



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑪ CH 657 872 A5

⑤① Int. Cl.⁴: C 22 C 19/00
C 22 C 38/18
F 02 C 7/00
B 32 B 15/01

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑫① Gesuchsnummer: 1587/85

⑫② Teilgesuch von: 6388/81

⑫② Anmeldungsdatum: 05.10.1981

⑫③ Priorität(en): 06.10.1980 US 194084
14.08.1981 US 292857

⑫④ Patent erteilt: 30.09.1986

⑫⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 30.09.1986

⑫⑦ Inhaber:
General Electric Company, Schenectady/NY
(US)

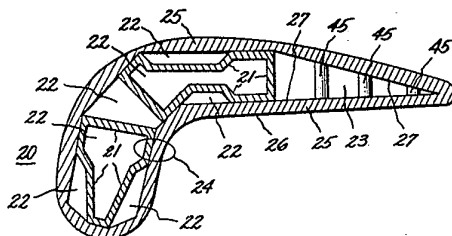
⑫⑦ Erfinder:
Jackson, Melvin Robert, Schenectady/NY (US)
Rairden, John Ruel, III, Schenectady/NY (US)

⑫⑦ Vertreter:
R. A. Egli & Co., Patentanwälte, Zürich

⑫⑤ Verbunderzeugnis aus mindestens zwei Superlegierungen.

⑫⑤ Das Verbunderzeugnis besteht aus mindestens zwei Superlegierungen auf Nickel-, Kobalt- oder Eisenbasis. Die Superlegierungen weisen voneinander verschiedene Zusammensetzungen auf. Der Verbund weist eine erste Schicht aus der ersten Superlegierung und, über mindestens einem Teil dieser ersten Schicht und daran angrenzend, mindestens eine zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung auf. Im Verbunderzeugnis weisen die Superlegierungen weniger als 1000 ppm Sauerstoff und eine chemisch homogene, von Mikroausscheidungen im wesentlichen freie Mikrostruktur auf, sowie entweder (A) eine Dichte von mehr als 97 % der theoretischen Dichte und eine Korngrösse im Bereich von 0,2 µm bis 0,5 µm, oder (B) eine Dichte von mehr als 98 % der theoretischen Dichte und eine Korngrösse im Bereich von 0,5 µm bis 5 µm. Das Erzeugnis ist vorzugsweise als Schaufel für eine Strömungsmaschine, insbesondere für eine Gasturbine verwendbar. Bevorzugt ist eine Schaufel (20), die als Hohlgebilde mit einer Vielzahl von Durchlässen (22, 23) ausgebildet ist. Dabei ist die erste Schicht aus der ersten Superlegierung so geformt, dass sie wenigstens einen der hohlen Durchlässe festlegt. Die zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung umschliesst diese Durchlässe und weist innere sowie äussere Umfangsoberflächen auf. Die genannte äussere Umfangsoberfläche legt die Form der Schaufel fest. Mindestens ein Teil der inneren Umfangs-

oberfläche ist über mindestens einem Teil der ersten Schicht aus der ersten Superlegierung und daran angrenzend angeordnet.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verbunderzeugnis aus einer ersten und mindestens einer zweiten Superlegierung, die aus der von Superlegierung auf Nickelbasis, Superlegierung auf Kobaltbasis und Superlegierung auf Eisenbasis gebildeten Gruppe ausgewählt sind, wobei beide Superlegierungen voneinander verschiedene Zusammensetzungen aufweisen und der Verbund eine erste Schicht aus der ersten Superlegierung und, über mindestens einem Teil dieser ersten Schicht und daran angrenzend, mindestens eine zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass beide Superlegierungen im Verbunderzeugnis eine Dichte von mehr als 97% der theoretischen Dichte, eine Korngrösse im Bereich von 0,2 µm bis 0,5 µm, weniger als 1000 ppm Sauerstoff und eine chemisch homogene, von Mikroausscheidungen im wesentlichen freie Mikrostruktur aufweisen.

2. Verbunderzeugnis aus einer ersten und mindestens einer zweiten Superlegierung, die aus der von Superlegierung auf Nickelbasis, Superlegierung auf Kobaltbasis und Superlegierung auf Eisenbasis gebildeten Gruppe ausgewählt sind, wobei beide Superlegierungen voneinander verschiedene Zusammensetzungen aufweisen und der Verbund eine erste Schicht aus der ersten Superlegierung und, über mindestens einem Teil dieser ersten Schicht und daran angrenzend, mindestens eine zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass beide Superlegierungen im Verbunderzeugnis eine Dichte von mehr als 98% der theoretischen Dichte, eine Korngrösse im Bereich von 0,5 µm bis 5 µm, weniger als 1000 ppm Sauerstoff und eine chemisch homogene, von Mikroausscheidungen im wesentlichen freie Mikrostruktur aufweisen.

3. Verwendung des Verbunderzeugnisses nach Anspruch 1 oder 2 als Schaufel für eine Strömungsmaschine, gekennzeichnet durch eine Ausbildung der Schaufel als Hohlgebilde mit einer Vielzahl von Durchlässen, wobei die erste Schicht aus der ersten Superlegierung so geformt ist, dass sie wenigstens einen der hohlen Durchlässe festlegt, die zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung diese Durchlässe umschliesst und innere sowie äussere Umfangsoberflächen aufweist, die genannte äussere Umfangsoberfläche die Form der Schaufel festlegt, und mindestens ein Teil der inneren Umfangsoberfläche über mindestens einem Teil der ersten Schicht aus der ersten Superlegierung und daran angrenzend angeordnet ist.

4. Verwendung nach Anspruch 3 als Schaufel für eine Gasturbine.

Die Erfindung betrifft ein Verbunderzeugnis aus einer ersten und mindestens einer zweiten Superlegierung, die aus der von Superlegierung auf Nickelbasis, Superlegierung auf Kobaltbasis und Superlegierung auf Eisenbasis gebildeten Gruppe ausgewählt sind, wobei beide Superlegierungen voneinander verschiedene Zusammensetzungen aufweisen und der Verbund eine erste Schicht aus der ersten Superlegierung und, über mindestens einem Teil dieser ersten Schicht und daran angrenzend, mindestens eine zweite Schicht aus der zweiten Superlegierung aufweist. Sie liegt allgemein auf dem Gebiet des Metallgiessens und insbesondere auf durch Niederdruck/Hochgeschwindigkeits-Plasmaspritzgiessen hergestellte Teile, die einzigartige Mikrostrukturen und folglich neue Kombinationen physikalischer Eigenschaften besitzen, die den physikalischen Eigenschaften von Teilen aus den gleichen Legierungszusammensetzungen, nach anderen Methoden hergestellt, überlegen sind. Erfindungsgemässe Erzeugnisse mit spezieller Brauchbarkeit aufgrund der vorge-

nannten überlegenen physikalischen Eigenschaften, wie erhöhte Temperaturfestigkeit und Duktilität und Wärmeermüdungsfestigkeit, umfassen Schaufeln aus Superlegierungen auf Nickel-, Kobalt- oder Eisenbasis für Strömungsmaschinen, insbesondere für Gasturbinen.

