



REPUBLIK
ÖSTERREICH
Patentamt

(10) Nummer: **AT 412 207 B**

(12)

PATENTCHRIFT

(21) Anmeldenummer: A 374/2003
(22) Anmeldetag: 11.03.2003
(42) Beginn der Patentdauer: 15.04.2004
(45) Ausgabetag: 25.11.2004

(51) Int. Cl.⁷: **C01B 31/36**
C04B 41/87

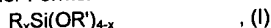
(73) Patentinhaber:
ARC SEIBERSDORF RESEARCH GMBH
A-1010 WIEN (AT).

(54) SCHUTZÜBERZÜGE AUF KOHLENSTOFFHÄLTIGEN SUBSTRATEN UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG DERSELBEN

AT 412 207 B

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Beschichtung auf Basis von Silicium(-oxi-)carbid auf Kohlenstoff, Kohlenstoff/Kohlenstoff- oder Kohlenstoff/Siliciumcarbid-Verbundmaterial, wobei eine Lösung eines Organosilans der Hydrolyse und Polykondensation unterworfen wird und unter Entfernung der dabei frei werdenden flüchtigen Komponenten das erhaltene Sol bzw. Gel auf das Substrat aufgebracht und dasselbe nach Trocknung bis auf 1300°C erhitzt wird.

Das neue Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomer entsprechend der Formel



worin

R und R' Alkyl mit 1 bis 5 Kohlenstoffatomen und/oder Aryl und

x eine Zahl von 1,0 bis 4,0

bedeuten, unter Ausschluss eines kohlenstoffhaltigen Zusatzes mit Wasser in einem Wasser/Silan-Molverhältnis von 0,3 bis 3,0 zu einem fließfähigen Solharz umgesetzt wird und die nach Entfernen flüchtiger Komponenten erhaltene glasartige Auftragsschicht durch Erhitzen auf bis zu 1850°C in eine keramiktartige SiC-Beschichtung übergeführt wird.

Die Erfindung betrifft weiters die Verwendung der so beschichteten Verbundmaterialien.

Grundlage der Erfindung:

Die Erfindung betrifft gegen oxidativen thermischen Abbau resistente Schutzüberzüge und im Speziellen keramische bzw. keramik-basierte Überzüge. Es ist ein breites Spektrum verschiedener keramischer Überzüge bekannt geworden, welche sich sowohl in ihren Zusammensetzungen als auch in der Art und Weise ihrer Herstellung oft beträchtlich voneinander unterscheiden. Typische bekannte Herstellungsverfahren umfassen die Aufbringung eines Keramikpulvers auf einen mit dem gewünschten Überzug zu versehenen Gegenstand, was vorzugsweise in Gegenwart eines Adhäsivs oder eines Lösungsmittels erfolgt, wonach der dann getrocknete Pulverüberzug bei höheren Temperaturen aufgesintert wird. Es ist weiters bekannt, zur Herstellung von Nano-Komposit-Überzügen mit jeweils gewünschten Eigenschaften Nano-Pulver von verschiedenen Keramikmaterialien und/oder Verstärkungs- bzw. Armierungskomponenten zum Einsatz zu bringen.

Das industriell am häufigsten verwendete Verfahren zur Beschichtung von Werkstücken ist das CVD (chemical vapor deposition)-Verfahren.

An keramische Überzüge im Allgemeinen und an Siliciumcarbid-Überzüge im Speziellen, welche für den Schutz von hohen Temperaturen ausgesetzten Gegenständen vorgesehen sind, werden hohe Anforderung bezüglich Hochtemperatur-Beständigkeit unter hoch-oxidierenden Bedingungen gestellt. Solche Schutzüberzüge sind insbesondere für Gegenstände vorgesehen, welche Kohlenstoff oder Graphit als wesentliche Komponente oder als Armierungsmaterial enthalten, da die angesprochene Oxidation des Kohlenstoffs die Eigenschaften der unter dessen Einsatz gefertigten Gegenstände in hohem Ausmaß verschlechtert und damit für den jeweils geplanten Einsatz unbrauchbar macht. Der besondere Vorteil von siliciumcarbid-basierten Schutzüberzügen liegt in ihrer Beständigkeit gegenüber dem Kohlenstoff im Substrat einerseits und andererseits in ihrer Fähigkeit, eine Art äußere SiO_2 -Glasschicht zu bilden, welche den damit beschichteten Gegenstand vor weiterer Oxidation schützt. Diese Fähigkeit kann auch als Selbst-Heilungsmechanismus für mechanisch beschädigte Flächen bzw. Bereiche in der genannten Glas-Schutzschicht herangezogen werden.

Beschreibung des relevanten Standes der Technik:

Sol/Gel-basierte Schutzüberzüge für Gegenstände aus Kohlenstoff sind beispielsweise aus der EP 482782 B1 bekannt. Der dort beschriebene komplexe Prozess umfasst eine zumindest eine Stunde bis einige Stunden dauernde, "langsame" Sol/Gel-Reaktion, bevorzugt in einer hochverdünnten Alkoxisilan-Lösung in Wasser und Aceton, wobei ein kohlenstoffhaltiges bzw. organisches Verdickungsmittel und weiters Füllstoffe aus verschiedenen Typen von Gläsern Einsatz finden.

