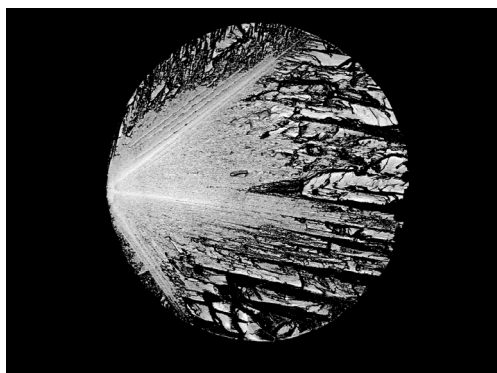


Peter Skoglund, Annika Pettersson

Studier av riktade volfram-rhenium-legeringar



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--0254--SE

November 2001

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Peter Skoglund, Annika Pettersson

Studier av riktade volfram-rhenium-legeringar

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0254--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år November 2001	Projektnummer E2206
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Peter Skoglund Annika Pettersson	Projektledare Patrik Lundberg	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Christer Israelsson, ProjTU	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Peter Skoglund, Annika Pettersson	
Rapportens titel Studier av riktade volfram-rhenium-legeringar		
Sammanfattning De två vanligaste materialen till KE-projektiler är utarmat uran legerat med 0,75% titan respektive volframbaserade tungmetallegeringar. Den större penetrationsförmågan för utarmat uran kan härledas till materialens deformationsbeteende under penetrationsförloppet, där utarmat uran sägs vara spetsformande. För att förbättra penetrationsförmågan hos volframbaserade tungmetaller har två metoder föreslagits, "flödesmjuknande-" och "flödesanisotropimetoden". Den senare baseras på att framställa en anisotrop legering med riktade volframkristaller, där deformationsegenskaperna varierar med kristallriktningen. En undersökning av riktade volfram-rheniumlegeringar med potential som projektilmaterial har gjorts. De undersökta materialen har rheniumhalter upp till ca. 5% och är orienterade så att kristallstrukturens [100]- respektive [110]-riktning är parallell med provens längdaxel. Den mekaniska undersökningen utfördes under enaxlig dragbelastning vid töjningshastigheter upp till 1 s^{-1} och temperaturer från 20 till ca. 800 °C. Resultaten från den mekaniska provningen visar att under förhöjda temperaturer går material med en [100]-riktning parallell med belastningsaxeln av vid väsentligt lägre töjningar än motsvarande [110]-orienterade prov. Vid rumstemperatur sker brott vid mycket små töjningar skenbart utan föregående plastisk deformation oberoende av töjningshastighet och provmaterial. Resultaten från den metallografiska undersökningen av brottytorna med ett svepelektronmikroskop tyder dock på att en ökad rheniumhalt ökar materialens duktilitet.		
Nyckelord Volfram-rheniumlegering, mekanisk provning, projektilmaterial, tungmetall		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 19 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--0254--SE	Report type User report
	Research area code 5. Combat	
	Month year November 2001	Project no. E2206
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Peter Skoglund Annika Pettersson	Project manager Patrik Lundberg	
	Approved by	
	Sponsoring agency Christer Israelsson, ProjTU	
	Scientifically and technically responsible Peter Skoglund, Annika Pettersson	
Report title (In translation) Studies on directional tungsten-rhenium alloys		
Abstract KE-projectiles are usually made of uranium or tungsten based alloys. Uranium alloy has better penetration due to the deformation behaviour; it is said to be selfsharpening. To increase the penetration performance of tungsten alloys, two approaches have been proposed: "flow-softening" and "flow-anisotropy". The latter is based on the production of an anisotrop alloy with directionally oriented tungsten crystals, where the deformation behaviour changes depending on the orientation. An investigation of directional tungsten-rhenium alloys with potential as a projectile material has been done. The investigated materials have rhenium contents up to about 5% and the grains are oriented along the [100]- or [110]-axis. Mechanical experiments at strain rates up to 1 s^{-1} and temperatures from 20 to about 800 °C have been done. The results from the mechanical testing in elevated temperatures show that samples with a [100]-axis parallell with the loading direction have a lower fracture strain than corresponding [110]-oriented material. At room temperature fracture occurs at low strain with seemingly no prior plastic deformation independent of strain rate and material. The result from the metallographic investigation in a scanning electron microscope show that the fracture surfaces have a more ductile appearance with increasing rhenium content.		
Keywords Tungsten-rhenium alloys, mehanical testing, projectile material, heavy metal		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 19 p.	
Price acc. to pricelist Security classification		

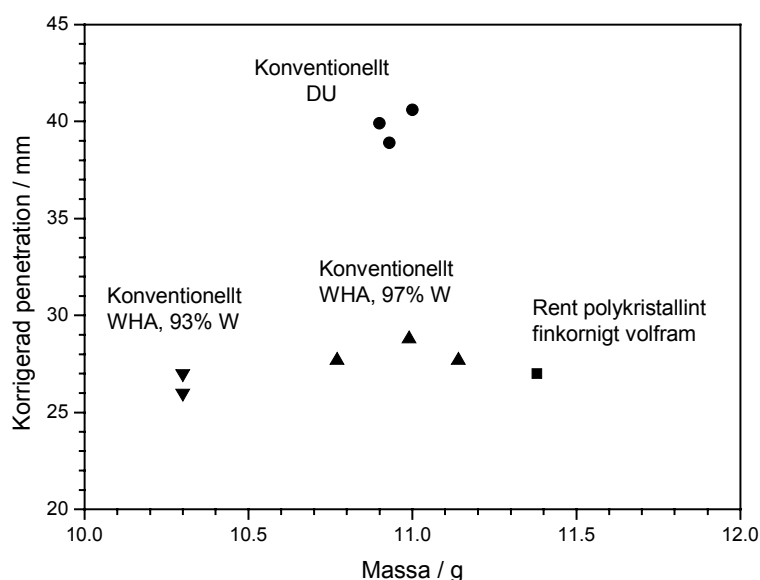
Innehållsförteckning

<i>Inledning</i>	5
<i>Experiment</i>	7
Kristallorienteringsanalys	7
Kemisk analys	7
Metallografisk analys	7
Mekanisk provning	8
<i>Resultat och diskussion</i>	9
Kristallorienteringsanalys	9
Kemisk analys	10
Metallografisk analys	10
Mekanisk provning	11
Brott	13
<i>Slutsatser</i>	16
<i>Vidare arbete?</i>	17
Flödesmjuknandemetoden	17
Dynamisk provning	18
Framtida material	18
<i>Referenser</i>	19

Inledning

Vid bekämpning av tyngre pansar används KE-projektiler som genom sin stora rörelseenergi penetrerar pansaret. De två vanligaste projektilmaterialen är utarmat uran, DU, legerat med 0,75% titan respektive volframbaserade tungmetallegeringar. Projektiler av utarmat uran har hög densitet, ca 19 g/cm^3 . Det bildade DU-dammet antänds dessutom då materialet är pyrofort. Denna typ av projektiler används inte i Sverige. De volframbaserade projektilerna med W-halt 90–95%, WHA, består vanligtvis av volframpartiklar sammanbundna av ett matrismaterial och i matrisen är nickel en viktig komponent. Även järn och kobolt är ofta förekommande tillsatser i matrismaterialet. Projektilerna får vanligen en densitet på ca $17,5\text{--}18,5 \text{ g/cm}^3$.

