

## Chemical vapour infiltration als methode om keramische matrix composieten te vervaardigen

**Citation for published version (APA):**

Roman, Y. G. (1994). Chemical vapour infiltration als methode om keramische matrix composieten te vervaardigen. *KGK, Tijdschrift voor Klei, Glas en Keramiek*, 15(11), 287, 290-293.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1994

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Chemical Vapour Infiltration als methode om Keramische Matrix Composieten te vervaardigen

kgk Wetenschap

## Samenvatting

Dit artikel is een beknopte samenvatting van het proefschrift zoals verdedigd aan de Technische Universiteit Eindhoven in juni 1994.

Doelstelling van het onderzoek was de vervaardiging van keramische matrix composietmateriaal met een minder bros breukgedrag dan monolitische keramiek.

In dit artikel wordt de Chemical Vapour Infiltration (CVI) techniek beschreven, welke is gehanteerd voor de bereiding van vezelversterkt siliciumcarbide. Een van de CVI technieken, de zogenaamde Isotherme Forced flow CVI methode, wordt meer uitvoerig beschreven. Uiteengezet wordt hoe de procesparameters gestuurd moeten worden teneinde een composiet te vervaardigen met een zo groot mogelijke homogene dichtheid en in een zo kort mogelijk tijdsbestek. Helaas is gebleken, uit zowel simulatie als experimenten, dat een grote homogene composietdichtheid ten koste gaat van snelle infiltratie.

Uit drie-puntsbuigproeven blijkt dat het vervaardigde vezelversterkte SiC composietmateriaal plastische (taaie) karakteristieken vertoont indien het vezel-matrix grensvlak optimaal is. Enkele karakteristieke materiaaleigenschappen en toepassingen worden gepresenteerd.

## Summary

This article summarises part of the work of a PhD thesis defended at the Eindhoven University of Technology, June 1994. It describes the work performed in a project named "Ceramic Matrix Composites". The objective of this project was to prepare ceramic composites with tough fracture characteristics.

In this article the Chemical Vapour Infiltration (CVI) technique is described that was used for the preparation of continuous fiber reinforced siliconcarbide matrix composites. The so-called Isothermal Forced flow CVI technique is studied in more detail. The effect of the process parameters and microstructure of the preform, on the infiltration time and relative composite density are given. Unfortunately, it appeared, from both simulation and experiments, that high homogeneous composite density does not coincide with fast infiltration. 3 point bending tests of the fiber reinforced siliconcarbide composite material demonstrated plastical (tough) fracture characteristics as long as the fiber/matrix interface is optimal. Finally, some general properties and applications of CVI composites are presented.

## Auteur

Yvette Roman is sedert 1986 werkzaam als onderzoeksmedewerkster bij het Centrum voor Technische Keramiek (CTK) te Eindhoven. Van mei 1988 tot mei 1993 werkte zij aan het promotie-onderzoek en tevens IOP project "Keramische Matrix Composieten".

In juni 1994 promoveerde zij aan de Technische Universiteit Eindhoven met Prof.dr. R. Metselaar en Prof.dr.ir. G.B.M.M. Marin als promotoren, op het proefschrift "Forced flow Chemical Vapour Infiltration".

## Inleiding en doelstelling

Toen in mei 1988 het IOP Keramische Matrix Composieten van start ging was de doelstelling van het onderzoek duidelijk: de vervaardiging van "taaie" keramiek.

Als route werd de Chemical Vapour Infiltration (CVI) techniek geselecteerd vanwege enkele voordelen boven de toen bestaande technieken, zoals bijvoorbeeld de relatief lage procestemperatuur en -druk [1].

Keramische Matrix Composieten (afgekort in de Engelse literatuur als CMC's) zijn nog relatief onbekende materialen alhoewel het vertaaiingsconcept al eeuwen oud is. Denk maar aan de combinatie van stro (de vezels) en klei (de keramische matrix) als bouw materiaal voor hutten nog voor onze jaartelling.