Der Haupt-Schwachpunkt der Überzüge gemäß diesem Stand der Technik besteht in dem bei der Herstellung der Überzüge nicht vermeidbaren Abbau von SiO_2 in der Überzugsschicht, welche mit dem von ihr zu schützenden Kohlenstoff des Gegenstandes bzw. Substrats in Kontakt steht, wobei bei der Hitzeeinwirkung zur Bildung des Siliciumcarbids gasförmiges SiO und CO entstehen, wozu auf die Spalte 4, Zeile 37 der EP-B1 hinzuweisen ist. Dies macht es notwendig, dass mehrere Schichten des Sol/Gels, zusammen mit organischen Verdickungsmitteln und anderen Additiven aufgebracht werden müssen, um die Bildung eines kohärenten Belages mit einer ausreichenden Menge an Siliciumcarbid zu gewährleisten. Dennoch kommt es bei der Bildung des Sol/Gel-Harzes auf Silan-Basis gemäß dieser EP-B1 zur Ausbildung von SiO_2 in geringen Mengen, was den Überzug für einen Abbau infolge der Bildung von gasförmigem SiO und CO anfällig macht.

Es wurde gefunden, dass ein wesentlicher Grund für die Hemmnisse bei der Erreichung tatsächlich guter Material- bzw. Überzugs-Eigenschaften beim Verfahren gemäß der EP B1 ganz besonders in der Einstellung des Mol-Verhältnisses von Wasser zum jeweils eingesetzten Silan liegt. Gemäß dieser EP-B1 muss dieses Verhältnis hoch gehalten werden, und zwar in einem Bereich von 3,3 bis 20, und dies erfordert die Zugabe eines organischen Lösungsmittels. Dies führt zu einem relativ hoch verdünntem Harz, was dann die Verwendung von organischen Verdickungsmitteln notwendig macht, um eine ordnungsgemäße Aufbringung als Überzug auf ein Substrat zu ermöglichen.

Prasse et al. [4] beschreiben eine Methode zur Infiltration von Tetraethoxysilan-Lösungen in Kohlenstoff-Formen, mit dem Ziel, dieselben mit einem SiO_2 -Überzug zu versehen und dann das SiO_2 in SiC umzuwandeln, und zwar mittels der Reaktion des Siliciums mit dem Kohlenstoff. Diese Methode krankt aber, wie die Autoren selbst zugeben, daran, dass die Formgenauigkeit der Guss-

form in Folge des Einsatzes des Kohlenstoffs, aus dem dieselbe gebildet ist, für die Bildung des Siliciumcarbids im Überzug negativ beeinflusst wird.

Ähnliches lehren auch Villegas et al. [5], welche ebenfalls einen oxidischen Schutzüberzug beschreiben, der eine Mischung von Silicium- und Boroxid umfasst. Die Nachteile dieses Überzugs, der zuerst auf Glasscheiben getestet wurde, sind ähnlich jenen der Überzüge gemäß der vorher genannten Literaturstelle [4].

Aparicio et al [6] berichten von der Infiltration von Sol/Gel-Lösungen von Silicium-Verbindungen in C/SiC-Verbundkörpern, ebenfalls mit dem Ziel, dieselben vor Oxidation zu schützen. Eine Grenze, an welche bekannte SiO₂-Schutzüberzüge immer wieder stoßen, rührt von der Tendenz zur Rissbildung her, welche auf die thermische Ausdehnung des C/SiC-Materials zurückzuführen ist, das durch die Überzüge geschützt werden soll.

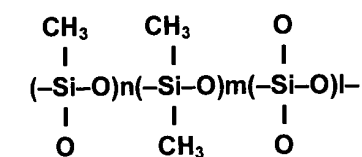
Takamura et al. [7] lehren eine Methode der Sol/Gel-Herstellung von Siliciumoxycarbide-Filmen aus Methyl- und Vinyltrimethoxysilan-Precursoren. Die auf diese Weise hergestellten Überzugsfilme haben zwar die Eigenschaft, riss- und deformationsfrei zu sein bzw. zu bleiben, enthalten aber 58 bis 90 Mol-% Rest-Kohlenstoff. Dieser hohe Anteil an Kohlenstoff führt bei Einwirkung hoher Temperaturen in oxidativer Umgebung zur Oxidation, und das große Volumen der Gase, die dabei gebildet werden, führt zu einem drastischen Abbau der Überzugsfilme und damit zur eklatanten Verminderung von deren Schutzfunktionen.

Es bestand somit ein dringender Bedarf an einem einfachen Herstellungs-Verfahren, welches mit möglichst hoher Sicherheit und ohne Schädigung des zu schützenden Substratmaterials zu kohärenten C/SiC-Überzügen mit - wenn möglich - maßgeschneiderten Eigenschaften, wie z.B. mit einem gewünschten bzw. vorgegebenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und - bei wettbewerbsfähig bleibenden Kosten - zu zumindest vergleichbaren oder besseren Gebrauchs- und Gebrauchsdauer-Eigenschaften der erhaltenen Produkte führt.

Beschreibung der Erfindung:

Die der vorliegenden Erfindung zugrundeliegende Technik stammt - allgemein betrachtet - aus dem an sich sehr weiten Gebiet der Sol/Gel-Prozesse und deren Anwendung, und im Speziellen aus jener Technologie, welche zu organisch modifizierten Keramikmaterialien führt. Sie beruht auf einem "schnellen" Sol/Gel-Prozess [1, 9, 10], ist jedoch nicht ausschließlich darauf begrenzt. Im Prinzip kann man mit einem Sol/Gel-Prozess, beispielsweise ausgehend von einer Mischung von Alkyl-Alkoxysilan-Monomeren, Harze mit einem "Si-O-Si-Rückgrat" auf chemischem Wege produzieren, welche organisch modifiziert sind und jeweils auf ein gegebenes Problem abstimmbare Zusammensetzung und Viskosität aufweisen.