Seit dem Auftauchen der Gasturbine in verschiedenen Formen vor mehreren Jahrzehnten als Energie erzeugende und Antriebsmaschine von grösserer Bedeutung sind allgemein die Grenzen erkannt worden, die dem Betrieb und der Leistung dieser Maschinen durch die verfügbaren Baumaterialien auferlegt worden sind. Verhältnismässig hohe Zugfestigkeiten und gute Duktilität von Raumtemperatur bis zu den Betriebstemperaturen der Gasturbinen-Brennkammer und gute Wärmeermüdungsbeständigkeit sind in Kombination bei solchen Anwendungen äusserst wünschenswert. Ausgedehnte, bis jetzt fortdauernde Forschungs- und Entwicklungsbemühungen haben zu den heutigen sogenannten «Superlegierungen» geführt, unter denen refraktäre Legierungen auf Nickel-, Kobalt-, Eisen- und Chrombasis herausragen, zu denen z. B. solche unter den Handelsbezeichnungen Rene' 80, Rene' 95, IN 738, IN 617 und IN 671, gehören.

Aufgrund der Bedeutung der Festigkeitsanforderungen, insbesondere in den niedrigeren Temperaturbereichen beim Gasturbinenbetrieb, werden die ersten vier dieser Legierungen bei der Schaufel- und Scheibenherstellung eingesetzt, während IN 671 hauptsächlich aufgrund der Umgebungsbeständigkeit verwendet wird. Gewöhnlich gehört zu dieser Verwendung IN 671 in Schmiedeblochform, aber es ist als plasmagespritzter Überzug, direkt auf den zu schützenden Gegenstand aufgebracht, vorgeschlagen worden. Die anderen vier Legierungen jedoch werden im allgemeinen geschmolzen und zu Form und Grösse gegossen oder aus einem guss- oder pulvermetallurgischen Körper zur endgültigen Verwendung als Schaufeln und andere Gasturbinen-Bestandteile für den heissen Abschnitt mechanisch deformiert. Doch unabhängig von dem Herstellungsverfahren können Teile aus diesen Legierungen Korrosionsschutz nötig machen, der derzeit in vielen Fällen die Form eines aufgespritzten Überzugs aus einer der MCrAlY-Legierungen annimmt.

Während, wie oben angegeben, bei der Entwicklung von Materialien erhebliche Fortschritte gemacht worden sind, um den speziellen Anforderungen von Gasturbinen-Triebwerken zu entsprechen, fehlt es doch noch wesentlich an Materialmöglichkeiten. Bisher jedoch stellten Superlegierungen, die bei der Herstellung von Gasturbinen-Bestandteilen der heissen Stufe verwendet wurden, Kompromisse zwischen den oben erwähnten verschiedenen physikalischen Eigenschaften, Betriebsbedingungen und Herstellungsvorgängen dar. Dies gilt insbesondere für solche Teile, die direkt in die Form gegossen werden. So hat keine neue Superlegierung, die die Notwendigkeit für solche Kompromisse bei der Herstellung von Gussteilen für Gasturbinen-Triebwerke beseitigt, Gestalt angenommen, und es ist kein weiterer Alternativweg zur Beseitigung solcher Kompromisse vor der vorliegenden Erfindung in Erscheinung getreten.

Bei einer weiteren Lösung gemäss dem Verfahren der US-PS 4 066 117 mit dem Titel «Spray Casting von Gas Atomized Molten Metal to Produce High Density Ingots» ist als wesentliche Stufe die mechanische Deformierung des Gusskörpers durch Schmieden beteiligt, um das Gussstück aus Superlegierung zu einer Schaufel oder einem anderen Triebwerkteil zu formen.

Nun wurde gefunden, dass die Notwendigkeit für Kompromisse zwischen den Materialien zum Bau von Gasturbinenteilen und Betriebsbedingungen und für das Schmieden und ähnliche Verarbeitungsvorgänge so vermieden werden

kann, dass die lang erwünschte Kombination von Eigenschaften nun in Strömungsmaschinen-Gussteilen aus Superlegierung erhalten werden kann. Ferner wurde nun gefunden, dass dieses Ergebnis übereinstimmend erzielt werden kann, ohne die Superlegierung in ihrer Zusammensetzung zu ändern oder eine neue Superlegierung zu schaffen und ohne Belastung irgendwelcher wesentlicher Produktionskosten.

Diese neuen Ergebnisse sind die Folge der überraschenden Feststellung, dass schon lange in gegossener Form in Gasturbinen-Triebwerksteil-Herstellungsverfahren verwendete Superlegierungen in bestimmter neuer Form eine anscheinend ideale Kombination physikalischer Eigenschaften besitzen. Insbesondere wurde nun gefunden, dass in sehr feiner und gleichförmiger Mikrostrukturform diese Superlegierungen ziemlich andere und erheblich überlegene physikalische Eigenschaften, verglichen mit zuvor bekannten Formen der gleichen Legierungszusammensetzungen, besitzen. Diese neue Form, die nach den herkömmlichen Schmelz- und Gussverfahren, die bisher angewandt wurden, nicht erhältlich ist, ist durch ein Plasmaspritzgiess-Verfahren übereinstimmend herstellbar, das so durchgeführt wird, dass Körper nahezu theoretischer Dichte aus feinen Superlegierungsteilen nahe der Schmelztemperatur gebildet werden.

Herkömmliche Verfahren, die die erfindungsgemässe Verbund-Superlegierungsteile mit ihrer einzigartigen Kombination von physikalischen Eigenschaften nicht herstellen können, sind z. B. die herkömmlichen Plasmabogen-Spritzverfahren, darunter das von Mash und Brown in einer Veröffentlichung in Metals Engineering Quarterly mit dem Titel «Structure and Properties of Plasma-Cast Materials», Februar 1964, beschriebene. Die Festigkeitseigenschaften der von Mash und Brown hergestellten freistehenden Körper waren durch die erzielten Dichten (85–92%) und durch ihre lamellare Morphologie begrenzt.