Omdat de CVI techniek in Europa en zeker in Nederland nog geheel onbekend was ten tijde van de start van het IOP project, is het onderzoek met name gericht geweest op de begripsvorming en optimalisatie van het CVI proces. Daarbij filosofierend dat slechts (sterke en) taaie keramiek gemaakt zou kunnen worden, op een reproduceerbare manier, indien het CVI proces begrepen en gestuurd zou kunnen worden.

Primair doel van het CVI proces is de vulling van een poreus vezelskelet, de zogenaamde preform, met een keramische matrix. Gestreefd wordt naar het vervaardigen van een composiet met een zo homogeen en zo hoog mogelijke composietdichtheid in een zo kort mogelijk tijdsbestek.

In het volgende worden enkele facetten van de CVI techniek uitgelegd. Voor meer informatie wordt verwezen naar het proefschrift [2].

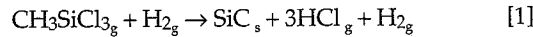
## Theoretische achtergrond

CVI is een afgeleide vorm van het meer bekende Chemical Vapour Deposition (CVD) proces. Het doel van CVI wijkt echter af van CVD. Wordt in CVD een substraat voorzien van een anorganische oppervlakte coating, in CVI dient een poreus substraat geheel of gedeeltelijk te worden opgevuld of verdicht.

De benaming CVI is alleen terecht indien de poriën die in verbinding staan met het oppervlak van het substraat relatief diep zijn, zodat er echt sprake is van infiltratie (porievulling) en niet van het modi-

**Figuur 2: >>**  
Het principe van IFCVI.

ficeren van oppervlakte defecten. In dit laatste geval is er sprake van (modified) CVD. Gedurende de infiltratie stroomt er reactief gas langs of door het poreus substraat dat verhit wordt tot temperaturen tussen de 700-1500°C in een reactor bij veelal een lage druk. Op de poriëwanden of vezeloppervlak van het substraat vindt een heterogene chemische reactie plaats. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van methyltrichloorsilaan (MTS) en waterstof als reactanten volgens:



teneinde een SiC matrix te vervaardigen bij temperaturen van rond de 1000°C.

Het CVI proces kan, vergelijkbaar met het CVD proces, worden opgesplitst in de volgende stappen:

- 1] Massatransport van reactieve gas deeltjes vanaf de gasinlaat van de reactor door de bulk naar de grenslaag boven of naar het preform oppervlak.
- 2] Diffusie van de deeltjes door de eventuele grenslaag en in de poriën.
- 3] Adsorptie van de deeltjes op de poriëwand.
- 4] Oppervlaktediffusie en chemische reactie van de geadsorbeerde deeltjes.
- 5] Desorptie van de gasvormige bijprodukten.
- 6] Diffusie van deeltjes door porie en grenslaag.
- 7] Massatransport door de bulk gasfase naar de reactor-uitlaat.

De preform, geweven van koolstof of Nicalon\* vezels tot een plaat met een dikte van ca 3 mm en een diameter van ca 80 mm is na afloop van het verdichtingsproces, dat tussen de 5 en 10 uur duurt, een SiC composiet geworden.

Het laatste decennium zijn er een vijftal verschillende modificaties op het CVI basis concept ontstaan, welke in het nu volgende verder worden toegelicht.

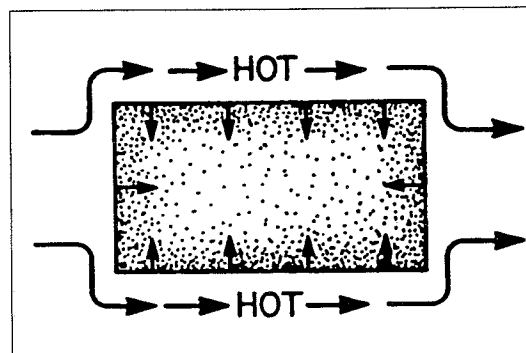
\* Nicalon is een handelsnaam van een  $\beta$ -SiC type vezel met de samenstelling: 65 gew.% SiC, 20 gew.% SiO<sub>2</sub> en 15 gew.% C.