Die folgende Formel veranschaulicht dies, wenn auch sehr vereinfacht:



**Schnelles Sol/Gel-Harz
(3D-Netzwerk)**

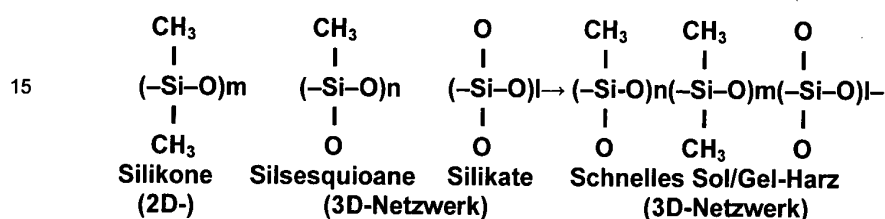
, worin $(n+2m)/(n+m+l) > 0.7$

Dem Sol/Gel-Prozess liegt eine chemische Reaktion von (Halb-)Metallalkoxid-Monomeren, und im Speziellen z.B. von Alkoxy-Alkylsilanen, mit Wasser zugrunde, welche durch eine Säure oder Base katalysiert wird. Dieser Prozess umfasst mehrere Hydrolyse- und Polymerisations-Stufen bzw. -Zustände und führt zu einer porösen, keramiktartigen Matrix mit einem weiten Spektrum an Eigenschaften, je nachdem, welche Monomere eingesetzt wurden, welche Art von Sol/Gel-Prozess zur Anwendung kommt und wie die Schritte zur Verfestigung des Gels ausgesehen haben [8].

Der z.B. aus [1, 9] bekannt gewordene schnelle Sol/Gel-Prozess "fast sol gel process" basiert auf einer raschen Hydrolyse und Polymerisation einer Mischung von $(\text{Me})_x\text{Si}(\text{O-Me})_{4-x}$ -Monomeren mit annähernd stöchiometrischen Mengen an Wasser. Das besondere Merkmal dieser Methode besteht darin, dass kein Lösungsmittel oder überschüssiges Wasser für die Solvatisierung zugegeben werden muss.

Typische Katalysatoren für die Reaktion sind übliche Säuren, z.B. Salzsäure, oder übliche Basen, wie z.B. Ammoniak, innerhalb eines weiten Konzentrations-Bereiches. Sie ermöglichen die Herstellung von glasartigen Materialien auf Basis eines Siloxan-Gerüsts innerhalb von Minuten, welche die Umsetzung selbst benötigt, und innerhalb weniger Stunden für das Aushärten bei Temperaturen im Bereich von 65 bis 140°C. Diese glasartigen Materialien lassen sich jeweils gezielt auf spezifische Gegenstände, Monolithe, Verbundstoffe, Überzugsschichten und mikrooptische Elemente hin veränderlich gestalten und sozusagen maßschneidern. Daraus hergestellte Überzüge haften sofort und fest an den meisten Oberflächen an und bilden mit deren Oxidgruppen chemische Bindungen [10].

Es kommt bei Einsatz der im Folgenden genannten Basis-Ausgangsmaterialien zu folgender grundsätzlicher "schneller" Sol/Gel-Harzbildung:



Aufgrund der chemischen Konstitution und der dreidimensionalen Struktur ist diese soeben formelmäßig charakterisierte Familie von Umsetzungsprodukten bzw. Materialien äußerst beständig gegenüber oxidativem Abbau, und zwar bei deren Anwendung sowohl auf der Erde als auch im Weltraum [11, 12]. Im Speziellen sind Verbundstoffe unter Einsatz dieser Harze als Beschichtungsmaterial für Strukturelemente, welche bei hohen Temperaturen in hoch-oxidativer Umgebung eingesetzt werden sollen, besonders geeignet.

Es wurde unlängst gezeigt [13], dass eine Katalyse mit Flusssäure bei der schnellen Sol/Gel-Reaktion unter Anwendung von Konzentrationen zwischen 1 und 20 Mol/l zu Sol/Gel-basierten Keramiken führt, welche hohe mechanische Widerstandsfähigkeit und daher geringe Bereitschaft zu Belastungsbrüchen aufweisen. Diese Widerstandsfähigkeit ist einem teilweisen Ersatz der Si-O-Si-Brücken in der Matrix durch Si-F-Endgruppen zuzuschreiben, was zu einer erhöhten Mobilität der Gruppen und zur "Heilung" von Bindungen durch Si-F- zu Si-O-Bindungs-Austausch und zu Relaxationseffekten führt.

Die vorliegende Erfindung macht sich einen wie beschriebenen "schnellen" Sol/Gel-Prozess auf Basis von Silanen zu Nutze, und ihr Ziel liegt darin, einen solchen Prozess für die Beschichtung eines - bisher nur mit wenig befriedigendem Erfolg mit einem gegen oxidativen Abbau bei höheren Temperaturen resistenten Überzug zu versehenes - Substrates einzusetzen.

Unter einem wie oben angeführten "schnellen" Sol/Gel-Prozess ist ein Harzbildungsprozess zu verstehen, dessen Dauer vom Beginn der Reaktion der Silan-Monomere mit dem Wasser bis zum Auftragen des Harzes auf das Substrat maximal 1h beträgt. Dies gilt für einen derartigen Sol/Gel-Prozess, welcher nicht durch Zugabe einer Lewis-Base, wie z.B. THF od.dgl., oder auf andere Weise, wie z.B. durch Kühlung, angehalten bzw. verzögert wird.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist somit ein neues Verfahren zur Herstellung einer Beschichtung auf Basis von Silicium(oxi)carbid auf einem Substrat, insbesondere aus der Gruppe Kohlenstoff, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbundmaterialien und Kohlenstoff-Siliciumcarbid-Verbundmaterialien, wobei eine Lösung von mindestens einem organische Gruppen aufweisenden Silan und Wasser in Gegenwart eines sauren oder basischen Katalysators der Hydrolyse und Polykondensation unterworfen wird und nach zumindest teilweiser Entfernung der dabei frei werdenden, flüchtigen Verbindungen, insbesondere Alkohol(e) oder Phenole, das erhaltene Sol und/oder Gel, gegebenenfalls in mehreren Schichten, auf das Substrat aufgebracht wird und nach einer Trocknung das erhaltene, mit der Beschichtung versehene Substrat, gegebenenfalls mehrstufig, bis auf Temperaturen von über 1300°C erhitzt wird.

Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass - für den Erhalt einer gegen oxidativen Abbau resistenten SiC-Keramik-Beschichtung - ein (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomer oder aber ein Gemisch von mindestens zwei (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomeren, stöchiometrisch

insgesamt entsprechend der allgemeinen Formel



5 worin

R und R' unabhängig voneinander Alkyl mit 1 bis 5, vorzugsweise 1 bis 3 Kohlenstoffatomen und/oder Aryl, insbesondere Phenyl, und

x eine beliebige Zahl von 1,0 bis 4,0

bedeuten, unter Ausschluss eines Zusatzes auf Basis eines kohlenstoffhaltigen Materials, mit Wasser in einem Wasser-zu-Silan-Molverhältnis von 0,3 bis 3,0, vorzugsweise von 0,6 bis 1,8, zu dem jeweils entsprechenden flüssigen bzw. fließfähigen Sol-Harz umgesetzt wird, und dass die nach teilweisem Entfernen flüchtiger Komponenten aus demselben, Auftragen desselben auf das Substrat und Trocknen erhaltene, im wesentlichen glasartige Auftragsschicht durch Erhitzen auf Temperaturen von bis zu 1850°C, vorzugsweise bis maximal 1600°C in die erwünschte keramika-

15 tige SiC-Beschichtung übergeführt bzw. umgewandelt wird.

Die erfindungsgemäß zum Einsatz kommenden, in einem "schnellen" Sol/Gel-Prozess hergestellten, Harze enthalten im Durchschnitt mindestens 0,7 und gemäß einer - dem Anspruch 2 zu entnehmenden - bevorzugten Ausführungsform 0,7 bis 1,2 organische Gruppen pro Silan-Monomereinheit. Die genannten Harze bilden nach ihrem Auftrag auf dem mit dem neuen Schutzüberzug zu versehenen Gegenstand einen "grünen" Sol/Gel-Überzug, welcher ausgezeichnet haftet und sich nach dem Trocknen innerhalb weniger Stunden bei erhöhten Temperaturen verfestigt. Es werden dabei weder Additive noch organische Verdickungsmittel für den Sol/Gel(-Umwandlungs)Prozess benötigt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass dieser neue Sol/Gel-Prozess ohne Zugabe von kohlenstoffhaltigen Materialien, wie sie aus dem Stand als Verdickungsmittel für die Herstellung von SiC-Überzügen bekannt sind, erfolgt, und dass er bezüglich Zusammensetzung, Reaktions-Prozess bzw. -Verlauf und Aushärtungs-Bedingungen wenig empfindlich ist, und dies ganz im Gegensatz zu einem prinzipiell ähnlichen, bekannten Prozess, dessen Ziel die Herstellung optischer Elemente ist [1].

Der oben genannte "grüne" Überzug wird erfindungsgemäß bevorzugterweise mittels eines mit stufenweisen Temperaturerhöhungen verlaufenden thermischen Prozesses in inerter Atmosphäre bei Temperaturen bis zu 1850°C in einen Silicium(oxi)carbid-Überzug umgewandelt.

Bei diesem Prozess unterliegen die organischen Substituenten an den Silicium-Atomen einer oxidativen Pyrolyse gemäß der folgenden - hier nur schematisch dargestellten - Reaktion:



Die Zusammensetzung des erfindungsgemäß erhältlichen Silicium(oxi)carbides ist selbst maßschneiderbar, indem die Zusammensetzung der Sol/Gel-Reaktanten jeweils genau auf eine Zieleigenschaft zugeschnitten sind.

40 Es können auch andere Elemente als Silicium, nämlich z.B. Titan oder Bor, in die Sol/Gel-Matrix eingebaut werden, und zwar durch Zugabe von dieselben enthaltenden Precursoren auf Organo-Metall-Basis in die zum Einsatz gelangenden Silane. Letztlich wird bei der Einwirkung der hohen Temperaturen und in der oxidativen Umgebung der Überzug durch sich selbst geschützt und zwar durch die inhärente Bildung einer äußeren bzw. äußersten SiO₂-Überzugsschicht.

45 Es hat sich gezeigt, dass besonders resistente Silicium(oxi)carbid-Überzüge auf Kohlenstoff-Substraten erzielbar sind, wenn - wie gemäß Anspruch 3 vorgesehen, ein - wie oben erwähn-

ten - "schneller" Sol/Gel-Prozess zum Einsatz kommt. Was die Möglichkeiten der Modifikation der Eigenschaften der neuen Überzüge auf den speziellen kohlenstoff-basierten Substraten betrifft, können diese, gleich beginnend mit dem Auftragen des Sol/Gel-Harzes, mit dessen Eigenschaften im "grünen" Zustand, beim Trocknen und letzten Endes bei der Hoch-Temperaturbehandlung und beim fertigen Überzug dadurch erweitert werden, dass, siehe dazu im Einzelnen den Anspruch 4, hydrolysefähige metall- bzw. halbm-

50 organische Verbindungen der verschiedensten Art zugesetzt werden. Bezüglich der Form bzw. des Zustandes, in welcher bzw. in welchem die Sol/Gel-Harze bevorzugterweise zum Einsatz kommen, gibt der Anspruch 5 näher Auskunft.

55

Um optimale Bedingungen für die Aufbringung der Harze für die Bildung des "grünen" Überzugs auf dem zu beschichtenden Substrat zu schaffen, kann der Zusatz von, z.B. die Hydrolyse-reaktion kurzzeitig stoppenden, Substanzen, wie z.B. Tetrahydrofuran, oder von viskositäts-verändernden Lösungsmitteln günstig sein, wie dies aus dem Anspruch 6 hervorgeht.

