion $g^r(s)$ enligt

$$g^r(s) = \frac{dn}{ds} \quad s \in [a, b]$$

där n är antalet defekter i en referensvolym V^r och s är defektstorleken som varierar kontinuerligt mellan a och b . Från denna funktion kan totala antalet defekter n^r i V^r beräknas.

$$n^r = \int_a^b g^r(s) ds$$

På samma sätt blir antal defekter $\geq s^e$

$$n^e = \int_{s^e}^b g^r(s) ds$$

Sannolikheten att hitta minst en av dessa imperfektioner i en volym $V^e \leq V^r$ är

$$P^e(s^e, V^e) = 1 - \left(1 - \frac{V^e}{V^r}\right)^{n^e} = 1 - \left(1 - \frac{V^e}{V^r}\right)^{\int_{s^e}^b g^r(s) ds}$$

Om vi låter $V^r \rightarrow \infty$ fås gränsvärdet

$$P^e(s^e, V^e) = 1 - e^{-V^e \int_{s^e}^b g(s) ds}$$

där $g(s) = g^r(s)/V^r$ är materialspecifik och beskriver defekttätheten per volymsenhet. P^e i uttrycket ovan beskriver helt enkelt sannolikheten att hitta en defekt större än eller lika stor som s^e i en given materialvolym V^e . När $g(s)$ är känd kan funktionen P^e utnyttjas för att, med hjälp av en slumptalsgenerator, slumpa ut största defekten i en viss given volym. I en finita elementberäkning handlar det helt enkelt om att bestämma största initiella defekten i varje element.

Unosson antar ett utseende hos $g(s)$ som bygger på antagandet att det finns fler små än stora defekter i materialet.

$$g(s) = ce^{-ds} \quad s \in [a, b]$$

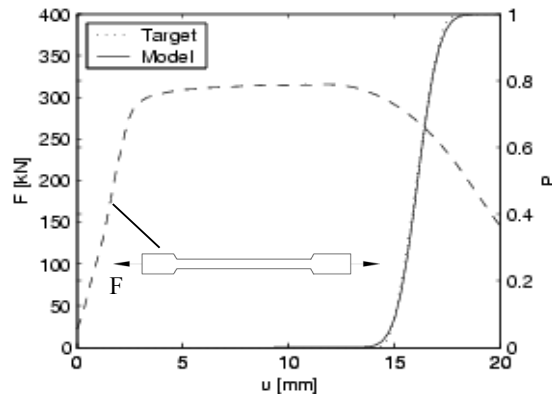
a , b , c och d är obekanta materialkonstanter. Enklast möjliga koppling mellan initiella skadan D_0^e och största defekten s^e antas.

$$D_0^e = s^e$$

Skadan i ett element antas sedan växa med plastisk töjning enligt

$$D^e = D_0^e + \frac{\varepsilon_{eff}^p}{\varepsilon_f^p}$$

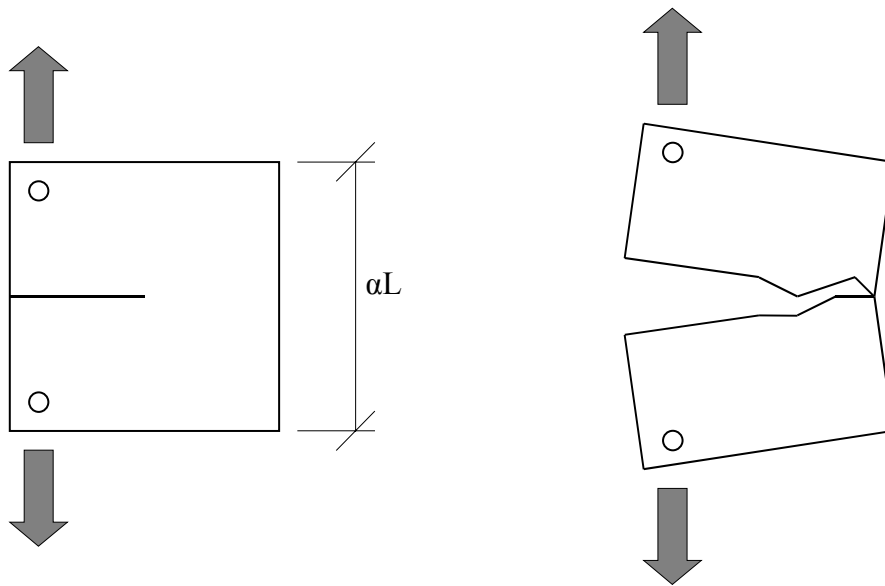
med brott då $D^e = 1$. ε_f^p är ytterligare en obekant materialparameter, som tillsammans med a , b , c och d optimeras mot experimentella spridningsdata. Unosson presenterar resultat för ArmoX 500T utgående från Johnson-Cooks hårdnandemodell [4] med materialparametrar enligt Nilsson [5]. Fig 1 visar kraft som funktion av förlängning för den analyserade provstaven samt sannolikhet för brott vid olika förlängningar.



