

Lennart Carlsson

# Bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer

NUTEK-utredning 1991

## Abstract

### Determination of high-temperature mechanical properties NUTEK-Report 1991

Together with industry, NUTEK (the National Board for Industrial and Technical Development) is at present investigating programme proposals for an international selected programme area in the field of advanced high-temperature materials. On the basis of the proposed projects, it is possible to identify the more specific and common R&D areas of the programme. Analysis indicates that almost all projects include investigations of high-temperature corrosion/erosion and determination of mechanical properties at high temperatures. The High-temperature Corrosion/Erosion project suggests that a centre should be established for this field, at a site determined by the main thrust of the work regarded as most important.

The determination of Mechanical Properties at High Temperatures project, which is described here, has identified requirements associated with high-temperature testing of mechanical properties. The work has also included a survey of existing resources and proposals for concentration on certain neglected areas. It is hardly realistic to suggest that a centre for high-temperature testing of mechanical properties should be established from scratch; instead, it is suggested that work could be carried out at individual laboratories working closely together in order to benefit from coordination.

The survey shows that there are several institutions having suitable facilities for the determination of characteristics such as flexural strength, fracture toughness, creep and static fatigue at high temperatures. However, facilities for testing cyclic/dynamic fatigue under severe conditions, testing resistance to thermal shock and tribological investigations are limited, and so it is suggested that effort should be concentrated on these three areas.

**Key words:** R&D frame programme, advanced materials, mechanical properties, high-temperature testing

SP  
SP RAPPORT 1991:49  
ISBN 91-7848-307-7  
ISSN 0248-5172  
Borås 1991

Swedish National Testing and  
Research Institute  
SP REPORT 1991:49

Postal address:  
Box 857, 501 15 Borås,  
Sweden  
Telephone +46 33 165000  
Telex 36252 Testing S  
Telefax +46 33 135502

# Innehållsförteckning

	sida
Abstract	2
Innehållsförteckning	3
Förord	4
Sammanfattning	5
1 Inledning med bakgrund	7
2 Krav på provning	9
3 Karakterisering av mekaniska egenskaper vid hög temperatur	10
4 Nationella resurser för provning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer	16
5 Analys	18
6 Förslag	19
7 Referenser	20

## Förord

NUTEK utreder för närvarande förutsättningarna för att skapa grunderna för ett kommande ramprogram inom området avancerade högtemperaturmaterial för användningstemperaturer över 1000°C. Aktuella material är intermetaller och högpresterande keramer samt kompositer baserade på dessa. Målet för ramprogrammet är att stödja svenska högteknologiska tillverknings- och avnämningarindustrier genom att skapa en internationellt konkurrenskraftig FoU-bas i Sverige på ett framtida nyckelområde och därigenom uppnå strategiska fördelar på den nationella och internationella marknaden. Utredare har varit professor Thommy Ekström, Sandvik Hard Materials AB.

En analys av de föreslagna projekten visar att undersökningar av högtemperaturkorrosion/erosion samt bestämning av mekaniska egenskaper ingår i nästan alla de föreslagna projekten. Referensgruppen för utredningen har därför föreslagit att dessa två områden skulle bli föremål för särskilda satsningar. Som underlag för dessa har NUTEK låtit ta fram två separata mindre utredningar som redovisas i denna rapport "Bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer" samt i rapporten "Högtemperaturkorrosion/erosion", SP RAPPORT 1991:48.

## Sammanfattning

NUTEK utreder för närvarande i samråd med industrin programförslag för ett internationellt inriktat ramprogram rörande avancerade högtemperaturmaterial. Med utgångspunkt från de föreslagna projekten kan en analys göras för att särskilja de mer specifika och gemensamma FoU-områden som ingår i programmet. Man finner då att undersökningar av högtemperaturkorrosion/erosion samt bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer ingår i så gott som samtliga projekt. I utredningen "Högtemperaturkorrosion/erosion" föreslås att ett centrum skall inrättas på området, och att lokaliseringen bör bestämmas av inriktningen på den forskning som anses vara mest angelägen.

I den nu redovisade utredningen "Bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer" har identifierats krav som är förknippade med högtemperaturprovning av mekaniska egenskaper, vidare en inventering av befintliga resurser samt förslag till satsningar på vissa bristområden. Det är knappast realistiskt att föreslå nyskapandet av ett centrum för högtemperaturprovning av mekaniska egenskaper utan det föreslås att satsningarna skulle kunna göras vid skilda laboratorier som arbetar nära tillsammans för att medge samordningsvinster.

Inventeringen visar att det finns ett flertal institutioner har resurser för att kunna bestämma egenskaper som böjhållfasthet, brottseghet, krypning och statisk utmattning även vid höga temperaturer. Man finner emellertid att resurser för provning av dynamisk/cyklisk utmattning i krävande miljö, provning av termochockresistens samt tribologiska undersökningar är begränsade. Det föreslås därför att satsningarna koncentreras till dessa tre områden.