5 Dem Anspruch 7 sind einige bevorzugte Methoden für das Aufbringen der Sol/Gel-Harze auf das Substrat zu entnehmen.

Bezüglich besonders günstiger Bedingungen beim Trocknen der auf das Substrat aufgetragenen "grünen" Überzüge sei auf den Anspruch 8 verwiesen.

10 Der Anspruch 9 enthält Angaben bezüglich der für die schonende Pyrolyse des getrockneten Harz-Überzugs günstigsten Bedingungen.

Dem Anspruch 10 sind die für die Durchführung der Härtung und Pyrolyse des Harz-Auftrags günstigsten Methoden der Erhitzung des mit dem Überzug versehenen Substrates zu entnehmen.

15 Was die für die Final-Eigenschaften der neuen Überzüge wichtige Verfahrensstufe der Erhitzung bzw. des "Brennens" der Überzüge betrifft, so gibt darüber der Anspruch 11 näher Auskunft.

Gemäß Anspruch 12 kann der Final-Erhitzungsprozess zusätzlich durch Überdruck-Bedingungen unterstützt werden.

20 Es kann aber - siehe dazu den Anspruch 13 - für bestimmte Aufgaben günstig sein, bei Drücken unterhalb des Umgebungsdruckes zu arbeiten, wie z.B. dann, wenn eine Rest-Entgasung od.dgl. erwünscht ist.

25 Ein weiterer wesentlicher Gegenstand der Erfindung besteht in der neuartigen Verwendung der Silane bzw. Silan-Harze der oben genannten allgemeinen Formel (I) für die Herstellung der neuen, gegen oxidativen Abbau resistenten Überzüge bzw. Beschichtungen auf Kohlenstoff- bzw. Silicium/Kohlenstoff-basierten Substraten gemäß dem Anspruch 14.

Schließlich kommen für die neue Verwendung die im Anspruch 15 implizit angeführten Ausführungs-Varianten in Frage.

Anhand der folgenden Beispiele wird die Erfindung näher erläutert:

30 Beispiele:

Allgemeine Beschreibung der Herstellung der Harze:

Die für die Herstellung der für die Beschichtung von C-Substraten vorgesehenen Harze benötigten Chemikalien und Methoden für die Bereitung von "schnellen" Sol/Gel basierten Harzen sind als solche an verschiedenen Stellen schon beschrieben worden [1, 4, 5]. Eine typische Methode 35 umfasst das Mischen von Methyltrimethoxysilan (MTMS) mit geringen Mengen Dimethyldimethoxysilan (DMDMS) und/oder Tetramethyl-Orthosilikat (TMOS); rasche Zugabe von wässriger HCl ($5 \cdot 10^{-3}$ M) oder HF (1-5 M) und zwar so eingestellt, dass 0,5 Mol Wasser pro Mol Silan-Alkoxid(od.dgl.)-Gruppe zugegeben werden. Dann wird 10 min lang bei 100°C in einem verschlossenen Reaktionskolben gerührt, wonach ein allmähliches Öffnen des Kolbens während einer 40 Zeitdauer von etwa 10 min erfolgt und das Methanol in einem Ausmaß von etwa 50%, bezogen auf das ursprüngliche Gewicht der Ausgangsmischung, abgedampft wird, und wonach schließlich das Gießen des Films bzw. dessen Aufbringung auf ein jeweils zu beschichtendes Substrat erfolgt. Die Aushärtung erfolgt dann innerhalb von 1 bis 2 Tagen bei 65-70°C.

45 Mit anderen (Halb-)Metallen modifizierte Harze können durch Zugabe eines Precursors dieser Metalle, wie z.B. Titaniumalkoxid oder Borsäure(-Anhydrid), in jeweils gewünschtem Prozentsatz zu der Mischung der Silane der Formel I modifiziert werden. Die Sol/Gel-Reaktion erfolgt genauso wie soeben beschrieben, nur mit dem Unterschied, dass das molare Verhältnis des einzusetzenden Wassers gesenkt wird, um eine zu frühe Bildung eines Gels aus dem Sols zu vermeiden.

50 Herstellung der SiC-Überzüge:

HCl- und HF-katalysierte Sol/Gel-Harze werden auf handelsübliche Kohlenstoff- und C/SiC-Streifen mit den Maßen 5x10x50 mm aufgebracht, indem diese Streifen für verschieden lange 55 Zeitdauer in das kochende Sol getaucht werden, wobei das Gel in verschiedenen Verdünnungen, beispielsweise mit Tetrahydrofuran (THF), vorliegt. Die Aushärtung erfolgt bei Umgebungstemperatur über mehrere Tage oder bei 70°C innerhalb eines Tages.

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Überzüge lassen sich gemäß den ARCS-Testmethoden, welche in [10] beschrieben sind, bestimmen.

Beispiel 1:

5 MTMS-basierter Siliciumoxycarbid-Überzug:

40 g Methyltrimethoxysilan (MTMS, Aldrich, CP) wurden in einem Kolben mit Magnetrührstäbchen und Schraubkappe eingebracht, und es wurden 8 g Salzsäure 0,01 M zugegeben. Dabei wurden keinerlei Lösungs- oder Verdünnungsmittel eingesetzt. Der Kolben wurde nur leicht verschlossen und in ein Wasserbad mit 100°C gestellt, wobei 10 min lang gerührt wurde. Nach 10 min wurde die Verschlusskappe nach und nach geöffnet und zwar ebenfalls wieder innerhalb von 10 min, um ein allmähliches Abdestillieren bzw. Abdampfen des bei der Hydrolyse- und Kondensations-Reaktion entstehenden Methanols zu ermöglichen. Nach dieser Zeit wurde der Kolben offen gehalten und das Gewicht des entstandenen Harzes wurde gravimetrisch, und zwar in Minuten-Abständen, bestimmt. Als das Gewicht des Harzes etwa 28 g erreicht hatte, wurde dasselbe auf die mit einem Schutzüberzug zu versahenden Materialien auf Basis von Kohlenstoff aufgebracht:

15 Dazu wurden Kohlenstoff- und C/SiC-Streifen der schon oben genannten Maße in das Harz im Kolben eingebracht und es wurde dort 30 s lang gerührt, wonach die Streifen dem Kolben entnommen und getrocknet wurden.