### 1] Isotherm isobaar CVI, ICVI

Dit in Frankrijk ontwikkelde proces is de oudste variant van CVI. Een reactief gasmengsel stroomt langs de uniform verhitte preform, welke staat of hangt in een verticale lage druk CVD reactor (figuur 1).

**Figuur 3: >>**  
Het principe van TGFCVI.

**Figuur 1: >>**  
Het principe van ICVI.

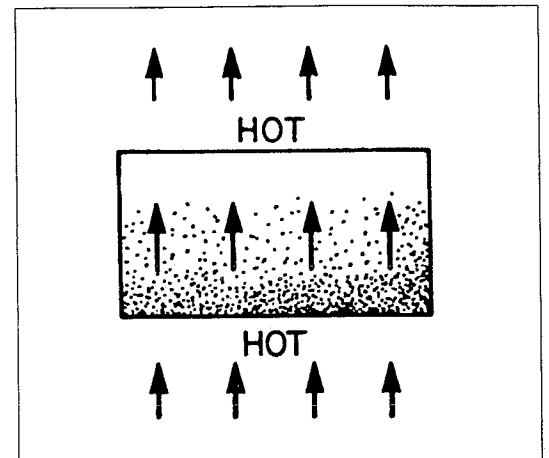


De drijvende kracht achter het massatransport van de gasdeeltjes de poriën in, is diffusie. Een nadeel van deze methode zijn de lange infiltratietijden: in de orde van weken (!) voor de verdichting van een 10 mm dikwandig materiaal. Dit wordt met name veroorzaakt doordat het produkt regelmatig van een dichte coating aan het oppervlak moet worden ontdaan om de onderliggende geblokkeerde poriën weer toegankelijk te maken voor het gas. Eén

voordeel is echter dat vele preforms simultaan in één batch kunnen worden geïnfilteerd.

### 2] Isotherm Forced flow CVI, IFCVI

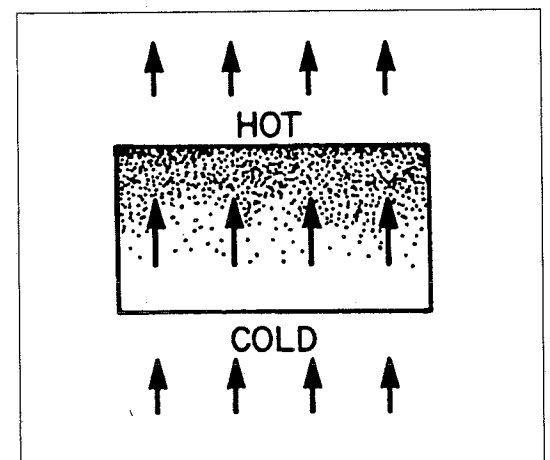
Deze techniek is met name door het CTK in dit project ontwikkeld. Ook hier wordt de preform uniform verhit tot ca 1000°C. De reactieve gassen worden echter niet langs, maar door het poreuze substraat geforceerd (figuur 2).



Het massatransport van het gas door de poriën vindt nu dus plaats door gedwongen convectie en in mindere mate door diffusie. De depositie begint allereerst daar waar de MTS concentratie het grootst is en dat is aan de gasinlaatzijde. Infiltratietijden zijn met dit proces een factor 10 korter dan bij de ICVI techniek. Een nadeel van de methode is dat voor elke preform een aparte gasinjector moet worden gebruikt (en dat geldt ook voor het hierna beschreven TGFCVI proces) teneinde een drukval (forced flow) over de preform te creëren.