När det gäller teknikområdet cyklisk/dynamisk utmattning bedöms att de bredaste resurserna finns vid SP och att man i första hand bör stärka dessa befintliga resurser.

Inom området undersökningar av termochockbeständighet finns idag verksamhet vid KTH, Keramteknologi och även här föreslås att befintliga resurser förstärks.

På området tribologi vid höga temperaturer finns idag ingen etablerad verksamhet inom landet. Institutionen för Teknologi vid Uppsala Universitet har verksamhet inom området upp till 1000°C. Genom utökade resurser skulle arbetsområdet kunna utökas även till högre temperaturer.



## 1 Inledning och bakgrund

NUTEK utreder för närvarande i samråd med industrin programförslag för ett internationellt inriktat insatsområde rörande avancerade högtemperaturmaterial (Ref 1). Målet för ramprogrammet är att stödja svenska högteknologiska tillämpnings- och avnämningarindustrier genom att skapa en internationellt konkurrenskraftig FoU-bas i Sverige för ett framtida nyckelområde, och därigenom uppnå strategiska fördelar på den nationella och internationella marknaden.

Detta kan ske genom en långsiktig utveckling av en riktad specialistkompetens inom material-, process- och produktionsteknik inom området AVANCE-RADE HÖGTEMPERATURMATERIAL, genom internationellt samarbete och genom att främja utprovning och komponenter eller system där dessa material ingår. I första hand avses i utredningen material med applikationstemperaturer över 1000°C, som intermetaller, högpresterande konstruktionskeramer samt kompositer baserade på dessa. Områden där avancerade högtemperaturmaterial förväntas få en allt större betydelse är inom förbränningsbaserad kraft- och värmeproduktion, flyg- och rymdindustri samt för olika motorapplikationer. Skälen för utvecklingen mot konstruktioner med förhöjda arbetstemperaturer är främst ökad verkningsgrad och därmed minskad energiförbrukning samt minskade skadliga utsläpp till miljön.

Utredaren har i samråd med svensk industri formulerat ett antal projektförslag inom området avancerade högtemperaturmaterial. De tio projektförslagen har följande titlar;

- Ultra high temperature engineering ceramics
- Nickelaluminider för högtemperaturapplikationer
- Järnaluminider för högtemperaturapplikationer
- Fina pulver för formsprutning
- Avancerade högtemperaturmaterial för gasturbiner
- Keramiska plattor för renare förbränning
- Termiska barriärer
- Keramiska kompositmaterial för metallskär
- Dysmaterial för robotvapen
- Keramiska whisker(fiber)förstärkning för kompositmaterial

Med utgångspunkt från de föreslagna projekten kan en analys göras för att särskilja de mer specifika och gemensamma FoU-områden som ingår inom området. Man finner då att undersökningar av högtemperaturkorrosion/erosion samt bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer ingår i så gott som samtliga projekt.

I den parallella NUTEK-utredningen "Högtemperaturkorrosion/erosion" har utredarna identifierat behovsområden och befintliga resurser (Ref 2). Man föreslår att ett centrum för högtemperaturkorrosion/erosion skall inrättas och att dess lokalisering bör bestämmas av inriktningen på den forskning som anses var mest angelägen. En lokalisering till CTH/GU innebär en inriktning mot problem i fluidiserade bäddar, medan en lokalisering till KTH/SU innebär en mer forskningsmässig inriktning mot studier av korrosion/oxidation. Med en lokalisering till ett industriellt projekt, som Volvo Flygmotors sprutformningsprojekt, fås en tillämpad inriktning mot i detta fall korrosion i gasturbiner.

Under det pågående utredningsarbetet rörande avancerade högtemperaturmaterial har utredaren funnit att det finns ett behov av ett generellt utvärderingsprojekt eller program inom området avancerade högtemperaturmaterial med inriktning mot bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer och i krävande miljöer. Detta skulle omfatta egenskaper som bl a brott-hållfasthet, brottseghet, krypning, utmattning och nötning. Det program som idag finns inom IEA-samarbetet mellan USA, Tyskland, Japan och Sverige, är huvudsakligen inriktat på rumstemperaturegenskaper. En naturlig inriktning på en eventuell fortsättning på IEA-samarbetet inom keramområdet borde vara jämförande undersökningar av mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur.