Figur 1: Kraft-förskjutningssamband för en enkel provstav samt sannolikhet för brott vid olika förlängningar.

Sprickenergi - skaleringsfunktion

Problemet med elementnätberoende sprickenergi kan enkelt exemplifieras. Antag att vi har en finita elementmodell av en skiva med sprickanvisning enligt Fig 2.



Figur 2: Schematisk bild av en enkel provkropp med sprickanvisning.

α är en längdfaktor, med vilken vi kan skala om provkroppens och elementens storlek i alla tre rumsdimensioner. I en finita elementberäkning där alla element behandlas lika och antas tåla samma deformation innan brott kommer energin som krävs för att driva sprickan genom hela provkroppen vara beroende av provkroppens storlek enligt

$$e(\alpha) = e_0 \alpha^3$$

där e_0 är en konstant. Energin blir alltså proportionell mot provkroppens storlek. Det bör tilläggas att detta endast är helt sant under förutsättning att man kan bortse från töjningshastighetseffekter. Sprickans area växer dock endast kvadratisk med α .

$$A(\alpha) = A_0 \alpha^2$$

där A_0 är en konstant. Kvoten mellan total energi och sprickarea uttrycker den energi per ytenhet som krävs för att driva sprickan.

$$G_c(\alpha) = \frac{e(\alpha)}{A(\alpha)} = \frac{e_0}{A_0} \alpha$$

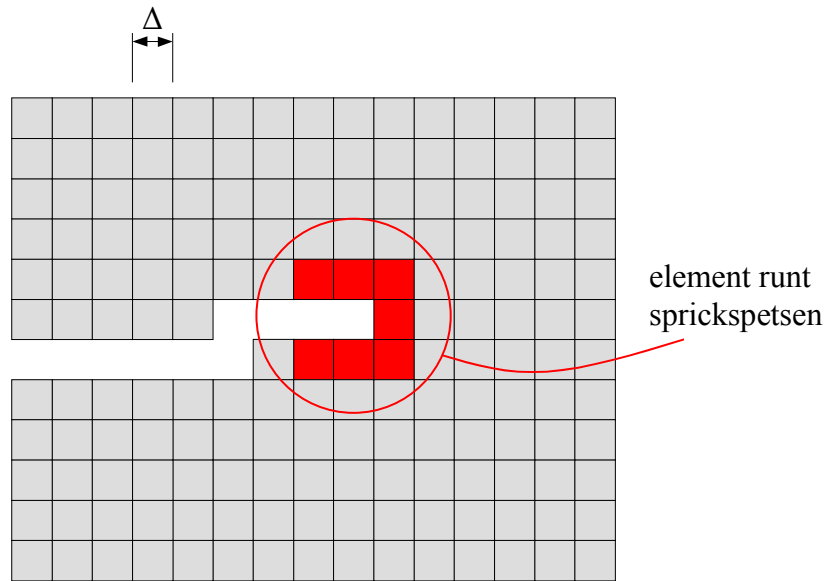
Vi ser att denna energi är elementstorleksberoende med konvergens mot noll, vilket är ett synnerligen allvarligt faktum. Problemet uppstår p.g.a. diskretiseringsfel som är en kombination av en felaktig geometrisk beskrivning av sprickans radie och en oförmåga att, med ett grovt elementnät, beskriva extrema gradienter vid sprickans spets. För att hantera detta problem föreslår vi en speciell behandling av de element som befinner sig runt sprickspetsen, med målet att kompensera för diskretiseringsfelen, se Fig 3. Med ett grovt elementnät skalar vi helt enkelt upp de, i elementets integrationspunkter, beräknade töjningshastigheterna $\dot{\epsilon}$ enligt