Die bevorzugte Arbeitsweise zur Herstellung der Superlegierungsteile mit den einzigartigen Eigenschaften gemäss der Erfindung ist im einzelnen in der US-PS 3 839 618 (ausgegeben am 1.10.1974) mit dem Titel «Method and Apparatus for Effecting High Energy Dynamic Coating of Substrates» beschrieben worden. Tatsächlich wurde im Verlauf der Anwendung des Niederdruck/Hochgeschwindigkeitsverfahrens jener Patentschrift bei der Herstellung von Superlegierungsüberzügen die dieser Erfindung zugrunde liegende Schlüsselstellung gemacht. Bei der Untersuchung und Auswertung von unter Verwendung von Superlegierungen auf Nickelbasis in dieser Weise hergestellten Überzügen wurden nun deren ungewöhnliche Mikrostruktur und die damit verbundenen und ihr zuzuschreibenden physikalischen Eigenschaften beobachtet. Mit diesem Wissen wurden Teststücke nach Plasmaspritzverfahren hergestellt und in Vergleichstests mit herkömmlicherweise geschmolzenen und gegossenen Teststücken das erfindungsgemässe Konzept bestätigt, dass die überlegenen physikalischen Eigenschaften von Überzügen aus plasmagegossener Superlegierung leicht auch in Masseform zu erzielen sind, d. h. in Körpern, die vollständig aus plasmagegossener Superlegierung bestehen.

Auf der Grundlage der vorstehenden Feststellungen gibt es Grund zu der Annahme, dass Superlegierungen im allgemeinen sowie andere refraktäre oder warmfeste Legierungen und Legierungen mit hoher Zugfestigkeit in Temperaturbereichen deutlich unter Maximaltemperatur des Gasturbinen-Triebwerksbetrieb so zu Teilen für Gasturbinen und andere Strömungseinrichtungen, wie Schwungräder mit hohen Zugbelastungs- und Dauerschwingbeanspruchungserfordernissen plasmagegossen werden können. Als Beispiele für typische Betriebsbedingungen werden Gasturbinen-Drehscheiben gewöhnlich einer Zugbelastung bis zu 1172 MPa (170 ksi) bei 538 bis 650 °C (1000 bis 1200 °F) und einer Dauer-

schwingbeanspruchung bis zu 827 MPa (120 ksi) bei 400 bis 650 °C (750 bis 1200 °F) ausgesetzt. Ebenso werden nicht-drehende Schaufeln und Düsen in solchen Triebwerken gewöhnlich einer Kriechbeanspruchung bei Maschinenbetriebs-
5 triebstemperaturen ausgesetzt und erfordern auch eine Erwärmungsmüdigungs-Bruchfestigkeit unter Temperaturschwankungen von Raumtemperatur bis zu den Betriebstemperaturen.

Im Hinblick auf die obigen Ausführungen und insbesondere die oben erwähnten Feststellungen ist ein erfindungsgemässes Verbunderzeugnis gekennzeichnet durch die alternative in den Ansprüchen 1 oder 2 angegebene Kombination von Merkmalen. Eine bevorzugte Verwendung des Verbunderzeugnisses ergibt sich aus dem abhängigen Anspruch 3.

15 In dem Zustand, wie es durch das Plasmaspritzgiessen hergestellt wird, weist das Erzeugnis typischerweise weniger als etwa 1000 ppm Sauerstoff, eine Dichte über etwa 97% der theoretischen Dichte, eine Korngrösse von 0,2 bis etwa 0,5 µm und eine chemisch homogene Mikrostruktur, praktisch frei von Mikroentmischung, auf. In wärmebehandelter
20 Form hat dieses Verbunderzeugnis eine Dichte über etwa 98% der theoretischen Dichte und sogar noch weniger Mikroentmischung aufgrund der bei der Wärmebehandlung auftretenden Homogenisierung. Die Korngrösse des wärmebehandelten Teils ist im allgemeinen grösser als die des Gegenstands in dem plasmaspritzgegossenen Zustand und ist eine Funktion des Legierungstyps und der Zeit und Temperatur der Wärmebehandlung; aber in durch Abscheidung einer oder mehrerer Phasen verfestigten Superlegierungen
25 kann die Korngrösse unmittelbar aus der Wärmebehandlung im Bereich bis herab zu etwa 0,5 bis etwa 5,0 µm sein.

Dieses Teil oder dieser Gegenstand, ob ein Schwungrad, eine Schaufel für ein Gasturbinen-Triebwerk oder eine Scheibe zur Befestigung der Schaufel am Turbinenrad oder ein
35 anderes Teil aus dem heissen Abschnitt, kann nach dem Niederdruck/Hochgeschwindigkeits-Plasmagiessverfahren als Festkörper oder mit einem Dorn, auf dem die Superlegierung abgeschieden wird und der selektiv gelöst und entfernt wird, um ein Hohl-gussprodukt zu hinterlassen, hergestellt werden. Alternativ kann ein komplexerer Dorn oder Kern
40 verwendet werden, der nach dem Auflösen einen freistehenden, selbsttragenden Plasmaspritzguss-Körper mit einer Vielzahl hohler Bereiche hinterlässt. Dabei ist der Dorn oder Kern so segmentiert, dass ein erster Teil des fertigen Körpers aus einer ersten Superlegierung auf einem Teil des Kerns
45 plasmaspritzgegossen wird, der dann zu den übrigen Teilen des Kerns zusammengesetzt wird, und der Körper wird durch Plasmaspritzgiessen einer zweiten Superlegierung über dem fertigen Kern mit dem ersten Teil vollendet.

Fig. 1 ist ein Aufriss einer Schaufel, die durch Niederdruck/Hochgeschwindigkeits-Plasmaspritzguss von Superlegierungen hergestellt werden kann; der Körper ist eine feste Struktur.

55 Fig. 2 ist eine Teilschnittansicht ähnlich der der Fig. 1 einer anderen Schaufel, die hohl ist, hergestellt auf einer Kupferkern-einheit, die anschliessend durch selektives chemisches Lösen entfernt wurde.

Fig. 3 ist eine Querschnittsansicht der Schaufel der Fig. 2 entlang der Linie 3–3, die die inneren Durchgänge zeigt, die beim Entfernen der Einheit aus Kupferteilen der Kerneinheit entstehen, auf der die Schaufel durch Plasmaspritzgiessen
60 gebildet wurde.

Fig. 4 ist eine perspektivische Ansicht der Kupferkern-einheit, auf der die Schaufel der Fig. 2 und 3 plasmaspritzgegossen wurde.

Fig. 5 ist eine graphische Darstellung der Streckgrenze bei 0,2% Dehnung gegen die Testtemperatur für den Körper

aus IN 738-Legierung-Plasmaspritzguss, wie in Referenzbeispiel beschrieben.

Fig. 6 ist eine graphische Darstellung der Dehnung bis zum Versagen gegen die Testtemperatur für den Körper aus IN 738-Legierung-Plasmaspritzguss, wie in Referenzbeispiel beschrieben.

Fig. 7 ist ein Transmissions-Elektronenmikroskop-Bild mit 40 000facher Vergrößerung einer dünnen Blechprobe aus Rene' 80-Legierung im plasmaspritzgegossenen Zustand.