20 In einem Ofen mit inerter Atmosphäre wurden die Substrat-Streifen mit den Sol/Gel-basierten Überzügen bei Temperaturen von 900°C in Silicium(oxi)carbid-Überzüge umgewandelt.

Die so hergestellten C/SiC-Überzüge wurden auf ihre Eigenschaften geprüft.

Ergebnis:

25 Masseverlust der beschichteten Probekörper beim Oxidations-Versuch (Aufheizgeschwindigkeit 5 K/min auf 900°, 1 h Haltezeit, mit 5 K/min Abkühlung auf Umgebungstemperatur, im Luftstrom: 0,4%.

Beispiel 2:

30 17,65 g Dimethyldimethoxysilan (DMDMS, Aldrich, CP) und 22,35 g Tetramethylorthosilikat (TMOS, Aldrich, CP), (Molverhältnis 1:1) wurden in einem Kolben mit Magnetrührstäbchen und Schraubkappe eingebracht. Dann wurden 8 g Salzsäure 0,01 M zugegeben. Es wurden keine Verdünnungs- oder Lösungsmittel eingebracht. Der Kolben wurde leicht verschlossen und in einem 100°C-Wasserbad wurde die Mischung 10 min lang gerührt. Nach 10 min wurde der Verschluss allmählich geöffnet, und zwar ebenfalls innerhalb von 10 min, um ein langsames Abdampfen des bei der Reaktion gebildeten Methanols zu ermöglichen. Danach wurde der Kolben offen gelassen, und das Gewicht des Harzes wurde in Ein-Minuten-Abständen gravimetrisch bestimmt. Als das Harz ein Gewicht von etwa 28 g erreicht hatte, wurde es auf das mit dem Schutzüberzug zu versahende Material aufgebracht.

35 Dazu wurden Kohlenstoff- und C/SiC-Streifen der schon oben genannten Maße in das Harz im Kolben eingebracht und es wurde dort 30 s lang gerührt, wonach die Streifen dem Kolben entnommen und getrocknet wurden.

40 In einem Ofen mit inerter Atmosphäre wurden die Sol/Gel-basierten Überzüge bei Temperaturen von 900°C in SiC umgewandelt.

Der so hergestellte C/SiC-Überzug wurde auf seine Eigenschaften geprüft.

Ergebnis:

45 Masseverlust bei Bedingungen wie im Beispiel 1 angegeben: 0,1%.

Beispiel 3:

Es wurde, wie in den vorhergehenden Beispielen beschrieben, verfahren, wobei folgende Harz-Ausgangsstoffe eingesetzt wurde:

50 34 g Methyltrimethoxysilan (MTMS, Aldrich, CP) und 6 g Dimethoxydimethylsilan (DMDMS, Aldrich, CP) wurden in einem Kolben mit Rührstäbchen und Schraubkappe eingebracht und es wurden 8,3 g HF 2,5 M zugegeben.

Die Herstellung des Harzes und des Überzuges auf dem Substrat wurden in gleicher Weise vorgenommen, wie schon im Beispiel 1 beschrieben.

55 Die so hergestellten C/SiC-Überzüge wurden auf ihre Eigenschaften geprüft.

Ergebnis:

Masseverlust bei Bedingungen wie im Beispiel 1 angegeben: 0,1%.

Beispiel 4:

- 5 Es wurde in gleicher Weise wie in Beispiel 3 vorgegangen, nur mit dem Unterschied, dass das Sol/Gel- basierte Harz auf das 1,5-Fache mit Tetrahydrofuran (THF) verdünnt wurde, bevor dessen Auftrag auf das Substrat erfolgte. Die Herstellung und Fertigstellung des Überzugs erfolgte in gleicher Weise wie im Beispiel 1 beschrieben.

Der so hergestellte C/SiC-Überzüge wurden auf ihre Eigenschaften geprüft.

10 Ergebnis:

Masseverlust bei Bedingungen wie im Beispiel 1 angegeben: 0,3%.

Beispiel 5:

- 15 13,6 g Methyltrimethoxysilan (MTMS, Aldrich, CP) und 12 g Dimethoxydimethylsilan (DMDMS, Aldrich, CP) wurden in einen Kolben mit Magnetrührstäbchen und Schraubkappe eingebracht. Es wurden 0,31 g B₂O₃ und 2,7 g H₂O zugegeben und kein sonstiger Katalysator. Es wurden weiters keinerlei Lösungs- oder Verdünnungsmittel eingesetzt. Der Kolben wurde nur leicht verschlossen und in ein Wasserbad mit 100°C gestellt, wobei 10 min lang gerührt wurde. Nach 10 min wurde die Verschlusskappe nach und nach geöffnet, und zwar ebenfalls wieder innerhalb von 10 min, um ein allmähliches Abdestillieren des bei der Reaktion entstehenden Methanols zu ermöglichen. Nach 20 dieser Zeit wurde der Kolben offen gehalten, und das Gewicht des entstandenen Harzes wurde jeweils in Minuten-Abständen bestimmt. Als das Gewicht des Harzes etwa 17 g erreicht hatte, wurde es auf mit einem Schutzüberzug zu versehendes Substrat-Material aufgebracht, indem Kohlenstoff- und C/SiC-Streifen der oben genannten Maße in das Harz im Kolben eingebracht 25 wurden, und es wurde dort 30 s lang gerührt, wonach die Streifen dem Kolben entnommen und getrocknet wurden.