Magness och andra forskare vid Army Research Laboratory i USA¹⁻⁹ har gjort omfattande studier av nämnda typer av projektilmaterial. De har bland annat visat att penetrationsförmågan som funktion av projektilvikt är bättre för projektiler av utarmat uran jämfört med konventionella volframbaserade projektilmaterial⁸, se figur 1.

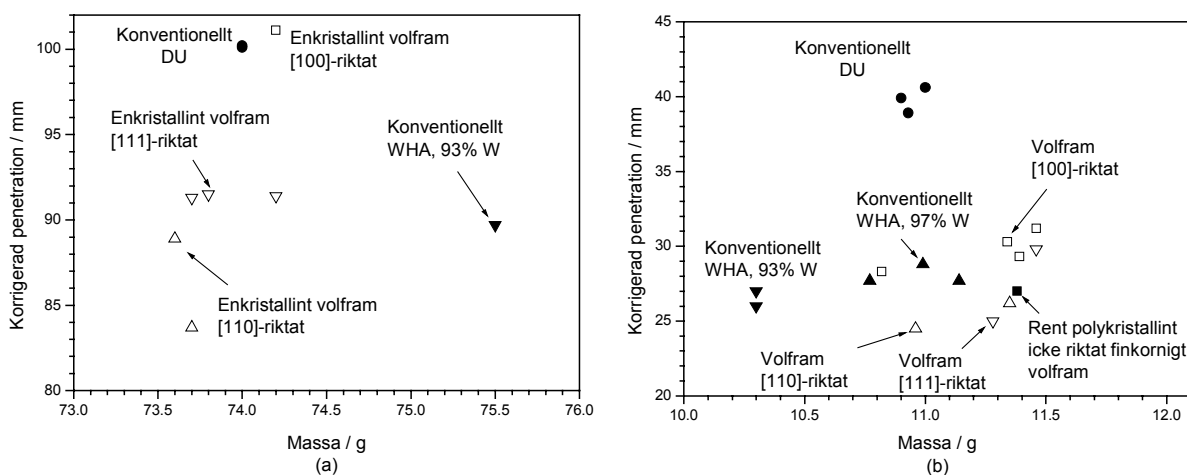


Figur 1. Penetrationsdjup (korrigerad för små variationer i anslagshastighet) som funktion av massan för fyra olika KE-projektilmaterial. Anslagshastigheten är 1015 m/s och målmaterialet en mjuk stålcyllinder. Projektil längden är $50,8 \text{ mm}$ och diametern $3,81 \text{ mm}$, ($L/D = 13.33$). Efter Magness et. al⁸.

Den större penetrationsförmågan för DU jämfört med konventionella tungmetaller baserade på volfram kan enligt Magness med medarbetare²⁻⁵ härledas till materialens deformationsbeteende. Då uran deformeras under penetrationsförloppet skalas de deformerade delarna av genom så kallad adiabatisk skjuvning varvid projektilen blir spetsformad. Volfram däremot håller ihop under penetrationen och bildar en mer sammanhängande svampformad nos med stor tvärsnittsarea. Detta leder till att hålskanalen får en större diameter och därmed fås ett mindre penetrationsdjup.

Den större penetrationsförmågan för uranlegeringar beror på adiabatisk skjuvning och på att detta snabba ”flödesmjuknande” är en funktion av legeringens mekaniska (töjningshårdnande, töjningshastighetshårdnande) och termiska egenskaper.

För att förbättra penetrationsförmågan hos volframmaterial har två olika angreppsmetoder föreslagits³, ”flödesmjuknande-” och ”flödesanisotropimetoden”. Den förstnämnda metoden bygger på att påverka ”flödesmjuknandet” genom att utveckla en isotrop och mera plastiskt instabil matris så att ett deformationsbeteende liknande DU erhålls. Den senare metoden baseras på att framställa en anisotrop legering med riktade volframkristaller, där deformationsegenskaperna varierar med kristallriktningen. Genom att styra orienteringen på volframkristallerna i en projektil kan på så sätt penetrationsegenskaperna påverkas. I figur 2a nedan framgår att en volframprojektil bestående av en enkristall med [100]-riktningen parallell med projektilens längdaxel får en penetrationsförmåga jämförbar med uranlegeringens. Även ballistiska försök med polykristallina riktade volframmaterial har prövats och finns redovisade i figur 2b. Det framgår av figur 2b att dessa [100]-riktade polykristallina volframmaterial inte var lika bra som de helt enkristallina. Ett beroende av kristallorientering kan dock fortfarande observeras.



Figur 2. (a): Penetrationsdjup för enkristallina volframprojektiler med en anslagshastighet på ca 1500 m/s mot RHA (Rolled Homogeneous Armor), från Bruchey m. fl.⁹. (b): Penetrationsdjup för projektiler bestående av orienterat volfram med anslagshastighet 1015 m/s mot mjukt stål, från Magness et. al.⁸. I båda figurerna kan resultaten jämföras med mera konventionella volfram- och uranprojektiler och penetrationsdjupet är korrigerat för små variationer i anslagshastighet.

Många av dessa material är väldigt spröda och det är därför svårt att tillverka projektiler som kan motstå de stora accelerationer som uppstår vid utskjutning⁹. Detta innebär att mantling eller motsvarande kan bli nödvändigt, vilket fördyrar ammunitionen och troligen minskar dess effektivitet. Det är dock känt att rhenium substitutionellt löst i polykristallint volfram ökar segheten och ett mjukhetsmaxima vid en rheniumhalt på 5% rapporterades redan 1962 av Pugh m.fl.¹⁰. Flera andra undersökningar angående de mekaniska egenskaperna hos volfram och volfram/rheniumlegeringar diskuteras i en tidigare FOA-rapport¹¹. Mot bakgrund av ovanstående har ett antal riktade legeringar av volfram och rhenium undersökts med avseende på deras potential som projektilmaterial.