Fig. 8 ist ein Transmissions-Elektronenmikroskop-Bild mit 20 000facher Vergrößerung einer dünnen Blechprobe aus Rene' 80-Legierung im plasmaspritzgegossenen Zustand nach der Wärmebehandlung für 2 h bei 1200 °C (2190 °F).

Die Gasturbinenschaufel 10 der Fig. 1 ist ein Beispiel für die Art von Gegenständen, die durch Plasmaspritzgießen herstellbar sind. Die Schaufel 10 ist von im allgemeinen herkömmlicher Grösse und Form und hat eine Plattform 11 und ein Fussteil 12 zur Befestigung in üblicher Weise an einer Gasturbinenscheibe, wie der simulierten Scheibe 50 der Fig. 5 und des folgenden Beispiels II. Sowohl die Schaufel 10 als auch die Scheibe 50 jedoch unterscheiden sich erheblich von herkömmlichen Gegenständen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften und folglich ihrer Leistungsmerkmale bei normalem Betrieb. Dieser grundlegende und wichtige Unterschied ist eine Folge der unterschiedlichen Art und Weise, in der diese neuen Teile hergestellt werden können. So können, statt in üblicher Weise zu schmelzen und zu gießen oder in der von Mash und Brown, wie oben zitiert, beschriebenen Weise Plasmabogen-spritzzuggießen, die Schaufel 10 und die Scheibe 50 durch Fördern der Superlegierung gerade über ihrer Schmelzpunkttemperatur in feiner Teilchenform mit hoher Geschwindigkeit in einem Plasmastrom auf ein Substrat in einer Kammer in neutraler Atmosphäre bei geringem Druck gebildet werden. Im einzelnen ist die Teilchengrösse bei der Herstellung einer Schaufel, wie einer Schaufel 10 und einer Scheibe 50 unter etwa 38 µm Durchmesser, und die Kammeratmosphäre ist Argon bei 40 bis 80 mbar (30 bis 60 torr). Der hier verwendete Ausdruck «Gasturbinentriebwerk» soll Gasturbinen für die elektrische Stromerzeugung sowie Triebwerke für den Antrieb von Flugzeugen umfassen.

Die Hohl-schaukel 20 der Fig. 2 und 3 wurde in ähnlicher Weise wie oben und in Beispiel IV beschrieben durch Niederdruck/Hochgeschwindigkeits-Plasmaspritzguss mit allgemein den gleichen mikrostrukturellen und wichtigen neuen physikalischen Eigenschaftsfolgen, wie oben zusammenfassend beschrieben, hergestellt. Der wesentliche Strukturunterschied zwischen den Schaufeln 10 und 20 besteht in der Verwendung einer selektiv löslichen Kerneinheit 40 der Fig. 4, die die Innenräume liefert, die zur Herstellung der Wände 21 nötig sind, die das Innere der Schaufel in getrennte Kammern oder Durchlässe 22 und 23 für den Strom des Kühlfluids unterteilen.

Der Fachmann wird aus den folgenden Beispielen aus der Praxis der Erfindung heraus die Erfindung noch besser verstehen, da Tests zu Vergleichsdaten bezüglich der wichtigen physikalischen Eigenschaften der erfindungsgemässen Erzeugnisse und solcher nach herkömmlicher Art geschmolzener und gegossener Erzeugnisse durchgeführt worden sind. Diese Beispiele aus der Praxis dienen somit der Veranschaulichung, keineswegs der Einschränkung der Erfindung.

Die bei den Beispielen gesammelten, nachfolgend angegebenen Daten entsprechen der üblichen Praxis. So bezeichnet in der Tabelle I HZ die Höchst-Zugfestigkeit in MPa (ksi) und SD die Streckgrenze bei 0,2% Dehnung in den gleichen Einheiten. Ebenso bezeichnet D_{ML} die Dehnung bei maximaler Last, D_V bedeutet die Dehnung bis zum Versagen

und FR bedeutet die Flächenreduktion, alle drei Parameter in Prozent ausgedrückt.

Referenzbeispiel

Ein Blech aus Superlegierung IN 738 auf Ni-Basis von etwa $6,35 \times 15,24 \times 0,635$ cm ($2,5 \times 6 \times 0,25$ Zoll) wurde durch Plasmaspritzgießen nach dem oben beschriebenen Niederdruck/Hochgeschwindigkeits-Verfahren hergestellt. Das Substrat war ein Stahlblech, das mit Siliciumcarbid-Schleifpapier von 600 grit poliert worden war. Das Binden an das Substrat (Dorn oder Kern) und die Steuerung der Dichte der Legierung IN 738 und der Mikrostruktur erfolgten durch Vorheizen des Substrats auf etwa 900 °C (1650 °F). Der Zersetzungskammerdruck war 40 bis 80 mbar (30 bis 60 torr), die Plasmastolenleistung war 68 kW und die Zersetzungszeit war 4,5 min. Der überzogene Kern wurde in der Zersetzungskammer gekühlt, und dann wurde der Körper aus IN 738 vom Stahlblech abgetrennt, indem um die Kante des Bleches herum mit einem Hammer geklopft wurde. Proben mit den Abmessungen $0,16 \times 1,02 \times 2,54$ cm ($0,063 \times 0,4 \times 1,0$ Zoll) wurden aus dem Blech der Superlegierung IN 738 herausgearbeitet. Der Querschnitt war gleichförmig $0,635 \times 0,203$ cm ($0,25 \times 0,08$ Zoll). Die erzielten Testergebnisse waren, wie nachfolgend in Tabelle I zusammen mit typischen Daten herkömmlicherweise geschmolzener und gegossener IN 738-Legierung der gleichen Probengrösse und -form angegeben.

Die in herkömmlicher Weise geschmolzenen und gegossenen Proben erhielten eine handelsüblich typische Wärmebehandlung, d. h. ein Erhitzen auf 1120 °C (2050 °F) für 2 h und anschliessendes Abschrecken in Argon, dann Erhitzen auf 845 °C (1550 °F) für 2 h und anschliessendes Abschrecken in Argon vor dem Testen. Dies ist der Zustand, in dem die aus IN 738 hergestellten Teile typischerweise in gegenwärtigen Gasturbinen verwendet werden. Die Plasmaspritzgussproben erhielten eine der kommerziellen Praxis ähnliche Wärmebehandlung, die im zweistündigen Erhitzen auf 1150 °C (2100 °F) bestand.