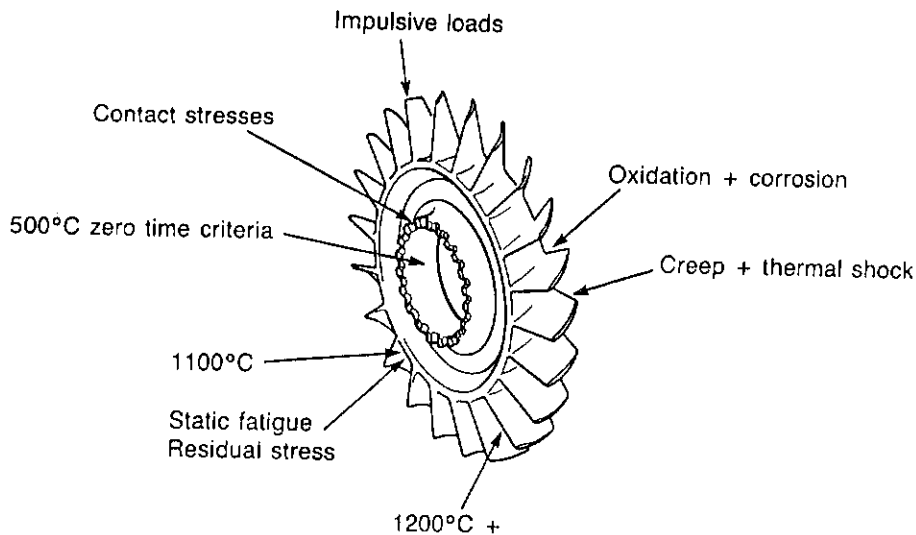
Intresset för att delta i en COST-ansökan inom området undersöks för närvarande. En liknande förfrågan om behovet av FoU-insatser för "Advanced Materials for Temperatures above 1500°C cirkulerar för närvarande inom Europa. Även i detta fall undersöks intresset från svensk sida för ett deltagande i en ansökan.

Avsikten med den här presenterade utredningen är närmast att identifiera de krav som är förknippade med provningar av avancerade högtemperaturmaterial, samt presentera förslag för hur befintliga resurser bäst kan gemensamt utnyttjas för karakterisering av materialegenskaper vid de höga temperaturer som avses i utredningen "Avancerade Högtemperaturmaterial".



## 2 Krav på provning

Provning av högtemperaturmaterial med avseende på mekaniska egenskaper utgöres av två skilda moment. Det första är inriktat mot en materialutvecklingsfas, dvs framtagning av mätvärden för bedömning av kemi, mikrostruktur och egenskaper. Det andra innebär en generering av data för konstruktören, för att tjänstgöra som underlag för en konstruktion. En databasgenerering av materialegenskaper i likhet vad man idag har för metaller och polymerer måste därför vara en ytterst angelägen uppgift för forskare inom området avancerade högtemperaturmaterial som tillägg till en provning i utvecklingsfasen. En konstruktör måste adekvat kunna säkerställa livslängd och funktion av en komponent i en konstruktion där säkerhet och temperatur är kritiska. En illustration av de påfrestningar som delar av en turbinmotor utsetts för visas i nedanstående bild. Illustrationen är hämtad från "Mechanical Testing of Engineering Ceramics at High Temperatures", Elsevier Applied Science, London, 1989 (Ref 3).



Figur 1 Environmental considerations for a ceramic bladed disc (BLISC).

### 3 Karakterisering av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer

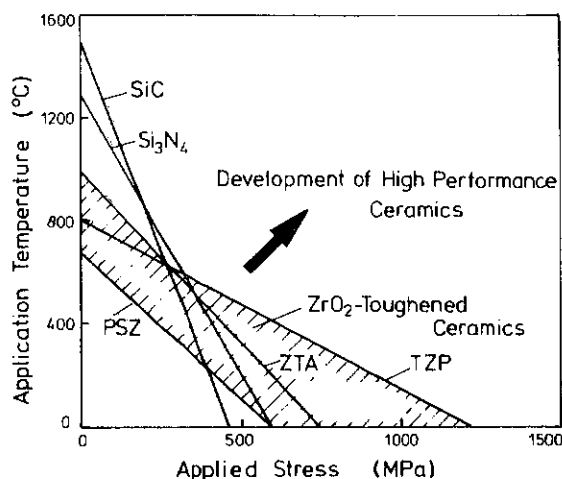
För att kunna konstruera komponenter utförda i avancerade material för höga temperaturer, fordras kännedom om ett antal materialegenskaper, som:

- Elastiska egenskaper
- Brotthållfasthet och statistisk analys av brott
- Töjgräns
- Slaghållfasthet
- Brottseghet
- Långsam spricktillväxt
- Krypning
- Livslängd under statisk last
- Hårdhet
- Nötningsenskaper
- Egenskapspåverkan av korrosion/erosion
- Termochockresistens
- Termisk utmattning
- Cyklisk utmattning

För konstruktören kan det vara angeläget att ha kunskap om flertalet av dessa högttemperaturegenskaper. Några av de viktigaste är hållfasthet och brottseghet, långsam spricktillväxt och krypning samt livslängd under statisk respektive cyklisk belastning.

#### 3.1 Mekanisk hållfasthet

Utvecklingen av avancerade högtemperaturmaterial är inriktad mot att optimera maximalt tillåtna värden på temperatur och belastning. Utvecklingen för avancerade keramer illustreras av figur 2 (Ref 4).



Figur 2 Schematic diagram indicating the potential application range of some engineering ceramics (Claussen, 1985).

**Draghållfasthet** kan experimentellt bestämmas på ett flertal olika sätt. En ren dragbelastning används normalt för duktila material, då eventuella snedbelastningar eller spänningskoncentrationer kan elimineras genom plastisk deformation.