Experiment

De här undersökta materialen levererades av Russian Academy of Sciences¹² och bestod av cylindriska stavar med struktur, orientering och sammansättning enligt tabell I. Samtliga material uppges ha tillverkats med ”plasma-arc-zone-melting”-metoden. Materialet märkt C2 uppgavs ha en renhet på 99,99% och en maximal kornmissorientering på 1–3° samt en dislokationsdensitet på ca. 10^7 cm^{-2} . En tabell över samtliga material finns att tillgå i det tidigare nämnda arbetet¹¹. De erhållna materialen skulle enligt leverantören bestå av enkristaller med väldefinierad rheniumhalt.

Tabell I. Materialdata enligt leverans för de aktuella W-Re-legeringarna.

Materialkod	Re-halt (vikts-%)	Orientering
C2	0	[110]
9	4,8	[100]
6	1,9	[110]
1	1,9	[100]
13	4,8	[110]

Kristallorienteringsanalys

Undersökningen av kristallorienteringen gjordes av Institutet för Metallforskning (IM) med ”electron backscattering patterns” (EBSP) i ett fältemissionssvepelektronmikroskop (FEG-SEM). Proverna elektropolerades innan undersökning för att ta bort alla effekter av mekanisk provberedning. EBSP-tekniken gör det möjligt att analysera kristallorienteringen hos enskilda korn och skapa ”orientation maps” för att åskådliggöra resultaten.

Kemisk analys

Rheniumhalten var den eftersökta vid den kemiska analysen. Eftersom volfram och rhenium ligger så nära varandra vid en sammansättningsanalys är halterna svåra att kvantitativt separera med ett svepelektronmikroskop (SEM), och därför valdes en våtkemisk analysmetod. Denna utfördes på Institutet för Metallforskning och bestod i att proven syraupplöstes och analyserades med flamteknisk atomabsorptionsspektrofotometri (flame-AAS).

Metallografisk analys

Metallografiska analyser har gjorts dels i SEM på brottytan och dels ljusoptiskt på ett slipat, polerat och etsat längdsnitt.

Broattyorna studerades för att identifiera brottinitiering och eventuella korngränser i vilka brottet kan ha fortskridit, se figur 4. Broattyorna gav även information om rheniumtillsatsens påverkan på duktiliteten i själva brottet.

I ett ljusoptiskt mikroskop studerades sedan de slipade, polerade och Murakamitsade tvärsnitten.

Mekanisk provning

Baserat dels på tidigare arbete¹¹ och dels med hänsyn till den begränsade tillgången på provmaterial undersöktes materialens mekaniska uppförande under några olika töjningshastigheter och temperaturer.

Materialen har olika kristallografisk riktning och dessutom förhållandevis stor skillnad i rheniumhalt. Försök enligt tabel II genomfördes, där effekten av kristallorientering, rheniumhalt, temperatur och töjningshastighet på de mekaniska egenskaperna undersöktes.

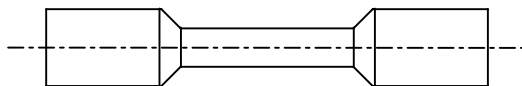
Tabell II. Försöksmatris med nominella töjningshastigheter och temperaturer vid experimenten.

Mtrl kod	Re-halt ^a (vikts-%)	Kristall-orientering ^b	Töjningshastighet / s ⁻¹						
			10 ⁻⁴	10 ⁻²					1
C2	0,6%	[110]	20°C	20°C	295°C	425°C	595°C		20°C
9	0,4%	[100]	20°C			403°C	625°C	810°C	
6	2,3%	[110]	20°C			398°C			
1	2,2%	[100]	20°C			399°C			
13	4,8%	[100]		20°C	298, 299°C				20°C

^a Dessa halter är enligt flame-AASanalyserna gjorda på IM, förutom för prov 13 som anges med leveransdata.

^b Kristallorientering enligt EBSD-analyser gjorda av IM.

Av de utvalda materialkombinationerna tillverkades provkroppar med hjälp av gnistning och slipning av företaget Mikroverktug i Södertälje. De färdiga provstavarna fick en geometri i enlighet med figur 3. Den centrala delen av provkroppen har en diameter på 2,00 mm och en längd på 8,0 mm, och provändarna består av M6-gängor.



Figur 3. Schematisk bild av den provkropsgeometri som användes vid dragproven.

Samtliga dragprov gjordes med en servohydraulisk mekanisk provningsmaskin som levererats och kalibrerats av MTS Corporation. En 10 kN-lastcell användes för att mäta kraft. För mätning av deformation användes den inbyggda lägesgivaren. Försöken gjordes i lägeskontroll med nominella töjningshastigheter på 10⁻⁴, 10⁻² och 1 s⁻¹. De nominella töjningar som redovisas är beräknade utifrån den inbyggda lägesgivaren och tar ej hänsyn till eventuella glapp eller elastisk deformation i maskin och kringutrustning. Av denna anledning kan töjningarna endast användas för inbördes jämförelse mellan de olika provkropparna.

För de dragförsök som utfördes vid högre temperaturer användes en induktionsugn för att värma proven. Induktionsugnen har en effekt på 5 kW och är ansluten till en IR-sensor för mätning av temperatur. IR-sensorn är kalibrerad i området 300–1100°C och provkropparna svärtades för att ge ett emissionstal på 0,85. Tidigare experiment tyder på att temperaturvariationen längs provkroppens liv är mindre än 5°C. Kalibreringsförsök där temperaturen på svärtade prov också mättes med termoelement gav skillnader mellan termoelement och IR-sensor på högst 10°C.

Resultat och diskussion

Kristallorienteringsanalys

En kristallorienteringsanalys genomfördes för att kontrollera uppgivna kristallorienteringar och i tabell III är undersökningen sammanfattad. I ett enkristallint material ska inga eller mycket små vinkelkorngränser uppmätas. De angivna vinklarna anger hur pass den önskade kristallstrukturen sammanfaller med provens längdaxel. I de fall sådana uppmätts räknas lågvinkelkorngränser som $<10^\circ$ och följaktligen är högvinkelkorngränser $>10^\circ$.

Tabell III. Materialdata enligt leverans för de legeringstyper som använts för mekanisk provning och kristallorienteringsanalys (EBSP).

Materialkod	Re-halt (vikts %)	Orientering	Resultat av EBSP
C1	0	[100] [100]*	Lågvinkelkorngränser finns 3°
1	1,9	[100] [100]*	Högvinkelkorngränser finns $10-28^\circ$
9	4,8	[100] [100]*	Lågvinkelkorngränser finns $4-5^\circ$
C2	0	[110] [110]*	Välriktade kristaller $<1,5^\circ$
6	1,9	[110] [110]*	Högvinkelkorngränser finns $8-19^\circ$
13	4,8	[110] [100]*	Högvinkelkorngränser finns $15-42^\circ$

**Kristallorientering enligt EBSP-analys*

Med hjälp av EBSP-analysen observerades att proverna inte uppfyllde kraven för enkristaller. De är polykristallina bestående av korn med i större eller mindre grad gemensamma kristallriktningar. Noterbart är även att prov nummer 13 har en kristallorientering som inte stämmer med leveransdata.