Die Streckgrenze bei 0,2% Dehnung und die Dehnung bis zum Versagen, deren Daten die Tabelle I zeigt, sind in den Fig. 5 bzw. 6 in graphischer Form dargestellt. Unter Bezugnahme auf Fig. 5 ist zu beobachten, dass die plasmaspritzgegossenen Körper viel fester als in herkömmlicher Weise geschmolzene und gegossene Körper der gleichen IN 738-Superlegierungs-Zusammensetzung unter etwa 735 °C (1350 °F), gemessen durch die Streckgrenze (Fig. 7), sind. Die Höchst-Zugfestigkeit zeigt ein ähnliches Verhalten. Zwischen etwa 790 °C (1450 °F) und 900 °C (1650 °F) ist die Streckgrenze der plasmaspritzgegossenen Körper nur etwa 41,4 MPa (6 ksi) niedriger als die von Körpern, die nach herkömmlichen Schmelz- und Giessverfahren erarbeitet worden sind.

Unter Bezugnahme auf Fig. 6 kann ausserdem bemerkt werden, dass das Plasmaspritzgießen Körper hervorbringt, die duktiler als in herkömmlicher Weise geschmolzene und gegossene Körper der gleichen Zusammensetzung bis zu etwa 700 °C (1290 °F) sind. Bei etwa 1090 °C (2000 °F) ist der Superlegierungskörper dieses Beispiels völlig superplastisch, vermutlich aufgrund der ihm eigenen ultrafeinen Korngrösse. Mehrere Proben wurden auf 1260 °C (2300 °F) erhitzt, um ein Kornwachstum zu bewirken und zu versuchen, festzustellen, dass das superplastische Verhalten auf der ultrafeinen Korngrösse beruht. Zwei der wärmebehandelten Proben wurden getestet; eine bei Raumtemperatur und eine bei 1000 °C (1832 °F). Nach der Wärmebehandlung bei 1260 °C (2300 °F) sank die Dehnung bis zum Versagen auf 12% für die bei 1000 °C behandelte Probe, was bestätigt, dass das superplastische Verhalten auf der ihr eigenen ultrafeinen

Tabelle I

Test-Temperatur		Plasmaspritzguss IN 738		D _v %	geschmolzene und gegossene IN 738-Legierung		
°F	°C	SD 0,2% MPa (ksi)	HZ MPa (ksi)		SD 0,2% MPa (ksi)	HZ MPa (ksi)	D _v %
68	20	1034(150)	1413(205)	14	903(131)	1076(156)	6,1
932	500	1027(149)	1379(200)	12	814(118)	979(142)	6,6
1112	600	965(140)	1393(202)	14	807(117)	979(142)	7,0
1292	700	1062(154)	1241(180)	8,2	793(115)	979(142)	7,6
1472	800	703(102)	738(107)	1,4	738(107)	896(130)	8,8
1652	900	407 (59,1)	436 (63,3)	3,9	448 (65)	607 (88)	10,5
1832	1000	101 (14,6)	152 (22,0)	37	248 (36)	324 (47)	11,4
2012	1100	18 (2,6)	28 (4,1)	300	—	—	10,0

Korngrösse in dem plasmagegossenen Körper beruhte. Auch stieg für die bei 1260 °C behandelte Probe die Streckgrenze bei Raumtemperatur um 179 MPa (26 ksi) auf einen Wert von 1213 MPa (176 ksi) und um 69 MPa (10 ksi) auf einen Wert von 171 MPa (24,8 ksi) für die bei 1000 °C getestete Probe.

Beispiel

Eine Schaufel ähnlich Fig. 2 und 3, mit der Ausnahme, dass sie ohne Fussteil 12 war, wurde nach dem oben beschriebenen Plasmaspritzgussverfahren hergestellt, und zwar unter Verwendung der Kupferkerneinheit 40 der Fig. 4. Die Bedingungen der Abscheidungskammer waren die des Referenzbeispiels. In der ersten Verfahrensstufe wurde IN 738 auf Kupferkernsegmente 41 und 42 bis zu einer Dicke von etwa 0,38 mm (15 mils) plasmaspritzgegossen. Kernsegmente 41 und 42 wurden dann mit dem Rest der Kernsegmente zur Bildung der Gestalt 40 gemäss Fig. 4 zusammengesetzt. Löcher 43 in Kernsegmenten 44 wurden mit Drähten aus einer Nichrom-Zusammensetzung gefüllt.

In der zweiten Verfahrensstufe wurde Rene' 80 von 0,38 bis 0,76 mm (15 bis 30 mils) auf die Kupferkerneinheit 40 der Fig. 4 und die zuvor plasmaspritzgegossenen IN 738-Wände 21 zu einer verbundschichtartigen Struktur in Bereichen, wie Bereich 24, plasmaspritzgegossen. Nach dem Abkühlen in der Abscheidungskammer wurde die Schaufeleinheit in wässrige Salpetersäure getaucht, um die Kupferkerneile zu lösen und zu entfernen und eine gegossene Schaufel 20 zu hinterlassen, die etwa 5,1 cm (2 Zoll) Höhe (wie in Fig. 2) und etwa 3,81 cm (etwa 1,5 Zoll) von der Führungskante bis zur Hinterkante mass. Unter Bezugnahme auf Fig. 3 kann festgestellt werden, dass Innenwandsegmente 21 aus der IN 738-Superlegierung sind und strukturell durch die Rene' 80-Aussenschale 25 zur Schaufel 20 verbunden sind. Die Aussenumfangsoberfläche 26 der Rene' 80-Schale 25 definiert die Gestalt der Schaufel 20. Die Innenumfangsoberfläche 27 umschliesst Leitungen 22 und 23 und passt zumindest entlang einem Teil ihres Umfangs an die Wände 21 der plasmaspritzgegossenen Legierung IN 738 und ist damit strukturell verbunden. Die Drähte, die zuvor in Löchern 43 waren, sind nun integrale Bestandteile 45 der Schaufel und wirken das Kühlmedium durchmischend, wenn dieses in dem hohlen Inneren 23 des hinteren Abschnitts der Schaufel 20 fliesst. Die Wanddicke einer Schaufel 20 liegt im Bereich von etwa 0,38 bis 0,76 mm (15 bis 30 mils) aus Rene' 80 und zu etwa 1,14 mm (45 mils), wovon 0,38 mm (15 mils) IN 738-Superlegierung sind.

Die plasmaspritzgegossenen Körper des Beispiels und des Referenzbeispiels zeigten im wesentlichen die gleichen Mikrostrukturmerkmale, d. h. in dem plasmaspritzgegossenen Zustand lag die Korngrösse typischerweise zwischen etwa 0,2 und etwa 0,5 µm, und die Strukturen waren chemisch homogen und praktisch frei von Mikroentmischung.