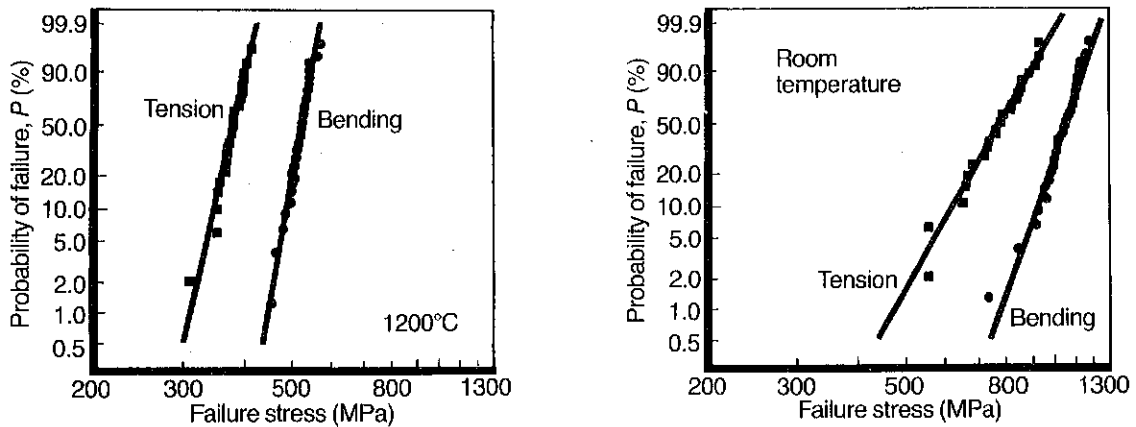
Spröda material som keramer eller intermetaller, karakteriseras vanligen inte genom axiell dragbelastning, beroende på den höga kostnaden för framställning av dragprovstavar samt kravet på extremt god upplinjering av provet i dragprovmaskinen. Snedbelastningar leder till ett böjande moment och därmed spänningskoncentrationer i ytan av provet som resulterar i en osäkerhet i bestämningen av dragbrottspåningen.

Hållfastheten hos spröda material karakteriseras oftast genom böjprovning, där spänningen varierar från ren dragspänning till ren kompression över provstavens tvärsnitt. Skälen till att man oftast väljer böjprovning är dels den lägre kostnaden för provstavar, dels den betydligt enklare provningen. Framställningskostnaden för en böjprovstav av exempelvis HIP kiselnitrid är lägre än 500 SEK, medan en dragprovstav kostar ca 5000 SEK. För att kunna göra en erforderlig statistisk analys av resultaten fordras ca 30 provstavar, innebärande att en utvärdering i drag blir betydligt kostsammare än i böjning. I båda fallen kan en konventionell statisk belastningsmaskin användas för belastningarna.

Förutsättningen för att använda böjprovning för att bestämma hållfastheten är att materialet är isotropt med avseende på de mekaniska egenskaperna. Detta gäller i stort sett för monolitiska keramer och intermetaller eller kompositer av dessa, med så små förstärkningspartiklar eller korta fibrer att de mekaniska egenskaperna är lika i olika riktningar. För kompositer med långa fibrer måste man ta hänsyn till isotropin vid bestämning av hållfastheten, varför axiell dragbelastning kan vara den enda lösningen.

**Högtemperaturhållfasthet** bestäms också vanligen genom böjprovning. Kommersiella provriggar finns på marknaden för ca 30 000 SEK. Riggarna är vanligen utförda i aluminiumoxid eller kiselkarbid och kan användas upp till 1500°C i luft. I inert atmosfär eller i vakuum undviks problemen med oxidation av kiselkarbid och dessutom möjliggörs användning av grafit för delar av belastningsriggen, vilken då blir billigare i framställning samtidigt som temperaturområdet utökas.

Mät noggrannheten minskar med ökande temperatur, dels som en följd av ökad friktion vid belastningspunkterna, dels av ökade svårigheter med att uppnå en korrekt upplinjerig. Det finns därför behov av att kunna göra dragbelastningar vid höga temperaturer, trots de ökade kostnaderna jämfört med böjprovning. Fördelarna är bl a att man undviker friktionseffekter samt att man provar en relativt stor volym av provet. Ytterligare en fördel är att det är lättare att undersöka materialens korrosionsbeständighet under belastning vid höga temperaturer vid ett dragprov. Att man emellertid kan erhålla likvärdiga resultat vid böj- respektive dragprovning vid höga temperaturer illustreras av nedanstående figur. I undersökningen fann man att Weibullmodulen bestämd genom drag- respektive böjprov överensstämde vid hög temperatur, medan den avvek för resultaten vid rumstemperatur (Ref 5).