In einem Ofen mit inerter Atmosphäre wurden die Sol/Gel-Harz-basierten Überzüge bei Temperaturen von 900°C in C/SiC-Überzüge umgewandelt.

Die so hergestellten C/SiC-Überzüge wurden auf ihre Eigenschaften überprüft.

30 Ergebnis:

Masseverlust bei Bedingungen wie im Beispiel 1 angegeben: 0,3%.

Liste der Publikationen, Stand der Technik:

- 35 [1] Y. Haruvy and S.E. Webber, FAST SOL-GEL PREPARATION OF GLASSES, *US Patent*, 5,272,240 (1993) [*Patent Appl. SN/07/707,140* (1991)].
- [2] Y. Haruvy and S.E. Webber, ELECTRIC FIELD CURING OF POLYMERS, *US Patent* 5,357,015 (1994) [*Patent Appl. SN/08/028,786* (1993)].
- 40 [3] European Patent 0482782B1, "Sol gel method of making silicon carbide and protecting a substrate", DeCastro, L.D. (1990).
- [4] H. Prasse, H. Luech, H. Nickel, "Investigations for Improved Strength and Oxidation Resistance of Coat-Mix Mould Materials", NTIS TIB/B91-00456.
- [5] M.A. Villegas, M. Aparicio, A. Duran, "Thick Sol-Gel Coatings Based on the B₂O₃ / SiO₂ System", *J. Non-Cryst. Solids*, **218**, 146-150 (1997).
- 45 [6] M. Aparicio, A. Duran, "Infiltration of C/SiC Composites with Silica Sol-Gel Solutions", *J. Mater. Res.*, **14**, 4230-4238 (Part I); 4239-4245 (Part II) (1999).
- [7] N. Takamura, K. Taguchi, T. Gunji, Y. Abe, "Preparation of Silicon Oxycarbide Ceramic Films by Pyrolysis of Polymethyl- and Polyvinylsilsesquioxanes", *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **16**, 227-234 (1999).
- 50 [8] Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, C. J. Brinker, G. W. Scherer (Editors), Academic Press, San-Diego, CA, USA (1990).
- [9] Y. Haruvy, A. Heller and S.E. Webber, "Sol-Gel Preparation of Optically Clear Supported Thin-Film Glasses Embodying Laser Dyes - Novel Fast Method", Chap. 28 in *Proc. ACS Symp.*, **499**, "Supramolecular Architecture: Synthetic Control in Thin Films and Solids", T. Bein, Ed, ACS (1992).
- 55

- [10] Y. Haruvy, I. Gilath, M. Maniewicz and N. Eisenberg, *Sol-Gel Replication of Micro-Optical Elements and Arrays*, **Chem. Mater.**, special issue on Sol-Gel Derived Materials, **9**, 2604 (1997).
- [11] Y. Haruvy et al., "ATOX Protective Coating for Space-Materials by the New Fast Sol-Gel Process", Proc. 2nd Int. Conf. on "Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment", Toronto, Canada, Feb. 24-25 (1994).
- [12] Y. Haruvy, "Low Flux Atomic Oxygen: Can it be More Hazardous than High Flux ? A Risk Assessment Study", Proc. 3rd Int. Conf. on "Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment", Toronto, Canada April 25-26 (1996).
- [13] Y. Haruvy, "Space Environment Aspects of Fast Sol-Gel-Derived Glassy Materials and Coatings", ARCS Report OFZS-W-0013 (1999).

PATENTANSPRÜCHE:

1. Verfahren zur Herstellung einer Beschichtung auf Basis von Silicium(-oxi-)carbid auf einem Substrat, insbesondere aus der Gruppe Kohlenstoff, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbundmaterialien und Kohlenstoff-Siliciumcarbid-Verbundmaterialien, wobei eine Lösung von mindestens einem organische Gruppen aufweisenden Silan und Wasser in Gegenwart eines sauren oder basischen Katalysators der Hydrolyse und Polykondensation unterworfen wird und nach zumindest teilweiser Entfernung der dabei frei werdenden flüchtigen Verbindungen, insbesondere Alkohol(e) oder Phenole, das erhaltene Sol und/oder Gel, gegebenenfalls in mehreren Schichten, auf das Substrat aufgebracht wird und nach einer Trocknung das erhaltene, mit der Beschichtung versehene Substrat, gegebenenfalls mehrstufig, bis auf Temperaturen von über 1300°C erhitzt wird,
dadurch gekennzeichnet,
dass - für den Erhalt einer gegen oxidativen Abbau resistenten SiC-Keramik-Beschichtung - ein (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomer oder aber ein Gemisch von mindestens zwei (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomeren, stöchiometrisch insgesamt entsprechend der allgemeinen Formel
- $$R_xSi(OR')_{4-x} \quad , (I)$$
- worin
R und R' unabhängig voneinander Alkyl mit 1 bis 5, vorzugsweise 1 bis 3 Kohlenstoffatomen und/oder Aryl, insbesondere Phenyl, und
x eine beliebige Zahl von 1,0 bis 4,0
bedeuten, unter Ausschluss eines Zusatzes auf Basis eines kohlenstoffhaltigen Materials, mit Wasser in einem Wasser-zu-Silan-Molverhältnis von 0,3 bis 3,0, vorzugsweise von 0,6 bis 1,8, zu einem entsprechenden flüssigen bzw. fließfähigen Sol-Harz umgesetzt wird, und dass die nach teilweisem Entfernen flüchtiger Komponenten, Auftragen auf das Substrat und Trocknen erhaltene, im wesentlichen glasartige Auftragsschicht durch Erhitzen auf Temperaturen von bis zu 1850°C, vorzugsweise bis maximal 1600°C, in die erwünschte keramikartige SiC-Beschichtung übergeführt bzw. umgewandelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomer bzw. eine Mischung von mindestens zwei (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomeren eingesetzt wird, in welchem bzw. in welcher die mittlere Anzahl der organischen Reste R pro (Alkyl- und/oder Aryl-)Alkoxysilan-Monomer(e) zumindest 0,7 und maximal 2, vorzugsweise von 0,7 bis 1,2, beträgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Sol/Gel-basierte Harz mittels eines "schnellen" Sol/Gel-Prozesses, vorzugsweise bei Temperaturen von 60 bis 140°C, insbesondere von 80 bis 120°C, gegebenenfalls bei Unterdruck, hergestellt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass in das Sol/Gel basierte Harz Sol/Gel-Precursor auf Basis von organischen Verbindungen mindestens eines Metalles und/oder Halbmetalles, ausgenommen Silicium, eingebaut werden, wobei an das (Halb-)Metallatom mindestens ein organischer Rest aus der Gruppe: Alkyl,