Die Mikrostruktur der Rene' 80-Legierung der Fig. 10, plasmaspritzgegossen zu einem platten- oder blechartigen Körper gemäss dem Verfahren und den Arbeitsweisen des Referenzbeispiels, ist typisch für die Mikrostruktur von Superlegierungen im plasmaspritzgegossenen Zustand. Fig. 10, die eine Transmissions-Elektronenmikroskopaufnahme einer dünnen Blechprobe bei 40 000facher Vergrösserung ist, zeigt die ultrafeine Korngrösse, die zwischen etwa 0,2 und etwa 0,5 µm liegt. Fig. 10 zeigt auch, dass die Korngrenzen sowie das Korninnere praktisch frei von Mikroausscheidungen, d. h. von Abscheidungen und Entmischungen sind, d. h. sie sind chemisch homogen und praktisch frei von Mikroausscheidungen. Ein ungeschmolzenes Teilchen kann aufgrund von Störungen in der Sprühanlage oder dem Pulver gelegentlich in der Mikrostruktur der erfindungsgemässen Körper aus Superlegierung im plasmaspritzgegossenen Zustand beobachtet werden. Die Merkmale dieser Teilchen überleben aber nach der Wärmebehandlung, z. B. 2 h bei 1150 °C (2100 °F) nicht. Zur Prüfung der Körper im plasmaspritzgegossenen Zustand muss aufgrund der extrem feinen Korngrösse, die unter den Grenzen der Auflösung eines Lichtmikroskops liegt, anstelle des herkömmlichen Lichtmikroskops ein Elektronenmikroskop verwendet werden.

Eine Charakterisierung der chemischen Homogenität und des Fehlens von Mikroausscheidungen in der Rene' 80-Legierung der Fig. 10 im plasmaspritzgegossenen Zustand ist durch die Elektronenmikrosonden-Röntgenstrahlen-Fluoreszenzdaten der folgenden Tabelle II gegeben. In Tabelle II wird plasmaspritzgegossene Rene' 80-Legierung mit in herkömmlicher Weise geschmolzener und gegossener Rene' 80-Legierung verglichen, die eine durchschnittliche Korngrösse von etwa 1525 µm (60 mils) hatte. Die Daten der Tabelle II wurden durch stufenweises Abtasten eines Strahls von 1 bis 3 µm Durchmesser durch die Proben in 50 µm-Schritten für die in herkömmlicher Weise geschmolzene und gegossene Probe und in 1 µm-Schritten für die plasmaspritzgegossene Probe erhalten. In beiden Fällen tastete der Strahl sowohl Körner als auch Korngrenzen ab, und dies war für die plasmaspritzgegossene Probe notwendigerweise so, da der Strahldurchmesser etwa viermal grösser als der Korndurchmesser war.

Kobalt ist ein Element, das sich in Nickel im wesentlichen nicht entmischt, daher kann die Schwankung der Kobaltkonzentration als Anzeichen für das Ausmass der Streuung bei diesen Daten herangezogen werden. Für die plasmaspritzgegossene Probe liegt die Schwankung, d. h. die Mikroentmischung oder chemische Inhomogenität an Ti, Al und Cr etwa 2 bis 3% über der normalen Streuung. Für in herkömmlicher Weise geschmolzene und gegossene Rene' 80-Legierung ist die Schwankung für Cr und Al etwa 11% über der normalen Streuung, während die Schwankung für Ti etwa 70% über der normalen Streuung liegt. Daher liegt aufgrund der Daten der Tabelle II eigentlich keine Mi-

Tabelle II

Element	herkömmliche geschmolzene und gegossene Rene' 80-Legierung				plasmaspritzgegossene Rene' 80-Legierung			
	Ti	Al	Cr	Co	Ti	Al	Cr	Co
Bereich (Gew.-%)	3,51–9,33	2,26–3,26	9,73–14,65	8,32–9,92	4,83–5,73	2,48–2,81	11,42–12,85	7,74–8,42
Durchschnitt (Gew.-%)	5,1	2,7	12,37	9,13	5,31	2,62	11,86	8,11
Bereich um den Durchschnitt (in %)	±80	±20	±20	±9	±8	±7	±8	±5

kroentmischung oder chemische Inhomogenität in dem plasmaspritzgegossenen Material relativ zum in herkömmlicher Weise geschmolzenen und gegossenen Material vor.

Fig. 11 ist eine Transmissions-Elektronenmikroskop-Abbildung bei 20 000facher Vergrösserung einer dünnen Folienprobe, die die Mikrostruktur der Rene' 80-Legierung im plasmaspritzgegossenen Zustand wie in Fig. 10 nach 2stündiger Wärmebehandlung bei 1200 °C (2190 °F) zeigt. Die Körner sind bis auf eine Durchschnittsgrösse von etwa 5 µm gewachsen, bleiben jedoch klein im Vergleich zu der von in herkömmlicher Weise geschmolzener und gegossener Rene' 80-Legierung. γ'-Abscheidungen sind im Inneren der Körner sichtbar. Wärmebehandlung bei tieferen Temperaturen, z. B. die zweistündige Wärmebehandlung bei 1150 °C (2100 °F), wie oben im Beispiel I erwähnt, führten zu noch geringerem Kornwachstum, d. h. die Korngrösse lag in der Grössenordnung von etwa 2,0 bis etwa 3,0 µm, und theoretisch gibt es eine noch geringere Mikroentmischung aufgrund der Homogenisierungseffekte der Wärmebehandlung. Die Beständigkeit der Rene' 80-Legierung gegen Kornwachstum bei erhöhter Temperatur wurde erhofft, da diese Superlegierung durch die Abscheidung der γ'-Phase gestärkt wird.

Im Vergleich steht das Verhalten der nicht-γ'-gefestigten Nickelbasislegierung IN 617. Plasmaspritzgegossen nach dem Verfahren des Beispiels I zeigte IN 617 die gleiche ultrafeine Korngrösse (0,2 bis 0,5 µm Durchmesser) der Körper aus anderen Superlegierungen, hergestellt durch Plasmaspritzgiessen. Die Raumtemperatur-Zugeigenschaften der plasmaspritzgegossenen IN 617-Legierung waren beträchtlich besser, z. B. HZ 979 (142) gegenüber 765 MPa (111 ksi) und D_V von 54 gegenüber 34%, als die von in herkömmlicher Weise geschmolzener und gegossener IN 617-Legierung. In herkömmlicher Weise gegossene und plasmaspritzgegossene Proben von IN 617 zeigten jedoch nahezu identische Eigenschaften beim Test bei 900 °C (1650 °F). Dieses nahezu identische Verhalten wird dem beim Test auftretenden Kornwachstum zugeschrieben. Wärmebehandlung bei 1250 °C (2280 °F) liess die Körner der plasmaspritzgegossenen IN 617-Legierung beträchtlich wachsen, und nach der Wärmebehandlung waren die Zugeigenschaften der plasmaspritzgegossenen IN 617-Legierung etwa die gleichen wie die der in herkömmlicher Weise geschmolzenen und gegossenen IN 617-Legierung sowohl beim Test bei Raumtemperatur als auch bei 900 °C (1650 °F).