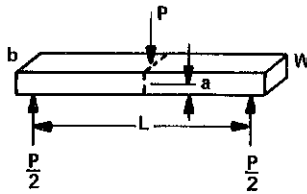
Figur 3 (a) Direct tension and flexure strength of hot-pressed silicon nitride at (a) 1200°C and (b) room temperature. Weibull volume correlation fitted well at 1200°C, but not at room temperature. (After Ohji *et al.*<sup>93,94</sup>)

### 3.2 Brottseghet

Enligt linjär elastisk brottmekanik finns en materialparameter,  $K_C$ , vilken kontrollerar initieringen av brott. Under vissa villkor kan detta kritiska värde anses vara en materialkonstant, brottsegheten. Ju högre värde på  $K_C$ , ju högre belastning fordras för att propagera en spricka.

Det finns ett flertal experimentella metoder att bestämma brottsegheten, vilka huvudsakligen bygger på böj- eller dragbelastningar. De vanligaste provgeometrierna visas i nedanstående figur, vilken hämtats från "Modern Ceramic Engineering" (Ref 6) och bygger på en artikel av Evans (Ref 7).

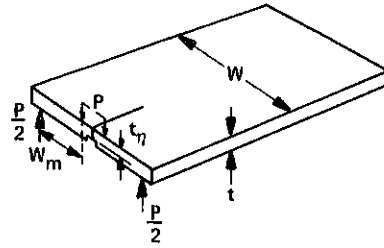
(a) SINGLE-EDGE NOTCHED BEAM (SENB) SPECIMEN



$$K_I = Y \frac{3PL}{2bW^2} \sqrt{a}$$

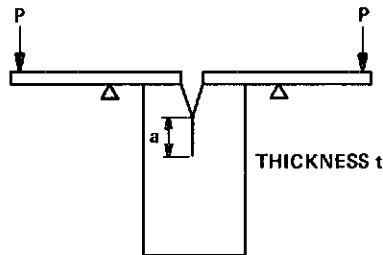
$$Y = 1.96 - 2.75 \left(\frac{a}{W}\right) + 13.66 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 23.98 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.22 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

(b) DOUBLE TORSION (DT) SPECIMEN



$$K_I = PW_m \left[ \frac{3(1+\nu)}{Wt^3t_\eta} \right]^{1/2}$$

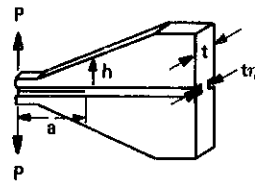
(c) CONSTANT-MOMENT SPECIMEN



$$K_I = \frac{\text{MOMENT}}{\sqrt{It}}$$

I IS INERTIA OF ONE ARM.

(d) TAPERED DOUBLE CANTILEVER BEAM (TCB) SPECIMEN



$$K_I = 2P \left( \frac{I_m}{tt_\eta} \right) \quad M = \frac{1}{t} + \frac{3a^2}{h^3}$$

Figur 4 Techniques for experimental determination of mode I stress intensity factor. (Compiled from A. G. Evans, Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 1, Plenum Publishing Corp., New York, 1974, pp. 25-26.)

Då de experimentella bestämningarna är baserade på böj- eller dragbelastningar, gäller för brottseghetsbestämningar samma krav som för bestämning av hållfasthet. För att undvika effekter av krypning och/eller långsam sprick-tillväxt, måste utrustningen medge provningar vid höga belastningshastigheter.

### 3.3 Krypning

Krypning är en mekanism för plastisk deformation under bibehållen belastning vid höga temperaturer. Kryp genom korngränsglidning eller diffusion kan äga rum utan att en kritisk spricka bildas.

Krypning av avancerade material vid höga temperaturer har oftast studerats genom böjprovning p g a låg kostnad och det tekniskt enkla provningsförfarandet. En konstant kraft (döda vikter) appliceras på belastningsriggen, vanligen 4-punkts böj, som en approximation till en konstant spänning. Problemet är att spänningen ej är konstant under provningen. Provstaven är utsatt för olika spänningar över tvärsnittet. Då kryphastigheterna i drag respektive tryck är olika, leder detta till mätfel. Enligt Quinn och Morrell (Ref 8) bör krypning vid höga temperaturer experimentellt ej studeras genom böjning utan genom dragbelastning.

För att studera krypning vid höga temperaturer fordras utrustning för att bestämma töjningen som funktion av tiden. Den vanligaste metoden är med användande av extensiometrar. Problemet vid höga temperaturer är den mekaniska kontakten mellan provstav och givare. Utvecklingen går alltmer mot användande av optisk beröringsfri töjningsmätning.

### 3.3 Långsam spricktillväxt

Långsam spricktillväxt är en mekanism för tillväxt av en spricka i materialet. Detta kan leda till, liksom vid krypning, att materialet vid långtidsbelastning brister vid åtskilligt lägre belastning än vid snabbrott. Långsam spricktillväxt kan uppträda oberoende av krypning som vid exempelvis spänningskorrosion. I detta fall äger korrosion rum i sprickspetsen resulterande i spricktillväxt. Denna kan också äga rum som en följd av korngränsglidning. Långsam spricktillväxt kan också vara en följd av oxidation, erosion, mekanisk stöt eller termisk chock.