Kemisk analys

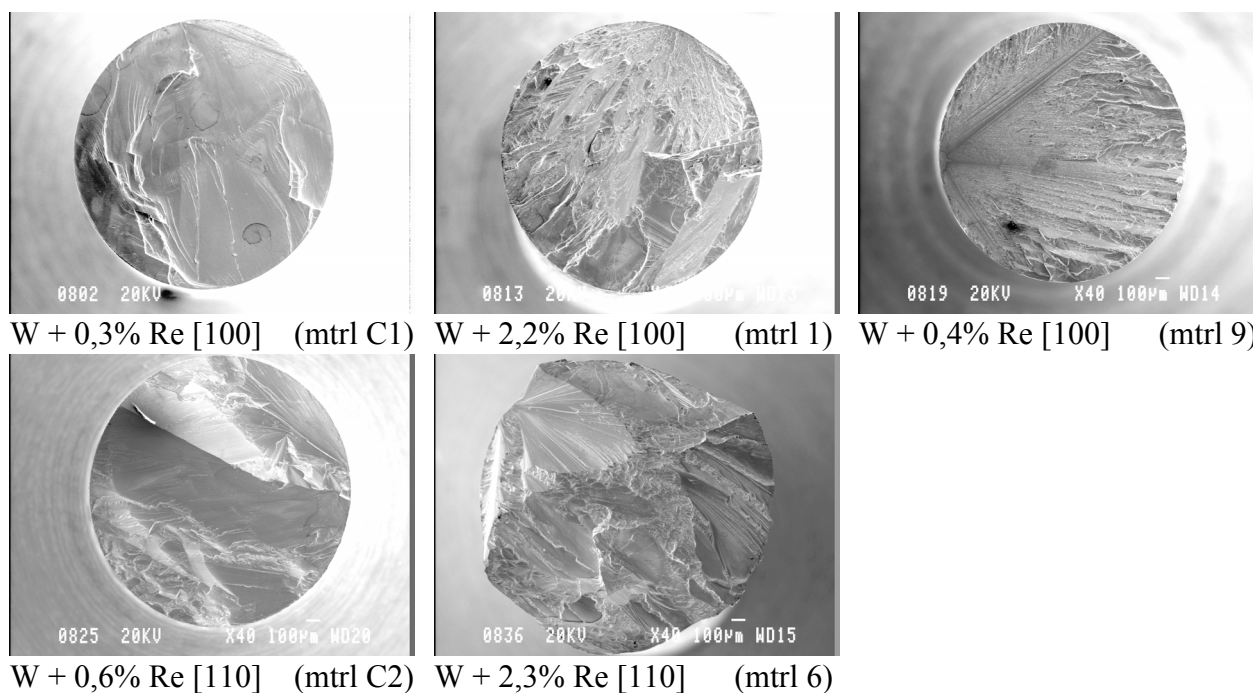
Halten av rhenium avvek från leverantörens specifikationer i samtliga prover, se tabell IV. Då det är svårt att analysera halten rhenium i volfram genomfördes dubbelprov.

Tabell IV: Kemiska analysdata och leveransdata.*

Materialkod	Orientering	Re-halt enligt leverans (vikts %)	Re-halt enligt flame-AAS (vikts %)
C1	[100]	0	0,28 0,32
1	[100]	1,9	2,19 2,17
9	[100]	4,8	0,38 0,47
C2	[110]	0	0,52 0,59
6	[110]	1,9	2,26 2,37

* Det kördes ingen kemianalys på prov 13 eftersom den visade sig ha felaktig orientering.

Metallografisk analys



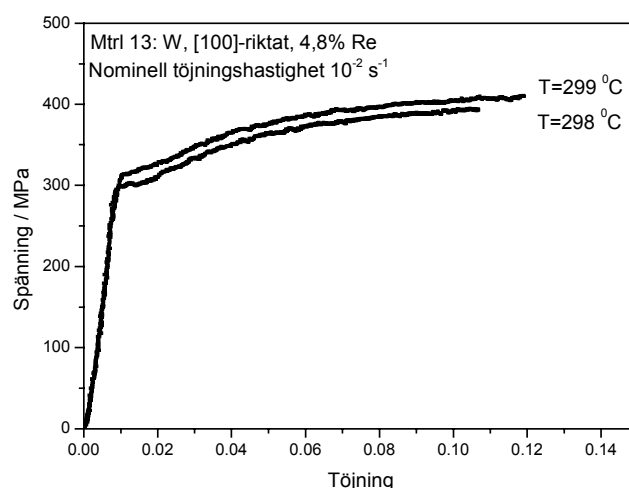
Figur 4. Bilder över brottytorna efter kvasistatiska dragförsök vid rumstemperatur tagna med 40x förstoring i ett SEM. Orienteringar enligt EBSD och Re-halt enligt flame-AAS-analys.

Ur SEM-bilderna på brottytorna i figur 4 kan ett något duktilare brottbeteende noteras för material 1 och 6, dessa har också något högre tillsatser av rhenium. I material 6 kan även en viss plastisk deformation noteras då provstaven inte längre är helt cylindrisk. Inget i brottytorna tyder på interkristallina brott utan de har uteslutande fortskridit transkristallint. I material 1 och 9 ser brotten ut att ha initierats på provstavens yta.

Ljusoptiskt studerades slipade, polerade och Murakamitsetsade längdsnittsytor. Etsningen ska framhäva orienteringsskillnader mellan intilliggande korn då de bryter infallande ljus olika. Något sådant kunde inte observeras, vilket bekräftar EBSP-analysernas resultat om likriktade korn.