### 3] Thermal Gradient Forced flow CVI, TGFCVI

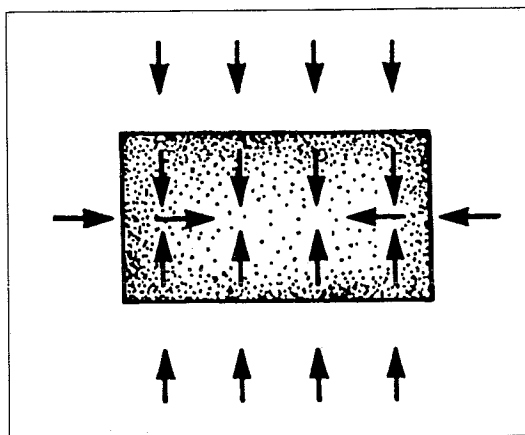
Dit proces is ca 15 jaar geleden ontwikkeld in de V.S. Het principe is hetzelfde als het IFCVI proces met de aanpassing dat er een temperatuurgradiënt is aangebracht over de preform in tegengestelde richting aan de gasstroom (figuur 3).



Dit heeft het voordeel dat de depositie in de gasstroomrichting uniformier is, daar de groeisnelheidsafname van het SiC als gevolg van uitputting (depletie) van MTS uit het gasmengsel wordt genivelleerd door een toename van de temperatuur. In dit IOP onderzoek is deze methode ook onderzocht en is er gebleken dat deze het meest interessant lijkt vanwege de lage kostprijs per produkt en de hoge dichtheden die relatief snel worden bereikt.

4] Pressure Pulse CVI, PPCVI

Deze techniek is in ontwikkeling op onderzoekschaal. Hierbij wordt het reactieve gas met een bepaald volume in de reactorkamer geïnjecteerd, waarna het enkele seconden de tijd krijgt om te reageren op en in het uniform verhitte substraat. Daarna wordt, in fracties van seconden, het gas weer uit de reactor geëvacueerd en wordt opnieuw nieuw gas ingelaten (figuur 4).



Figuur 4: > Het principe van PPCVI.

Een nadeel van deze methode is het feit dat zeer grote pompcapaciteiten nodig zijn om de infiltratietijden vergelijkbaar te houden met de andere CVI technieken hetgeen opschaling belemmert. Een voordeel zou zijn dat in vergelijking met het ICVI proces de dichtheidsgradiënten kleiner zijn.

5] Microwave Assisted CVI, MACVI

Deze methode is een van de meest recente ontwikkelingen. De karakteristieken van het microgolf proces leiden ertoe dat de infiltratie plaats vindt van de kern van de preform (het meest warme deel) naar buiten en dus blokkade van de poriën aan het oppervlak wordt voorkomen. Het starten van het proces blijkt echter moeilijk.

In het volgende wordt verder ingegaan op de bij het CTK ontwikkelde IFCVI techniek.

Simulatie van het IFCVI proces

Teneinde de optimale procescondities voor het verkrijgen van homogeen dichte SiC keramiek te bepalen, zijn er zowel experimenten als simulaties uitgevoerd waarbij de verschillende onafhankelijke IFCVI procescondities één voor één zijn gevarieerd.

Deze zijn:

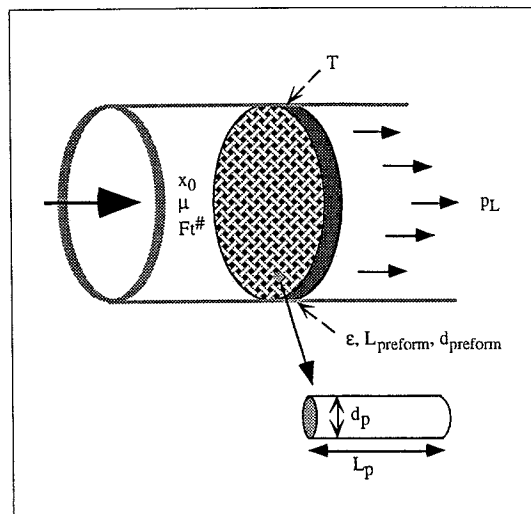
- De preform temperatuur
- Het totaal gasdebiet
- De fractie van de precursor MTS in het gasmengsel
- De totaal druk

De preform is eenvoudig te visualiseren als een schijf met daarin een n aantal cilindrische doorlopende poriën (figuur 5).