$$\dot{\epsilon}^* = f(\Delta) \dot{\epsilon}$$

där $\dot{\epsilon}^*$ är den töjningshastighet som antas finnas vid sprickans spets och $f(\Delta)$ är en materialspecifik funktion av elementstorleken Δ . Från den antagna töjningshastigheten kan sedan tidsderivatan av spänningen vid sprickspetsen beräknas.

$$\dot{\sigma}^* = \mathbf{L} : \dot{\epsilon}^*$$

där \mathbf{L} är den tangentiella materialstyvheten. Att gå från en beräknad elementtöjningshastighet till en lokal töjningshastighet vid sprickspetsen kan ses som en lokaliseringsprocess. Vi bestämmer oss helt enkelt för att följa utvecklingen vid sprickspetsen istället för i elementets integrationspunkter.

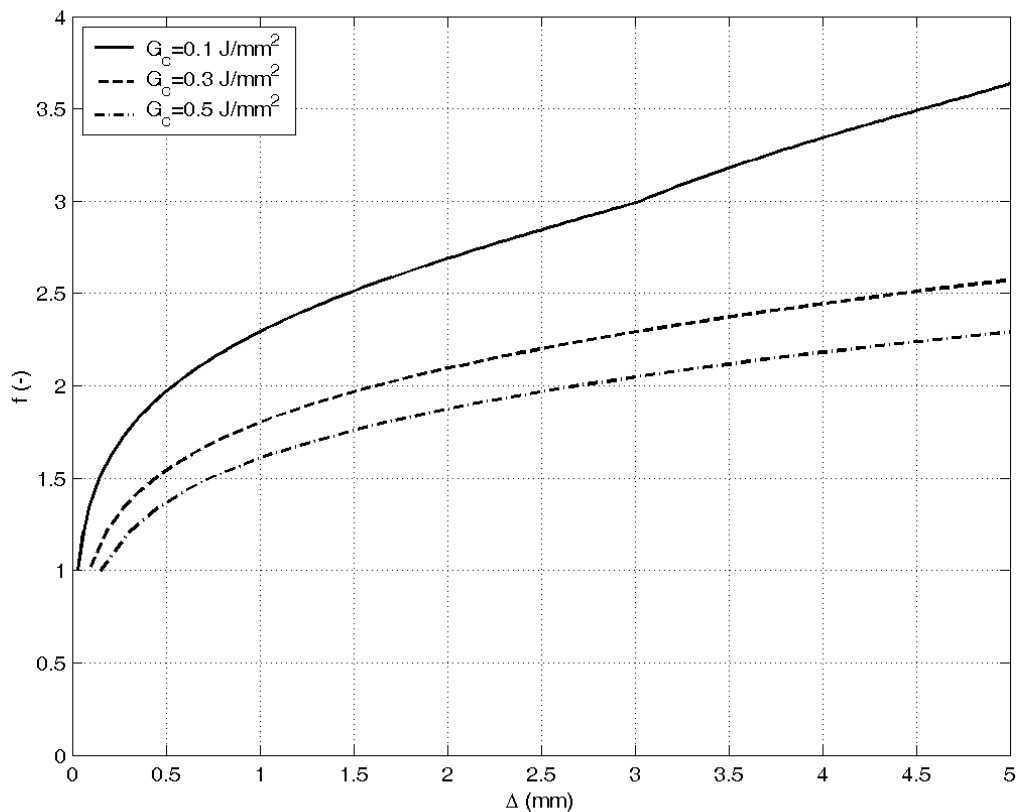


Figur 3: Spricka definierad av eroderade element.