Statisk utmattning (långsam spricktillväxt) mätes experimentellt genom att applicera en konstant belastning vid konstant temperatur och sedan mäta tiden till brott. Experimentell utföres provningarna på samma sätt som vid krypning med skillnaden att man ej behöver mäta töjningen.

STSR-provning (Stepped Temperature Stress Rupture) är ett relativt enkelt förfarande för en gallring av material som kan lämpa sig för högtemperaturtillämpningar. Provningen bygger på statisk belastning av material vid olika spänningsnivåer och höjning av temperaturen i steg om 100°C var 24 timma. Detta provningsförfarande används av bl a ABB Cerama AB och SCI.

### 3.4 Cyklisk utmattning

Kunskaper om utmattningsegenskaper vid höga temperaturer hos avancerade material som intermetaller och keramer samt kompositer baserade på dessa är mycket begränsade. Resultat från främst USA och Japan har visat på signifikanta utmattningseffekter och man har funnit att tröskelvärde för utmattning kan vara så lågt som 50% av den statiska hållfastheten. För att till fullo kunna utnyttja de avancerade högtemperaturmaterialen i konstruktioner i krävande miljö, fordras en omfattande FoU (Ref 9).

Cyklisk belastning vid höga temperaturer i krävande miljö inkluderar ett flertal degenererande fenomen utöver den rena cykliska belastningen. För att kunna klargöra huruvida en specifik utmattningseffekt existerar, måste alla statiska degenererande fenomen som långsam spricktillväxt, kryp, miljöpåverkan och mikrostrukturella instabiliteter vara kända. Först därefter kan utmattningseffekten renodlas.

Publicerade utmattningsdata för avancerade högtemperaturmaterial är huvudsakligen baserade på böjprovningar. Det finns emellertid indikationer på att ett mera realistiskt och dessutom mer krävande belastningsfall är en växlande belastning mellan dragning och kompression. Detta är svårt att åstadkomma i ett böjprov varför dessa undersökningar troligen bör utföras med en provstav under axiell belastning.

För undersökningar av cyklisk utmattning eller utmattning med annan kurvform simulerande en speciell applikation fordras tillgång till servohydrauliska maskiner för belastningar vid hög frekvens. Provet skall kunna upphettas till höga temperaturer och helst kunna utsättas för olika miljöbetingelser.

### 3.5 Termochockresistens

I de flesta av de projektförslag som formulerats i utredningen (Ref 1), kommer material och komponenter att i drift vara utsatta för stora och snabba temperaturväxlingar. I exempelvis en turbinmotor kommer kraven på termochockbeständighet för vissa komponenter att vara viktigare än kraven på mekanisk hållfasthet. Termochockresistens är av betydelse ej enbart för homogena komponenter utan i lika hög grad för plasmасprutade beläggningar och kemiskt deponerade tunna skikt.

Olika provningsmetoder används för undersökningar av termochockegenskaper. En enkel metod bygger på snabbkylning av en upphettad provstav som sedan belastas till brott i böjning. Vid andra metoder som beskrivs i litteraturen används en gasturbin för att åstadkomma snabba cykliska temperaturväxlingar.

### 3.6 Friktion och nötning

På grund av möjligheterna till att använda avancerade högtemperaturmaterial för nötningsestandiga komponenter i turbiner och motorer, finns behov av data om friktions- och nötningsegenskaper vid höga temperaturer. I litteraturen redovisas ett antal studier rörande nötning och friktion av keramer och kompositer upp till moderata temperaturer. Dessa mätningar är utförda med konventionella mätningar med "ring på skiva" eller "stång på skiva".

Vid NPL har man utvecklat en mätutrustning som medger provningstemperaturer ända upp till 1500°C i kontrollerad atmosfär. Med denna kan belastningar göras upp till 100 N vid glidhastigheter upp till 1,5 m/s.

#### 4 Nationella resurser för provning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer

Inom landet finns ett flertal institutioner och laboratorier med resurser för bestämning av mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur. I de flesta fall är själva provningen ej av primärt intresse, utan ingår snarare som en del i en materialutvecklingsprocess. Oftast är det fråga om en relativt speciell utrustning med inriktning mot några få materialegenskaper. Det finns inget laboratorium i landet som har tillgång till mera övertäckande provningsutrustning och som kan göra utvärderingar inom hela området bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer.

Följande sammanställning bygger på uppgifter från utredningen "Avancerade Högtemperaturmaterial" (Ref 1) och direktkontakter med ett antal institutioner

##### **KTH. Avdelningen för metallurgi . Keramteknologi. Prof D Rowcliffe**

Inom institutionen finns utrustning för snabb och långsam belastning, ner till 2µm/timma, upp till 1600°C. Krypbelastningar kan göras i dragbelastning upp till 1400°C och i samma maskin även lågcykelutmattning med maximalt 1Hz. Man undersöker även "dynamisk utmattning" dvs mäter brottspänningen vid olika deformationshastigheter. Brottseghetsbestämningar kan göras upp till 1600°C. Vid institutionen pågår ett treårigt doktorandprojekt rörande termochockbeständighet hos keramer.