- Aryl, Alkoxy, Aryloxy, Arylalkoxy und Alkylaryloxy, und/oder zumindest eine OH-Gruppe gebunden ist und die genannte Zahl der Reste bzw. Gruppen jeweils der Oxidationszahl des (Halb-)Metallatoms entspricht, und wobei als Precursor besonders bevorzugt Borsäure bzw. Borsäure-Anhydrid und/oder Aluminiumhydroxid und/oder eine titan-organische Verbindung eingesetzt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sol/Gel-basierten Harze in Form einer viskosen Flüssigkeit, als viskoses Sol oder als teilweise geliertes Harz, vorzugsweise mit einer Viskosität im Bereich von 100 bis 1000 mPa.s, vorliegen, bevor sie auf die mit ihnen zu schützenden Materialien bzw. Substrate aufgetragen werden.
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sol/Gel-basierten Harze nach Abdampfen einer jeweils vorgesehenen Menge des (der) bei der Reaktion der Silane mit Wasser jeweils gebildeten Alkohols (Alkohole) und/oder Phenols (Phenole) mittels zumindest eines Lösungsmittels, wie insbesondere THF, Aceton und/oder Methanol, verdünnt werden, um ihnen die für die jeweils gewählte Art der Aufbringung auf die zu schützenden Materialien bzw. Substrate geeignete Viskosität zu verleihen.
 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sol/Gel-basierten Harze auf die zu schützenden Materialien bzw. Substrate durch Aufwalzen, Bürsten, Aufgießen, Tauchen, Sprühen, Vakuum-Imprägnieren od. dgl. aufgebracht werden.
 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sol/Gel-basierten Harze nach ihrem Auftrag auf die zu schützenden Materialien bzw. Substrate, gegebenenfalls bei Unterdruck, bei Umgebungstemperatur oder erhöhter Temperatur, vorzugsweise bei Temperaturen zwischen 70 und 100°C, aushärten gelassen werden.
 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Sol/Gel-basierte Harz nach dessen Auftrag zumindest einem Pyrolyseschritt innerhalb eines Temperaturbereiches von 400 bis 550°C unterworfen wird.
 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Aushärtungs- und/oder der Pyrolyseschritt mittels direkter Beheizung, Konvektions-, Strahlungs-, Mikrowellen- oder Induktiv-Heizung vorgenommen wird.
 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das mit dem gemäß einem der Ansprüche 8 bis 10 ausgehärteten und pyrolysierten Überzugsmaterial versehene Substrat einem Hochtemperatur-Erhitzungsprozess bei Temperaturen von bis zu 1850°C, vorzugsweise bis maximal 1600°C, unterworfen wird, wobei der Überzug in ein keramisches Material umgewandelt wird, dessen Hauptkomponente durch Silicium(oxi)carbid gebildet ist.
 12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Hochtemperatur-Erhitzungsprozess bei erhöhtem Druck, vorzugsweise bei einem Druck von maximal 50 bar, durchgeführt wird.
 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest der Hochtemperatur-Erhitzungsprozess teilweise unter Vakuum und/oder in inerter Atmosphäre oder aber in einer teil-oxidativen oder teil-reduktiven Atmosphäre durchgeführt wird.
 14. Verwendung von Silanen bzw. Silanmonomeren der allgemeinen Formel I für die Herstellung von gegen oxidativen Abbau resistenten Überzügen bzw. Beschichtungen von Gegenständen bzw. Substraten aus der Gruppe Kohlenstoff, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbundmaterialien und Kohlenstoff-Siliciumcarbid-Verbundmaterialien mit der Maßgabe, dass mindestens ein Silan der allgemeinen Formel I mit Wasser in einem Wasser-zu-Silan-Molverhältnis von 0,3 bis 3,0, vorzugsweise von 0,6 bis 1,8, im Rahmen eines "schnellen" Sol/Gel-Prozesses zu einem entsprechenden flüssigen bzw. fließfähigen Sol/Gel-basierten Harz umgesetzt wird, und dass die nach teilweisem Entfernen flüchtiger Komponenten, Auftragen auf das Substrat und Trocknen erhaltene, im wesentlichen glasartige, Auftragschicht durch Erhitzen auf Temperaturen von bis zu 1850°C, vorzugsweise von bis zu 1600°C, in die erwünschte keramikartige SiC-Beschichtung übergeführt bzw. umgewandelt

ist.

15. Verwendung nach Anspruch 14 mit der Maßgabe, dass die SiC-Beschichtung auf dem genannten Substrat nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13 aufgebracht ist.

5

KEINE ZEICHNUNG

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55