För att räkna ut de interna krafter som styr accelerationen av modellens noder krävs dock ett spänningsmått σ som är representativt för hela elementet. Här gör vi ett nytt antagande och väljer följande koppling till den spänning som är framräknad vid sprickspetsen

$$\sigma = f^{-1}(\Delta)\sigma^*$$

Detta kan ses som en homogeniseringsprocess. Det är intressant att notera att, genom att i lokaliseringsprocessen skala töjningshastigheten med $f(\Delta)$ och i homogeniseringsprocessen skala spänningen med $f^{-1}(\Delta)$ kommer lösningen för ett linjärelastiskt belastningsfall, utan brottkriterium, vara oberoende av $f(\Delta)$. För tillfället pågår ett projekt där vi bestämmer $f(\Delta)$ för ArmoX 500T med målet att åstadkomma en elementnäsoberoende sprickenergi. Detaljer kring detta arbete planeras att publiceras innan årsskiftet. Fig 4 visar dock ett preliminärt utseende hos $f(\Delta)$ för olika nivåer av brottseghet.



Figur 4: Skalfaktor för element runt sprickspetsen för olika nivåer av brottseghet.

Observera att $f(\Delta) < 1$ ännu ej utvärderats. Därav ofullständigt resultat för små elementstorlekar. Det är viktigt att tillägga att framtagandet av $f(\Delta)$ bygger på simuleringar med Johnson-Cooks hårdnandemodell [4] och materialparametrar tagna från Nilsson [5]. För brottkriteriet antas en tryckberoende skadeutveckling enligt Goldthorpe [6].

$$\dot{D}^e = 0.72e^{-1.5\frac{p}{\sigma_{eff}}} \dot{\epsilon}_{eff}^p$$

där \dot{D}^e är en skadeparameter som löper från 0 till 1, då materialet går till brott. p är det hydrostatiska trycket och σ_{eff} är effektivspänningen enligt von Mises.

Slutdiskussion

Ovan beskrivna metoder för en bättre hantering av sprickpropagering kompletterar varandra och det slutliga målet är att använda dem tillsammans. Den stokastiska defektfördelningen möjliggör ett mer korrekt steg från verklighet till matematisk modell. Skaleringsfunktionen, å andra sidan, kompenserar för ofrånkomliga diskretiseringsfel i den numeriska lösningen av den matematiska modellen.

Det är dock viktigt att betona vi i finita elementanalyser av större materialvolymmer främst är intresserade av en korrekt makroskopisk respons och inte av tillståndet vid själva sprickspetsen. Vi utgår från att brottnenergin är den i sammanhanget viktigaste parametern.

Vi har som mål att, inom ett år, klara av att simulera processer involverande sprickpropagering (t.ex. penetrationsförlopp) med, för våra ändamål, tillräcklig noggrannhet. Till dags dato har vi enbart studerat Armox 500T. Vi bygger dock upp generella verktyg för karakteriseringsarbetet som senare kan användas för att enkelt plocka fram parametrar för andra material.

Det bör tilläggas att arbetet genomförs med hjälp av KRYP [7], en finita elementprogramvara som fortlöpande utvecklas vid FOI. Att implementera samma funktionalitet i de kommersiella finita elementverktyg som används vid FOI idag kommer kräva ett fördjupat samarbete med och intresse från berörda programvaruföretag.

Referenser

- [1] W. Weibull, "A statistical theory of the strength of materials". Ingeniörsvetenskapsakademiens handlingar, Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm, vol 151, 1939.
- [2] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability". Journal of applied mechanics, vol 18, 293-297, 1951.
- [3] M. Unosson, L. Olovsson och K. Simonsson, "Failure modelling in finite element analyses: Random material imperfections". Inskickad för publikation till Mechanics of materials, 2004.
- [4] G. R. Johnson, W. H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures". In: 7th International symposium on ballistics, The Hague, Belgium, 541-547, 1983.
- [5] M. Nilsson, "Constitutive model for Armox 500T and Armox 600T at low and medium strain rates". Technical report FOI-R--1068-SE, Swedish defence research agency, Stockholm, 2002.
- [6] B. D. Goldthorpe, "A path dependent model for ductile fracture". 5th International conference on mechanical and physical behaviour of materials under dynamics loading, Toledo, Spain, 705-710, 1997.
- [7] L. Olovsson, "KRYP, a finite element tool for crystal plasticity analyses". Methodology report FOI-R--0374--SE, Swedish defence research agency, Stockholm, 2002.