##### **CTH. Metalliska konstruktionsmaterial. Prof I Olefjord**

Verksamheten är inriktad mot metalliska konstruktionsmaterials egenskaper, men även högtemperaturogenskaper hos keramiska material och kompositer. Till utrustningen hör en Instron 8562 elektromekanisk belastningsmaskin försedd med vakuumugn för temperaturer till 1600°C. Deformation kan göras i kompression eller böjning för bestämning av brottseghet och brotthållfasthet. Den lägsta draghastigheten är 2 µm/timma. I en NPL-utvecklad dragprovningmaskin med möjligheter till extremt god upplinjerig och temperaturer till 1500°C kan krypning studeras med fasta vikter. Utrustningen kan även användas för lågcykelutmattning med en högsta frekvens av 1Hz.

##### **CTH. Mekanik och hållfasthetslära. Prof B Åkesson**

Till utrustningen hör ett antal belastningsmaskiner för statiska och dynamiska förlopp med kraftområden över 2kN och frekvenser från 0,0001Hz till 200Hz. Flertalet maskiner kan förses med ugnsutrustning till 1000°C. Förutom drag även böj- och torsionsprovningar.

##### **UU. Institutionen för teknologi. Prof O Wingsbo**

Har utrustning för tribologisk provning genom rullkontakt och glidkontakt. Provningar har gjorts till 1000°C. Utrustningen användes huvudsakligen för undersökningar av verktygsmaterial.

##### **Tekniska Högskolan Luleå. Avdelningen för hållfasthetslära.**

###### **Prof B Lundberg**

En DARTEC belastningsmaskin är under leverans. Utrustningen är tänkt att användas huvudsakligen för keramprovning i drag, böj och kompression vid temperaturer till 1400°C.



**Institutet för metallforskning. IM**

Varmhållfasthetsgruppen vid IM kan utföra dragprov, lågcykel- och termomekanisk provning vid temperaturer till 1200°C. Utrustningarna är främst avsedda för provning av konventionella och avancerade metalliska material.

**Svenska Keraminstitutet. SCI**

En stor del av forskningsverksamheten vid SCI rör konstruktionskeramer där förbättring av de mekaniska egenskaperna står i förgrunden. Till provningsutrustningarna hör Zwick elektromekanisk belastningsmaskin för temperaturer till 1600°C. Den är främst avsedd för 4-punkt böjprovning för bestämning av brottspänning och brottseghet. För långtids krypförsök och STSR-tester används en pneumatiskt driven maskin med möjligheter till samtidig belastning av flera provstavar. Utrustningen kan användas till 1600°C.

**SP. Materialteknik och mekanik.**

De huvudsakliga FoU-områdena omfattar materialbeständighet, utmattningshållfasthet i olika miljöer, tribologi och dynamiska system. Till laboratorieresurserna hör ett flertal servohydrauliska belastningsmaskiner för drag, böjning, kompression och torsion. Dessutom finns ett större antal statiska belastningsmaskiner för olika lastområden. Ugnar finns för temperaturer till 1000°C men en utökning till 1600°C är planerad till 1992.

**Volvo Flygmotor AB.**

För undersökningar av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer finns ett flertal servohydrauliska belastnings- och krypmaskiner. Låg- och högcykelutmattning kan utföras till 1000°C i olika miljöer. I luft kan dragprov och lågcykelutmattning utföras till 1600°C. Man bestämmer brottseghet och sprickpropagering till 1000°C. Krypbrott och krypprovning kan utföras till 1000°C i 8 stycken krypprovningmaskiner.

**ABB Cerama AB.**

För bestämning av böjhållfasthet har man ALWETRON TCT med maxlast 20kN och pålastningshastigheter 0,01 - 15 mm/min, med splitugn för temperaturer till 1400°C. Utrustningen kan även användas för brottseghetsbestämningar. Man har även statisk maskin för undersökningar av statisk utmattning, Step Temperature Stress Rupture och krypegenskaper.

## 5 Analys

En studie av de projektförslag som formuleras i utredningen "Avancerade Högtemperaturmaterial" (Ref 1) antyder att de ingående materialen i konstruktioner kommer att utsättas för höga påfrestningar. Detta gäller mekaniska egenskaper som hållfasthet under statiska och dynamiska/cykliska laster, korrosion/erosionresistens, termochockresistens samt hållfasthet och beständighet under en kombinerad påverkan av mekanisk belastning och miljö.

Den inventering som redovisas i föregående kapitel visar att det knappast finns någon institution i landet som har de resurser som fordras för att experimentellt kunna utföra samtliga erforderliga provningar och utvärderingar. Man finner att de flesta institutionerna har resurser för att kunna bestämma egenskaper som böjhållfasthet, brottseghet och krypning även vid höga temperaturer, men då endast i relativt "oskyldig" miljö.