Het IFCVI proces is eenvoudig te beschrijven door een combinatie van een heterogene chemische depositiereactie op de poriewand en gedwongen convectie (forced flow) van het gas in axiale richting z door de porie.

Het zal duidelijk zijn dat naarmate de porie vol groeit de infiltratiecondities en de lokale groeisnelheid van het SiC gaan veranderen. De simulatie van het infiltratieproces is verricht door het oplossen van drie gekoppelde differentiaalvergelijkingen. Hiermee kan zowel plaats- als tijdsafhankelijk de depositie van het SiC worden gevolgd als functie van de vier eerder genoemde onafhankelijke

Figuur 5: >> Dwarsdoorsnede van een model-preform als een schijf met cilindrische poriën van uniforme afmetingen, met daarin aangegeven de bekende proces- en preformparameters.



procesparameters. De depositiereactie van SiC is daarbij als eerste orde in MTS verondersteld.

De drukvergelijking:

$$\frac{\partial p_x}{\partial x} = \frac{-8 \mu L K F t^\#}{n \pi p_x r^4} \quad [2]$$

De concentratievergelijking:

$$\frac{\partial C_{Sx}}{\partial x} = -2 L C_{Sx} \left[ \frac{n \pi k_{srx} p_x}{F t^\# K} + \frac{4 \mu K F t^\#}{n \pi p_x^2 r^4} \right] \quad [3]$$

De groeisnelheidsvergelijking:

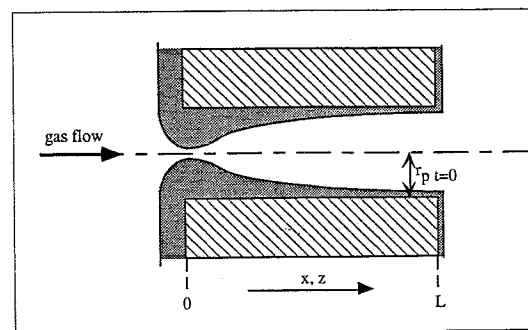
$$\frac{\partial r_x}{\partial t} = \frac{-m_{SiC}}{\rho_{SiC}} k_s C_{Sx} \quad [4]$$

met  $K = \frac{T p^0}{T^0}$  [Pa] en  $x [-]$  als de dimensieloze axiale

afstand in de porie (z/L).

$r_p$  [m] is de straal van de porie,  $\mu$  [Pa.s] is de dynamische gasviscositeit van het gasmengsel,  $F t^\#$  [ $m^3.s^{-1}$ ] is het totaal gasdebiet bij standaard temperatuur en druk,  $n$  is het aantal poriën in de preform-schijf,  $T^0$  en  $p^0$  zijn respectievelijk  $10^5$  Pa en 273 K,  $T$  [K] is de temperatuur,  $p_x$  [Pa] is de lokale totaal druk,  $C_{Sx}$  is de lokale MTS (S) concentratie,  $m_{SiC}$  is de molmassa van SiC,  $\rho_{SiC}$  is de theoretische dichtheid van SiC,  $k_s$  [ $m.s^{-1}$ ] is de reactiesnelheidscoëfficiënt van de eerste orde depositiereactie,  $t$  [s] is de infiltratietijd en  $L$  [m] is de dikte van de schijf.

De simulatie wordt beëindigd wanneer er, net als bij de experimenten, een bepaalde drukval over de preform is ontstaan. Hierna kunnen de infiltratieduur en de composietdichtheid eenvoudig worden berekend. Deze laatste kan (als tijdsafhankelijke preformporositeit) worden benaderd door het open porievolume van de n poriën te bepalen m.b.v. het volume van een omwentelingslichaam en dit volume te delen door het totaal preformvolume (figuur 6).



Figuur 6: >> Dwarsdoorsnede van een cilindrische porie met daarin het profiel van de SiC depositie.

De drie differentiaalvergelijking geven niet direct inzicht in het effect van de verschillende procesparameters op de infiltratietijd en composietdichtheid na infiltratie. Verdere vereenvoudiging doet dit wel.