Mekanisk provning

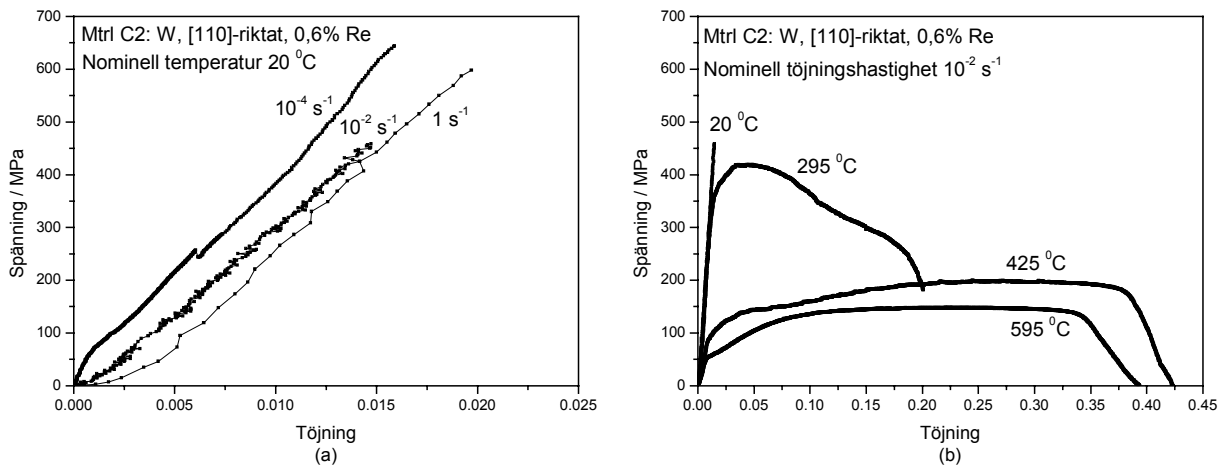
Det ringa antalet provstavar gör att det statistiska underlaget är bristfälligt. Den tidigare undersökningen¹¹ visar att vid rumstemperatur under kvasistatiska förhållanden sker spröda brott vid mycket små töjningar, skenbart utan föregående plastisk deformation, jämför med figur 4 ovan. Detta förhållande leder till stor spridning i bland annat uppmätt brottspänning. I ett försök att uppskatta osäkerheten vid försök utförda under högre temperaturer gjordes två försök på material 13 vid likartade betingelser. I figur 5 framgår att en väsentlig plastisk deformation har föregått brotten och att skillnaden i flytspänning och brotttöjning är ca 5% respektive 10%. Den skenbara E-modulen uppskattas i båda fallen till ca. 35-40 GPa. Om E-modulen för dessa material antas vara av samma storleksordning som för polykristallint volfram (400 GPa) leder detta till en korrigering (minskning) av de redovisade töjningarna på ca. 0.01.



Figur 5. Exempel på spridning i mätresultat under försök vid likartade betingelser.

Resultaten indikerar att osäkerheten i de uppmätta mekaniska storheterna för dessa material är väsentligt mindre vid förhöjd temperatur då deformationen sker på ett mera duktilt sätt.

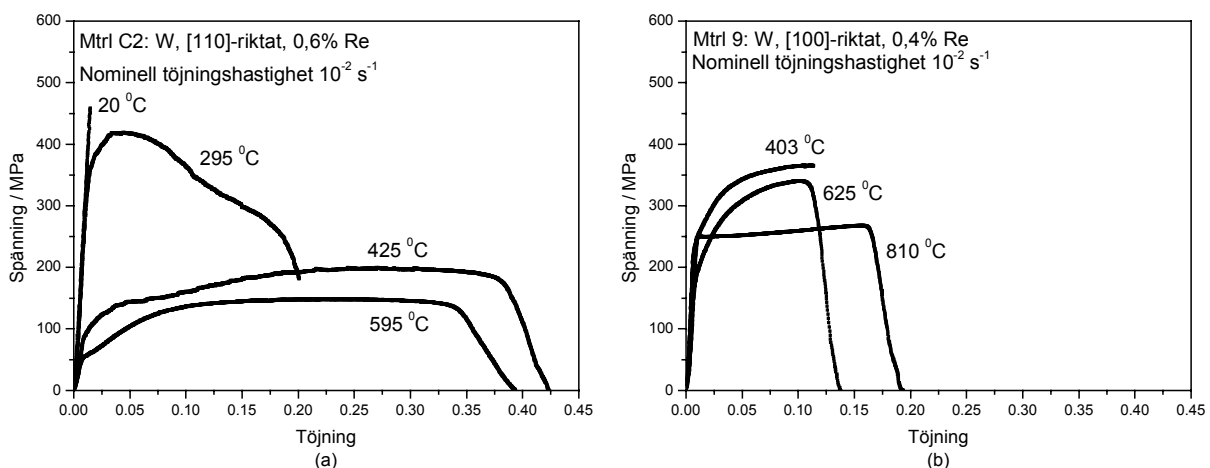
För material C2 med låg rheniumhalt och med välriktade kristaller med [110]-riktningen parallell med dragaxeln uppmättes följande spänning-töjningsdiagram då töjningshastighet och temperatur varierades, se figur 6.



Figur 6. Spänning-töjningssamband som funktion av töjningshastigheten vid rumstemperatur (a) och som funktion av temperaturen vid töjningshastigheten 10^{-2} s^{-1} (b) för prov C2.

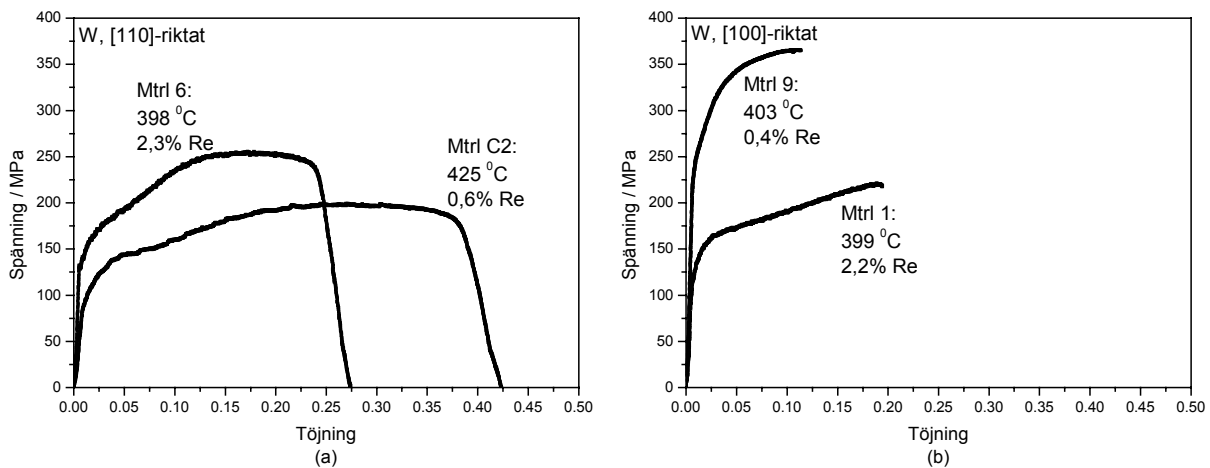
Det framgår att försöken utförda vid rumstemperatur, figur 6a, leder till ett sprött brott utan märkbar plastisk deformation oberoende av töjningshastighet. Däremot fås förhållandevis stor plastisk deformation före brott vid de förhöjda temperaturerna, figur 6b. Noterbart är också att vid samtliga försök vid högre temperaturer kan materialet uppta last även långt efter lokaliserad deformation och maximal pålagd kraft.