Dynamisk/cyklisk utmattning kan provas av några få laboratorier men ej heller här i den krävande miljö som materialen i tillämpningar och verkliga konstruktioner kommer att utsättas för.

För några av de föreslagna projekten kan man förutse att termochockresistens kommer att vara viktig. Resurser för sådana undersökningar är mycket begränsade och finns i stort sett enbart vid KTH, Keramteknologi.

Man kan vidare förutse att undersökningar och erfarenheter av nötning och friktion vid höga temperaturer kommer att vara en förutsättning för konstruktören i vissa tillämpningar. De resurser som finns inom tribologiområdet är främst inriktade mot betydligt lägre temperaturer än vad som kan bli aktuella i de kommande tillämpningarna.

Sammantaget kan därför sägas att resurser för provning och utvärdering i stort sett saknas för vissa högttemperaturegenskaper vilka är av fundamental betydelse för kommande applikationer baserade på avancerade högtemperaturmaterial.

Inom Europa finns ett antal kvalificerade institutioner med inriktning mot en del av de områden där resurserna i Sverige är begränsade. Ett exempel när det gäller exempelvis dynamisk utmattning är Fraunhofer Institut i Freiburg. Inom EGs kommande tredje ramprogram kommer det att finnas ett program inom "Measurement and Testing", vilket kommer att ersätta det tidigare BCR-programmet, som huvudsakligen var inriktat mot mätteknik och kemisk analys. Det kommande programmet förväntas få en klarare inriktning mot materialprovning. Det bör därför vara angeläget att svenska provningsinstitutioner och laboratorier som aktivt ämnar delta i det kommande ramprogrammet "Avancerade Högtemperaturmaterial" bör söka samarbetspartners inom EG-programmet för att på så sätt skapa kontakter och få del av kunskaper på de områden, där utländska laboratorier har kommit längre när det gäller provning och utvärdering.

## 6 Förslag

Det är knappast realistiskt att föreslå nyskapandet av ett centrum för bestämning av mekaniska egenskaper vid höga temperaturer. Då man inte heller vet vilka av de föreslagna projekten som kan komma att realiseras, är det i nuläget omöjligt att förutse de kommande behoven. Det tycks dock var klart att satsningar behöver göras i god tid för uppbyggnaden av kunnande och resurser inom vissa teknikområden som dynamisk/cyklisk utmattning i krävande miljö, termochockresistens och tribologi.

Dessa satsningar bör kunna göras vid skilda laboratorier, men förutsättningen är då att detta kan ske i nära samarbete mellan olika laboratorier för att medge samordningsvinster. Tanken är att laboratorier med en viss specialitet skall kunna vara gemensamma resurser. Idag händer det att det inom landet görs dubbelinvesteringar när det gäller dyrbara provningsutrustningar, något som bör undvikas i största möjliga mån.

När det gäller teknikområdet dynamisk/cyklisk utmattning bedöms att de bredaste resurserna finns hos SP och att man därför i första hand bör stärka dessa befintliga resurser.

På området termochockresistens pågår forskning vid KTH, Keramteknologi på de typer av högtemperaturmaterial som avses i utredningen "Avancerade Högtemperaturmaterial". Det ses därför som naturligt att stödja denna forskning.

Inom teknikområdet tribologi vid höga temperaturer finns idag ingen etablerad verksamhet vid någon institution inom landet. Det vore önskvärt att en sådan verksamhet kom till stånd. Det bedöms att det största kunnandet på området finns vid Institutionen för teknologi vid Uppsala Universitet, där man huvudsakligen arbetar vid lägre temperaturer. Det ses som önskvärt att arbetsområdet skulle kunna utökas även till högre temperaturer.

## 7 Referenser

1. Ekström, T., "Avancerade Högtemperaturmaterial", NUTEK (1991).
2. Frostäng, S., och Carlsson, L., "Högtemperaturkorrosion/erosion", NUTEK (1991).
3. Butler, E.G., "Engineering Ceramics: Applications and Testing Requirements" in "Mechanical Testing of Engineering Ceramics at High Temperatures", Ed: B.F. Dyson, R.H. Lohr, and R. Morrell, Elsevier Science Publishers Ltd, London, p 1-10 (1989).
4. Claussen, N., "Strengthening strategies for ZrO<sub>2</sub> - toughened ceramics at high temperatures", Mater. Sci. Eng., 71 23 - 28, (1985).
5. Quinn, G.D., and Morrell, R., "Design Data for Engineering Ceramics: A Review of the Flexure Test", J. Am. Ceram. Soc., 74 (9) 2037 - 66, (1991).
6. Robertson, D.W., "Modern Ceramic Engineering", Marcel Dekker Inc., NY, p 96, (1982).
7. Evans, A.G., "Fracture Mechanics of Ceramics", 1 , Plenum Press Corp., NY, p 25 - 26, (1974).
8. Referens 5, sid 2057.
9. Ritchie, R.O., Dauskardt, R.H., and Cox, B.N., "International Conference on Mechanical Fatigue of Advanced Materials", Santa Barbara, California, (1991).