De lokale tijdonafhankelijke groeisnelheid, kan onder massatransport gecontroleerde condities, worden weergegeven met behulp van de volgende vergelijking:

$$G_z = G_z k_s = C_0 k_s \exp\left(\frac{-2 k_s z}{r_p u_p}\right) \quad [5]$$

waarin  $G_z$  [mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>] de lokale axiale groeisnelheid van SiC,  $C_0$  en  $C_z$  [mol.m<sup>-3</sup>] respectievelijk de concentratie van MTS op  $z=0$  (de poriemond) en op afstand  $z$  in de porie en  $u_p$  [m.s<sup>-1</sup>] de gassnelheid van het gasmengsel door de porie  $p$ .

Hieruit blijkt dat voor een zo groot mogelijke uniformiteit de reactiecoëfficiënt en de axiale afstand  $z$  klein moeten zijn terwijl de poriediameter en de gassnelheid bij voorkeur groot dienen te zijn. Dit lijkt ook logisch omdat de gassnelheid in de porie de mate van uitputting van de precursor uit het gasmengsel bepaalt en dus ook de groeisnelheidsvariatie in de richting van de gasstroom.

De benaderde gassnelheid  $u_p$  [m.s<sup>-1</sup>] door 1 porie is een afgeleide grootte en voor dit IFCVI proces gedefinieerd als:

$$u_p = \frac{r_p^2}{8 \mu L} p_L \left\{ \sqrt{1 + \frac{16 Ft^\# p^0 T \mu L}{\pi n r_p^4 T^0 p_L^2}} - 1 \right\} \quad [6]$$

De term tussen haakjes vermenigvuldigd met  $p_L$  is de drukval over de preform.

Onder kinetisch gecontroleerde condities wanneer de gassnelheid oneindig groot is of  $k_s/u_p$  heel klein, reduceert de bovenstaande vergelijking tot:

$$G_z = k_s C_0 \quad [7]$$

In eerste instantie zou dit kunnen suggereren dat er onder deze laatste condities een volledig uniforme afzetting ontstaat, ware het niet dat de drukval als gevolg van de gedwongen convectie resulteert in een niet-uniforme groeisnelheid. Een volledig homogeen composietmateriaal kan dus met het IFCVI proces niet worden vervaardigd.

Deze en enkele andere conclusies zijn samengevat in tabel 1.

Tabel 1: >

De proces- en microstructuur parameter afhankelijkheid van het IFCVI proces.

Parameter verhoging	infiltratie duur	composiet dichtheid	
		kinetisch gecontroleerd	convectie gecontroleerd
Gassnelheid	↓	↓	↑
Totaal gasdebiet	↓	↓	↑
Uitlaatdruk	↓	↑	↓
Temperatuur	↓	-	↓
Precursor mol fractie	↓	-	-
Preform poriediameter	↑	-	↑
Preform diameter	↓	-	↓
Preform open porositeit	↑	-	↓
Preform dikte	↓	-	↓

Figuur 7: >>

Het kracht-verplaatsingsdiagram van koolstof vezel SiC composiet zoals vervaardigd m.b.v. CVI.

Vanuit economisch oogpunt is een korte infiltratieduur van groot belang. Algemene IFCVI verdichtingstijden zijn in de orde van 2 tot 5 uur per millimeter preform dikte. Het mag duidelijk zijn dat het de moeite loont om een optimum te vinden tussen infiltratieduur en relatieve composietdichtheid. Dit optimum hangt sterk af van de toelaatbare prijs/materiaaleigenschap verhouding van de specifieke toepassing.

## Experimentele verificatie

Om de bovenstaande simulaties te toetsen zijn er experimenten uitgevoerd met preforms onder verschillende condities en vezelgehalte.

In kwantitatieve zin stemmen model en experimenten niet helemaal met elkaar overeen. Dit is niet vreemd omdat het model is opgebouwd uit meerdere aannames. Bovendien was de doelstelling van het model het verkrijgen van inzicht. Een meer kwantitatief model wordt momenteel ontwikkeld bij TNO-TPD te Delft [4,5].