För att undersöka hur effekter av ändrad kristallriktning påverkar det mekaniska uppförandet utfördes ett antal kompletterande mätningar på material 9 där det tillgängliga provmaterialet medgav flera försök. I figur 7 ses att brotttöjningen är väsentligt större för [110]-riktade material, figur 7a, än de [100]-riktade, figur 7b. Detta gäller även vid förhöjda temperaturer. Däremot är flytspänningarna högre för det [100]-riktade materialet vid jämförbara temperaturer. I samtliga fall ökar dock töjningen vid brott med ökande temperatur samtidigt som brottspänningen minskar.



Figur 7. Spänning-töjningssamband som funktion av temperaturen för material där kornen har en [110]-riktning parallell med dragaxeln (a), respektive en [100]-riktning (b). Det [100]-riktade materialet har högre flytspänning och kortare brotttöjning än [110]-materialet vid jämförbara temperaturer.

Den tidigare undersökningen¹¹ samt resultaten ovan tyder på att vid rumstemperatur och under kvasistatiska förhållanden finns ingen märkbar effekt av ändrad rheniumhalt på spänning-töjningssambanden. I dessa fall sker spröda brott vid små töjningar och utan märkbar plastisk deformation. Av denna anledning gjordes ett antal försök vid förhöjda temperaturer på prover med varierande rheniumhalt och kristallriktning i avsikt att undersöka rheniumhaltens effekt på flytspänningen. I figur 8 framgår att material med [110]-riktningen parallell med dragprovriktningen har lastbärande förmåga även efter att maximal kraft uppnåtts oberoende av rheniumhalt och provet går av först efter avsevärd töjning, figur 8a. Motsvarande [100]-riktade kristaller töjs väsentligt mindre och brott sker mera momentant, figur 8b.



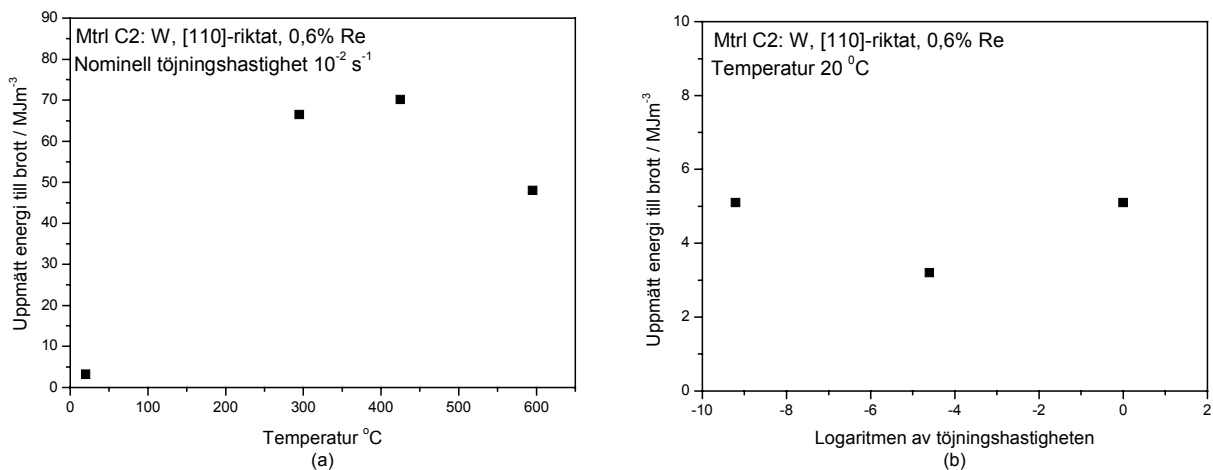
Figur 8. Effekten av ändrad rheniumhalt på flytspänningen vid töjningshastigheten $10^{-2} s^{-1}$ och en temperatur på ca 400 °C för material med kornens [110]-riktning parallell med dragprovriktningen (a) respektive [100]-riktning (b).

Detta resultat överensstämmer med det tidigare riktningsberoendet som redovisats i samband med figur 7. Intressant är också att för [110]-materialet ökar flytspänningen samtidigt som töjningen minskar med ökande rheniumhalt, medan det motsatta sker för [100]-riktade prov. Orsaken till detta är dock ej klarlagd, och vidare studier krävs för att verifiera dessa resultat.

Brott

Spröda brott, med ingen eller mycket liten plastisk deformation, ger ofta upphov till stor spridning i den uppnådda brottspänningen. I en tidigare rapport¹¹ redovisas bland annat att den uppmätta maximala brottspänningen under kvasistatiska förhållanden vid rumstemperatur för liknande material varierade mellan 443 och 644 MPa och uppnåddes utan märkbar plastisk deformation.

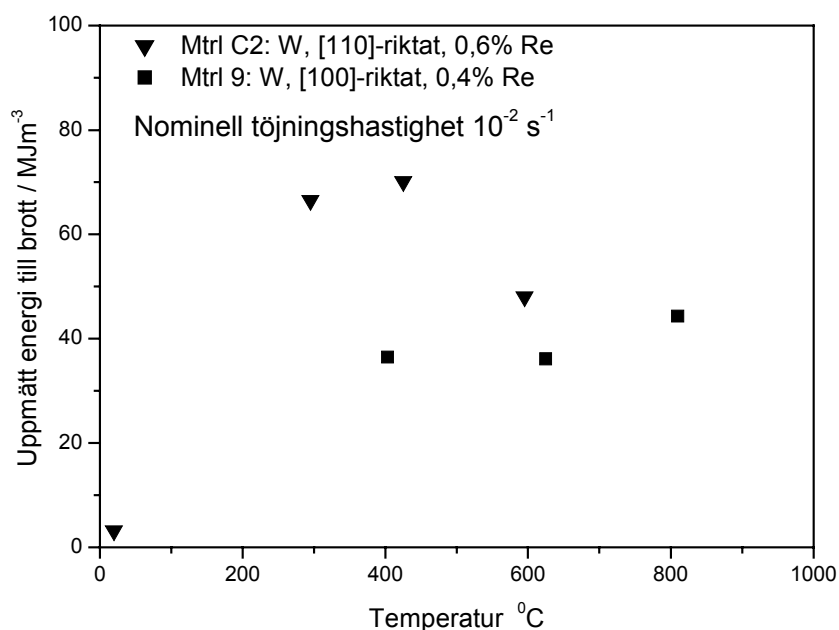
En ökad duktilitet vid rumstemperatur skulle väsentligt underlätta möjligheten att tillverka projektiler som på ett bra sätt klarar de stora accelerationer som uppstår vid utskjutning. För att få ett mått på vid vilken temperatur som omslag från sprött till duktilt brott sker har arean under spänning-töjningskurvorna fram till brott beräknats och i figur 9 redovisas resultaten som funktion av temperatur och töjningshastighet.