Vor der Wärmebehandlung waren die plasmaspritzgegossenen Körper alle von etwa gleich hoher Dichte von etwa 97 bis nahezu 100% der theoretisch möglichen. Herkömmliche Spritzgusskörper haben charakteristischerweise Lücken, Poren oder Hohlräume zwischen einzelnen Spritzgussteilen entweder gleichförmig oder statistisch oder beides über

die Körper verteilt. Diese Lücken oder Hohlräume hindern, wenn vorhanden, eine völlige oder 100%ige Dichte der Körper.

Nach der Wärmebehandlung, z. B. der zweistündigen Wärmebehandlung bei 1150 °C (2100 °F) des Referenzbeispiels, waren die plasmaspritzgegossenen Körper um bis zu 1% oder darüber dichter, wobei die Mindestdichte über etwa 98% der theoretischen Dichte lag. Die Wärmebehandlung änderte den Sauerstoffgehalt dieser Testproben nicht, aber bei einem Wert von weniger als etwa 1000 TpM ist Sauerstoff kein wesentlicher Faktor bei den Festigkeitseigenschaften der erfindungsgemässen plasmaspritzgegossenen Erzeugnisse, wenngleich er die Duktilitätseigenschaften nachteilig beeinflussen kann.

Weiterhin sind, wie aus den mechanischen Eigenschaften der plasmaspritzgegossenen Körper hervorgeht, plasmaspritzgegossene Teile von Strömungsmaschinen in der Lage, lange sowohl als Rotor- als auch als Statorteile von Gasturbinen-Triebwerken zu dienen, insbesondere als Schaufeln, die gewöhnlich Mittellinien-Spannungen von etwa 172 MPa (25 ksi) bei 815 bis 982 °C (1500 bis 1800 °F), insbesondere in Flugzeugtriebwerken, unterliegen. Tatsächlich sind Superlegierungsschaufeln nach der Erfindung auf der Grundlage dieser Erfahrungen und der obigen Daten mit längerer Lebensdauer in Gasturbinen-Triebwerken als ihre nach herkömmlichen Lehren und Praktiken hergestellten Gegenstücke zu erwarten.

Aus den vorstehenden Ausführungen ist auch klar, dass die mechanische Deformation der plasmaspritzgegossenen Erzeugnisse gemäss der Erfindung bei der Herstellung von Teilen, wie Gasturbinen-Triebwerksteilen, nicht nötig ist; hohle Schaufeln, wie die der Fig. 2 und 3 z. B., sind mit Aus- und Innenwandabschnitten so dünn wie gewünscht giessbar, wobei die überlegenen Mikrostruktur- und physikalischen Eigenschaften, wie sie für die erfindungsgemässen Erzeugnisse typisch sind, wie oben angegeben sind. So ist die Erfindung speziell brauchbar bei der Anwendung auf verhältnismässig kleine Teile mit dünnen Abschnitten, aber auch mit erheblichem Vorteil auf grössere Teile mit schweren Abschnitten, da die Notwendigkeit mechanischer Deformation, wie das Schmieden von Gussstücken, entfällt.

In der vorliegenden Beschreibung ist die Korngrösse diejenige, die durch Transmissions-Elektronen-Mikroskopaufnahmen, wie die der Fig. 10 und 11, unter Anwendung der als Direktinterzeptverfahren bekannten Methode gemessen wird, wobei die Korngrösse dann als Korn-«Durchmesser» angegeben wird, wenngleich die Körner typischerweise das gleichachsige Aussehen der der Fig. 10 und 11 bei zur Abscheidungsebene paralleler Betrachtung haben.

FIG. 1

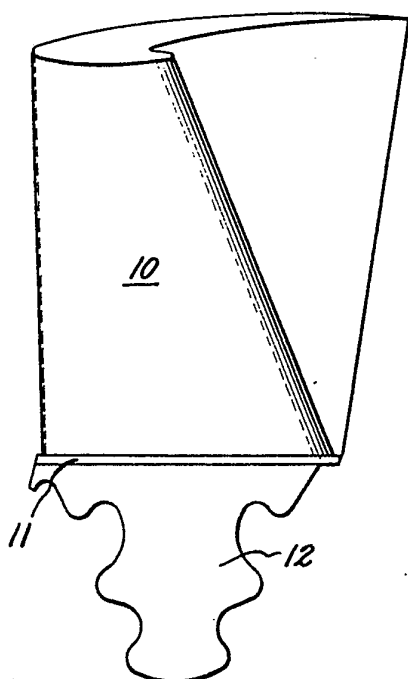


FIG. 2

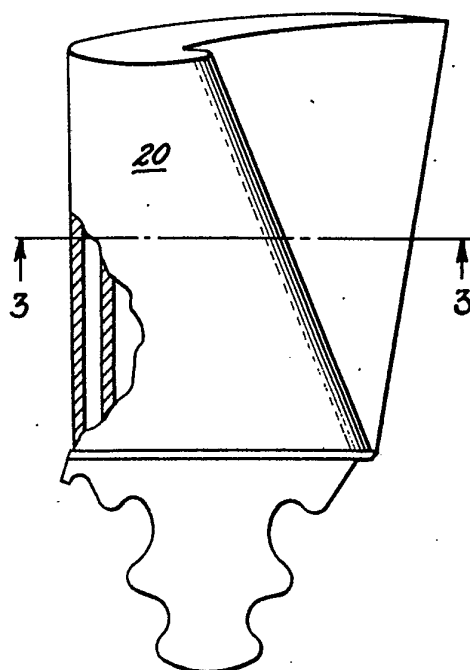
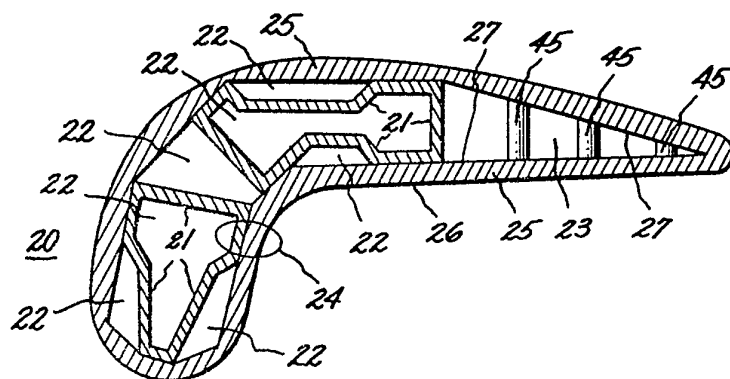