In kwalitatieve zin is het model echter wel in overeenstemming met de experimentele resultaten en is een handig hulpmiddel voor het voorspellen van trends.

## Composiet-eigenschappen

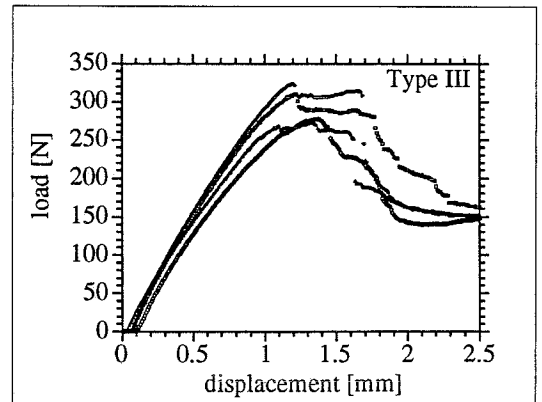
Hieronder worden enkele karakteristieke materiaaleigenschappen van de in dit onderzoek vervaardigde type CVI materialen samengevat (tabel 2).

Eigenschap	Eenheid	Karakteristieke waarde
3 punt buigsterkte	MPa	350 - 450
Rek bij breuk	%	0.2 - 0.3
Treksterkte	MPa	150 - 200
Druksterkte	MPa	500 - 600
Afschuifsterkte	MPa	10 - 20
Young's modulus	GPa	100 - 200
Brektaaiheid	MPa.m <sup>0.5</sup>	10 - 30
Weibull modulus	-	10 - 15
Warmtegeleidingscoëfficiënt	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	5 - 20
Bestendigheid in lucht	K	< 1300
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	K <sup>-1</sup>	4.10 <sup>-6</sup>
Elektrische weerstand	Ω.m <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>4</sup> (halfgeleider)
Absolute dichtheid	kg.m <sup>-3</sup>	2.3.10 <sup>3</sup>

Er dient te worden opgemerkt dat het mechanisch gedrag van keramische composieten sterk afwijkt van monolitische brosse keramiek. Bovendien zijn de mechanische en (thermo)fysische eigenschappen van deze eerste materialen sterk afhankelijk van de richting waarin het materiaal wordt getest of belast en van de conditie van de vezel/matrix grensvlak [8].

Zo blijkt een (relatief zachte en gladde) coating van boornitride of koolstof van ca. 200 tot 500 nm nodig om te sterke hechting van de matrix aan de vezels te voorkomen.

Het vervaardigde CVI materiaal blijkt "taai". Het plastisch karakter is aangetoond m.b.v. van een drie-puntsbuigproef verricht aan vier composietstaafjes welke zijn gezaagd uit dezelfde geïnfiltreerde preform. Een typisch resultaat is weergegeven in figuur 7.



Bij toename van de verplaatsing (rek) is in eerste instantie het materiaalgedrag als lineair elastisch te beschrijven. Onder maximale belasting zal de matrix breken. De vezels in het materiaal zijn echter in staat hierna de belasting te dragen en deze

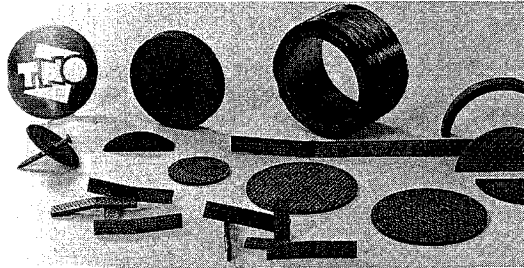
eigenschap maakt dat er geen catastrofale breuk optreedt bij te hoge belastingen. De component blijft na breuk intact. Het stelt de operator van bijvoorbeeld de turbine of pomp in staat het apparaat uit te schakelen zonder dat dit daarbij catastrofale schade heeft opgelopen.