Figur 9. Deformationsenergin som funktion av temperatur (a) och töjningshastighet (b). Deformationsenergin ökar ca 10 ggr vid de högre temperaturerna jämfört med försöken vid rumstemperatur där den är ca 5 MJ/m³ oberoende av töjningshastighet.

Uppenbarligen sker ett omslag från sprött till duktilt brott vid en temperatur mellan 20 och 300 °C. För att bestämma transitionstemperaturen noggrannare krävs flera försök. Ett sätt att mäta duktilitet är att efter ett enaxligt dragprov beräkna areareduktionen vid brottet jämfört med originalarean. Rent polykristallint volfram har enligt litteratordata som redovisas av Dieter¹³ en maximal areareduktion på ca 80% som nås vid en temperatur på ca. 600 °C. Mätbar areaminskning efter brott fås först vid temperaturer i närheten av 200 °C och hälften av det maximala värdet uppnås vid ungefär 350 °C.

Proven visar också att deformationsenergin vid brott vanligen är större för materialet med [110]-riktningen parallell med dragprovriktningen än för [100]-materialet, se figur 10.



Figur 10. Deformationsenergin till brott som funktion av temperaturen för prov med kristallernas [100]-riktning (■) respektive [110]-riktning (▼) parallell med belastningsaxeln.

Magness med flera²⁻⁵ har, som nämnts, redovisat en teori där den bättre ballistiska förmågan hos projektiler av utarmat uran jämfört med "klassiska" volframtungmetallegeringar förklaras med materialens olika deformationsbeteende. Uran är känsligt för adiabatisk skjuvning och projektilmaterialet "skalas" därmed snabbt av vid små töjningar då deformationsenergin leder till en snabb lokal adiabatisk temperaturökning. På så sätt undviks svampbildning och diametern på hålskanalen blir liten medan penetrationsdjupet blir stort. De volframbaserade tungmetallerna har däremot ett stabilare deformationsbeteende vilket leder till större plastisk deformation före brott. Det sammanhängande plasticerade materialet ger en hålskanal med större diameter och därmed mindre penetrationsdjup. De ballistiska resultat som utförts på enkristaller vid Army Research Laboratory⁸ visade att projektiler av enkristaller med en [100]-riktning parallell med projektilaxeln gav en penetrationsförmåga jämförbar med uranprojektiler. Försök med projektiler av enkristaller i [110]-riktningen gav däremot inga förbättrade ballistiska egenskaper, se figur 2.

Experimenten utförda vid rumstemperatur som redovisats här karakteriseras samtliga av att dragprovstaverna går av sprött och sker utan föregående plastisk deformation. Detta leder till stor spridning i brottspänning och svårigheter att på ett bra sätt kunna karakterisera materialets plastiska egenskaper. De försök som genomförts vid förhöjda temperaturer visar däremot på tydliga skillnader i deformationsbeteende beroende på kristallorientering. Samtliga prov där kornens [100]-riktning är parallell med dragprovriktningen töjs mycket mindre och vanligen vid något högre spänningar än motsvarande [110]-riktade prov. De [110]-riktade proven uppvisar ofta lastupptagande förmåga vid töjningar långt efter uppnådd brottspänning och den nominella spänningen är låg då brott slutligen sker. Den uppmätta deformationsenergin fram till brottpunkten är också högre för [110]-riktade material. Detta indikerar att det deformationbeteende som uppvisas för [100]-riktade kristaller bör gynna penetrationsförmågan relativt [110]-orienterade prov. Effekten av att legera materialet med rhenium på de mekaniska egenskaperna är oklar. De första försöken tyder på att rhenium i [110]-material ökar flytspänningen medan det motsatta sker i [100]-orienterade prov.

Slutsatser

- Material 13 hade felaktig noterad kristallorientering i leveransdata. Alla materialen var dessutom inte enkristaller som utlovats, utan mer eller mindre välriktade polykristallina material.
- Rheniumhalterna som angivits i leveransspecifikationerna avvek i flera fall från de uppmätta. På grund av de erkända svårigheterna med att analysera rhenium i volfram undersöktes dubbelprov för att kontrollera spridningen i de enskilda proverna. Då dessa uppvisar en förhållandevis låg inbördes spridning antas att de är mer trovärdiga än de rheniumhalter som redovisats som leveransdata.
- Trots felaktiga leveransdata har detta inte påverkat möjligheterna att utföra och värdera de planerade analyserna.
- Resultaten från den metallografiska analysen tyder på att rheniumtillsatsen ger ett mera duktilt brott.
- Den mekaniska provningen visar att vid rumstemperatur sker brott vid mycket små töjningar. Under förhöjda temperaturer går däremot [100]-riktade prov av vid lägre töjningar än [110]-riktade prov, vilket skulle kunna leda till bättre ballistiska egenskaper för projektiler med en [100]-riktning parallell med projektilaxeln.
- Även om de ballistiska egenskaperna för volframlegeringar kan förbättras med ”flödesanisotropimetoden” kvarstår problemen med materialens sprödhet vilket t.ex. kan leda till brott under utskjutning.

Vidare arbete?

Enligt ovan har en av två olika angreppsmetoder för att förbättra de ballistiska egenskaperna hos volfram undersökts, ”flödesanisotropimetoden”. Den andra metoden bygger på att påverka ”flödesmjuknandet” genom att utveckla en isotrop och mera plastiskt instabil matris så att ett deformationsbeteende liknande uranlegeringarnas uppnås. Detta är ett intressant område och innebär en alternativ väg för att komma vidare i forskningen kring ballistiska egenskaper för volframbaserade projektilmaterial.

I det följande diskuteras mycket kortfattat de olika material och materialkombinationer som undersökts och presenterats i den öppna litteraturen^{5, 14}.

Flödesmjuknandemetoden

De nya matrismaterialen är ofta valda på basis av känsligheten för adiabatisk skjuvning, dit hör t.ex. titanlegeringen (Ti6Al4V) som med sin höga hållfasthet och låga värmekapacitet ofta deformeras lokalt vid snabba belastningar. Det finns även undersökningar där andra mera okonventionella matrismaterial som förmodas vara känsliga för adiabatisk skjuvning har undersökts, bland annat nanokristallina och amorfa legeringar. De första resultaten på en nanokristallin volframkomposit har gett lovande resultat med bättre ballistiska egenskaper än en klassisk volframlegering trots väsentligt lägre densitet¹⁴.