FIG. 3



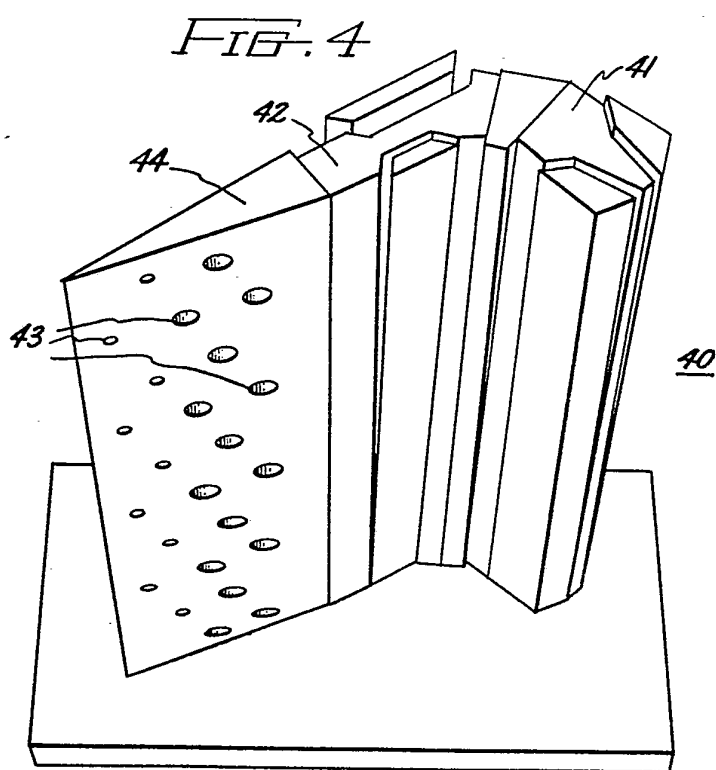


FIG. 5

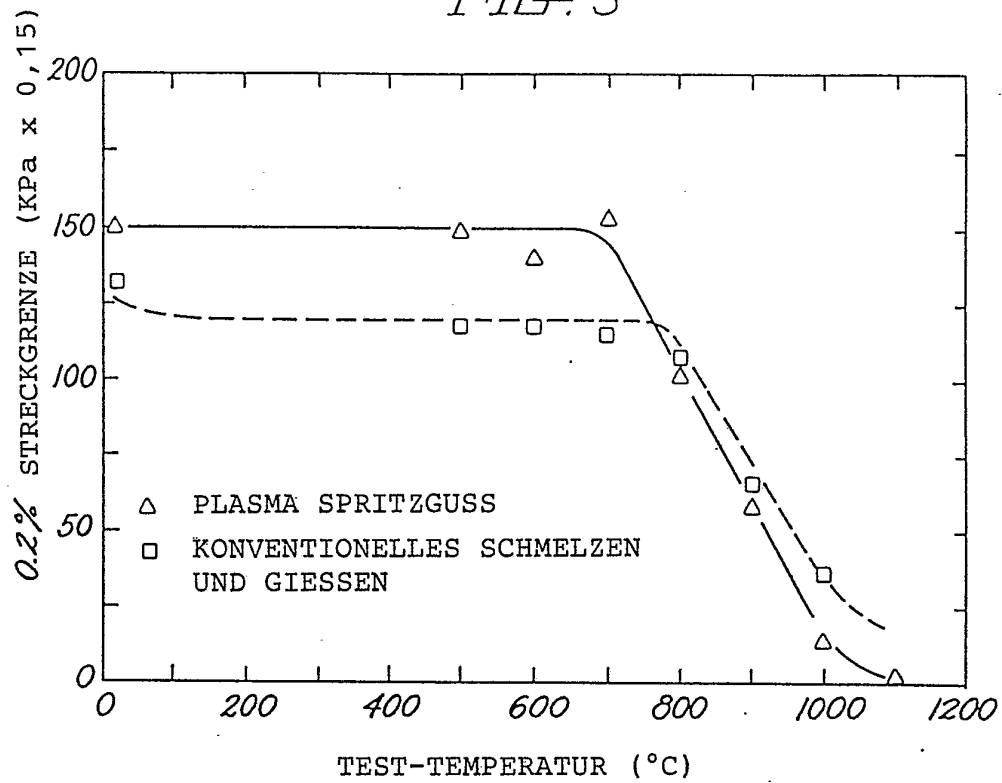


FIG. 6

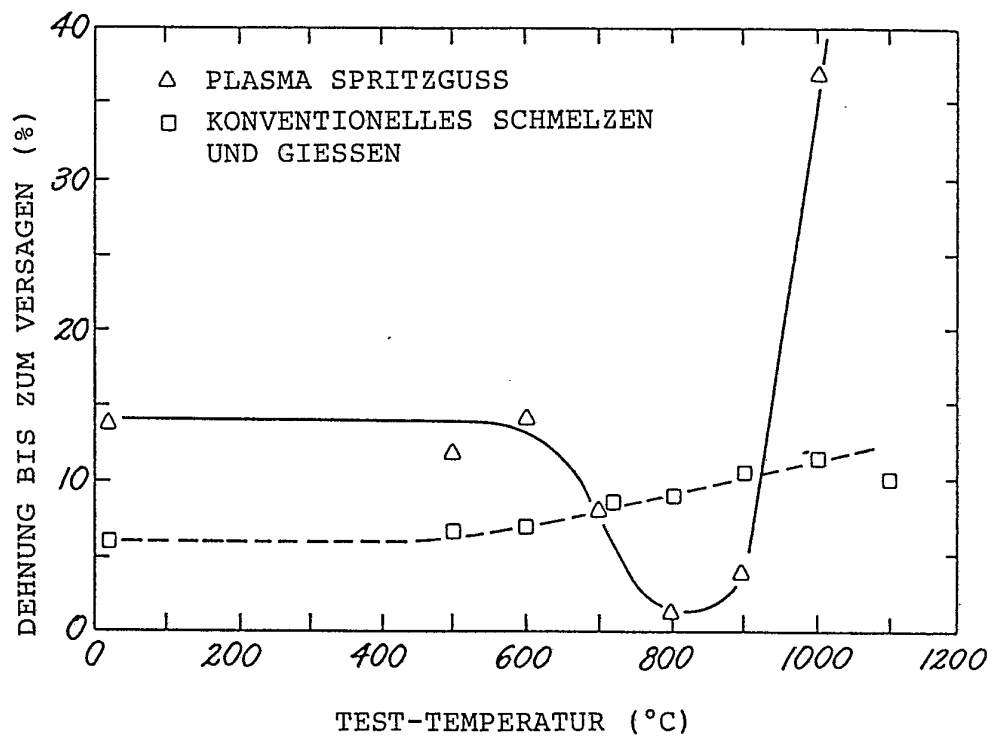


FIG. 7



FIG. 8