#### Applicatie

Uiteraard wordt ook in dit IOP project een industriële utilisatie van proces en produkt (figuur 8) nagestreefd.

Er zij echter nog wat aspecten die toepassing van dit specifieke produkt tot dusver heeft doen beperken tot voornamelijk militaire- en ruimtevaarttoepassingen. Deze zijn: de hoge kostprijs, de onbekendheid met het produkt en de materiaalkarakteristieken en de slechte oxidatiebestendigheid van het benodigde (koolstof) vezel/matrix grensvlak. Vooralnog hebben deze CVI composieten een grote potentie en kunnen worden toegepast daar waar monolitische keramiek minder goed inzetbaar blijkt vanwege hun geringe treksterkte en thermoshockresistentie. Voorbeelden van potentiële composiet toepassingen zijn (heet gas) filters voor o.a. kolenvergassingsinstallaties en rookgasreiniging, turbine onderdelen, verbrandingskamers van motoren, mechanische afdichtingen, branderkoppen, warmtewisselaarpanelen, remvoeringen van racewagens etc.

**Figuur 8:** >  
Enkele eenvoudige CVI keramische matrix composiet produktjes zoals vervaardigd door het CTK.



Momenteel worden door 3M in de V.S. op grote schaal CVI kaarsfilters getest en vervaardigd nu is gebleken dat zij de bestaande Schumacher filters vele malen overtreffen [9].

#### Literatuur

- [1] Y.G. Roman, *Klei Glas Keramiek* 12 [4] (1991), p. 74-78.
- [2] Y.G. Roman, "Forced flow Chemical Vapour Infiltration", Proefschrift Technische Universiteit Eindhoven (1994).
- [3] H. Ichikawa, S. Mitsumo, Y. Imai, *Proc. 1st Japan Int. SAMPE Symp.* (1989), p. 923928.
- [4] C. Steijsiger, A.M. Lankhorst, Y.G. Roman, "Influence of gas phase reactions on the deposition rate of silicon carbide from the precursor methyltrichlorosilane and hydrogen", *Proc. First Eur. Conf. Numerical Methods in Engineering*, 7- 11 september (1992), p. 857-864.
- [5] C. Steijsiger, A.M. Lankhorst, Y.G. Roman, "Forced Chemical Vapour Infiltration: modelling densification of a 3D orthogonal woven fibre structure", *Proc. 6th Eur. Conf. Comp. Mat. and Associated Conf.*, Bordeaux France 20-24 september (1993), p. 603-608.
- [6] R. Warren, "Ceramic-Matrix Composites" Blackie, Glasgow and London (1992).
- [7] A. Muhlratzer, H. Köberle, *Metall* 45 [5] (1991), p. 434-439.
- [8] A.G. Evans, F.W. Zok, *J. Mat. Sci.* 29 (1994), p. 3857-3896.
- [9] R.G. Smith, J.H. Eaton, B.L. Weaver, J.L. Kahnke, *Proc. 8th Annual Conf. on Fossil Energy Materials*, May 10-12, Oak Ridge USA (1994), to be published.



>> Vervolg van pagina 286.

## De metselbaksteenindustrie in Nederland 2, de energie- en milieusituatie

12. Op grond van de enquête-gegevens en de criteria die in het algemeen worden gesteld aan warmte/kracht-installaties (gasverbruik drogerijen, luchtdebieten, totaal elektraverbruik) mag geconcludeerd worden, dat het merendeel van de Nederlandse baksteenproducenten in aanmerking komt voor een W/K-installatie.
13. Veel extra research-inspanning op energie- en milieugebied is nog noodzakelijk om de specifiek in Nederland toegepaste processen en technologieën te minimaliseren in energieverbruik en daarnaast zo milieuvriendelijk mogelijk te maken.

#### 8. Dankwoord

Voor de financiële bijdrage aan het onderzoek de energie- en milieusituatie binnen de kleidakpannen branche gaat onze dank uit naar de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM B.V.). Met name Ir. T.G.F. Nohlmans heeft met veel enthousiasme het onderzoek gesteund.