En mängd undersökningar av legeringar baserade på volfram-stål, volfram-zirkonium och volfram-hafnium finns redovisade i litteraturen⁵. De flesta legeringarna med stål eller zirkonium har förkastats på grund av inga eller små förbättringar av de ballistiska egenskaperna. Många av dessa legeringar bildar också spröda intermetalliska faser. Med hjälp av fastfassintring och pålagt tryck, för att undertrycka bildandet av spröda intermetalliska faser, har ett par volfram-stål-legeringar (80%W) visat på förbättringar i de ballistiska egenskaperna jämfört med konventionella W-legeringar. Vad beträffar volfram-hafniumlegeringar fanns lyckade ballistiska försök där penetrationsförmågan var bättre än jämförbara klassiska volframprojektiler, men dock ej lika bra som uranbaserade penetratorer. Projektillegeringen, 80%W, 20%HB3, där HB3 är en hafniumlegering, uppvisade en gränshastighet på 1350 m/s medan en kommersiell tungmetallegering hade 1390 m/s och uranprojektiler ca. 1300 m/s. I dessa försök var projektilernas massa ca 65 g med L/D=15 och målet var ett RHA-stål. I tabell V nedan sammanfattas några av resultaten från litteraturen.

Tabell V. Relativ penetrationsförmåga för ett antal olika okonventionella matrislegeringar för tunga projektiler⁵.

Legering	Penetration jämfört med konventionell WHA-legering
80%W, 20%Ti	Ingen förbättring
80%W, 20%Ti6Al4V	Ingen förbättring
85%W, 15%Ti6Al4V	Något bättre
90%W, 10%Ti6Al4V	Något bättre
95%W, 5%Ti6Al4V	Dålig, hög porositet
90%W, 5%Ti, 5%Hf	Ingen förbättring
80%W, 20%HB3*	Bättre

* HB3 är en hafniumlegering

Dynamisk provning

Eftersom vissa projektilmaterial deformeras adiabatiskt under höga töjningshastigheter används ofta olika typer av Hopkinsonprov för att utvärdera och jämföra olika intressanta materialkombinationer. Hopkinsonprovning i kompression har visat sig ge möjlighet att rangordna materialen på samma sätt som vid ballistiska tester. Magness och Lopatin⁷ har visat att måttet ”strain to load drop” är en god indikator på legeringarnas relativa ballistiska förmåga. Weerasooriya och Magness⁶ har vidare konstaterat att vrid-Hopkinsonförsök inte ger samma tydliga koppling till ballistiskt beteende. Detta troligen på grund av att vrid-Hopkinsonförsök sker utan hydrostatiskt tryck. Uranlegeringar under dynamisk kompression blir termomekaniskt instabila vid relativt låga värden på kompressionstöjningen, resulterande i adiabatisk skjuvning och brott. Detta överensstämmer med de ballistiska försöken där delar av projektilen snabbt skalas av. Volframlegeringar uppnår istället höga kompressionsgrader utan katastrofalt brott vilket kan korreleras till deras stabila deformationssätt under penetration. Under vridning däremot så har både volfram- och uranlegeringar likvärdiga töjningar till brott.

Framtida material

Det nya sökta projektilmaterialet bör ha följande karakteristika för att bli känsligt för adiabatisk skjuvning.

- Hårt, för att få en hög värmeutveckling för en given plastisk töjning.
- Snabbt termiskt mjuknande, det vill säga låg värmekapacitet så att en given värmeutveckling resulterar i en hög temperatur lokalt.
- Lågt deformationshårdnande och lågt töjningshastighetshårdnande, eftersom dessa effekter motverkar det termiska mjuknandet.

Samtliga punkter ovan syftar till att snabbt uppnå den instabilitetpunkt då det termiska mjuknandet ger ett lika stort bidrag till flytspänningen som de olika mekanismerna för hårdnandet.

De framtagna materialen måste dock också kunna motstå de accelerationer som uppstår i samband med utskjutning. Möjligen är ”flödesmjuknandemetoden ett lämpligt alternativt angreppssätt för att kunna framställa projektilmaterial med egenskaper som kan uppfylla även dessa krav utan inkapsling eller dylikt. En första karakteriseringen och utvärdering kan relativt snabbt göras med Hopkinsonförsök.

Referenser

1. L. S. Magness, A phenomenological Investigation of the Behaviour of High-Density Materials Under the High Pressure, High Strain Rate Loading Environment of Ballistic Impact, John Hopkins University, USA, 1992.
2. L. S. Magness och T. G. Farrand, Deformation Behavior and its Relationship to the Penetration Performance of High-Density KE Penetrator Materials, Proc. of 1990 Army Science Conference, Durham, NC, USA, 1990.
3. L. S. Magness, D. Kapoor och R. Dowding, Novel Flow-Softening and Flow Anisotropy Approaches to Developing Improved Tungsten Kinetic Energy Penetrator Materials, Army Science Conf., Orlando FL, USA, 1994.
4. W. Leonard, L. S. Magness och D. Kapoor, Improving Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloy Composites through Thermomechanical Processing, Int. Conf. on Tungsten and Tungsten Alloys, Arlington, VI, USA, 1992.
5. L. S. Magness och D. Kapoor, Tungsten Composite Materials with Alternative Matrices for Ballistic Applications, Proc. of 2000 Int. Conf. on Tungsten, Hard Metals, and Refractory Alloys, Annapolis, ML, USA, 2000.
6. T. Weerasooriya och L. S. Magness, High Rate Testing of Kinetic Energy Penetrator Materials, EXPLOMET 95, El Paso, TX, USA, 1995.
7. L. S. Magness och C. Lopatin, Split Hopkinson Compression Screening Tests of High Density Penetrator Materials, Proc. Army Symp. on Solid Mechanics, MA, USA.
8. L. S. Magness, W. A. Leonard, D. Kapoor, M. Chung och J. Trogolo, The Performance and Deformation Behaviour of Oriented Columnar-Grained Tungsten Polycrystalline Penetrators, ARL-TR-1666, 1988
9. W. J. Bruchey, E. J. Horwath och W. R. Rowe, The Effect of Crystallographic Orientation on the Performance of Single Crystal Tungsten Subscale Penetrators, ARL-MR-89, 1993.
10. J. W. Pugh, L. H. Amra och D. T. Hurd. "Properties of Tungsten-Rhenium Lamp Wire" Trans. ASM, 55, 1962.
11. P. Skoglund och S. J. Savage, Inledande mekaniska studier av riktade volfram-rheniumlegeringar, FOA-R--00-01774-310--SE, November 2000.
12. Russian Academy of Sciencis, Baikov Institute of Metallurgy, Leninsky prospekt, 49, Moskva, 117911, Ryssland.
13. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3 ed., ISBN 0-07-100406-8, McGraw-Hill Book Company, 1988.
14. L. Magness, L. Kecskes, M. Chung, D. Kapoor, F. Biancianello och S. Ridder, Behavior and Performance of Amorphous and Nanocrystalline Metals in Ballistic Impact, Int. Symp. of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001.