



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 284 589 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
19.02.2003 Patentblatt 2003/08

(51) Int Cl.7: **H05H 1/30**

(21) Anmeldenummer: **02017831.5**

(22) Anmeldetag: **08.08.2002**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
IE IT LI LU MC NL PT SE SK TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: **16.08.2001 DE 10140298**

(71) Anmelder:
• **MTU Aero Engines GmbH**
80995 München (DE)
• **DaimlerChrysler AG**
70567 Stuttgart (DE)

(72) Erfinder:
• **Bayer, Erwin, Dr.**
85221 Dachau (DE)
• **Laure, Stefan**
70329 Stuttgart (DE)
• **Steinwandel, Jürgen, Dr.**
88690 Uhldingen-Mühlhofen (DE)

(74) Vertreter: **Zacharias, Frank L.**
DaimlerChrysler AG
Intellectual Property Management
HPC: C106
70546 Stuttgart (DE)

(54) **Verfahren zum Plasmaschweißen**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Plasmaschweißen mittels eines freien radiofrequenzinduzierten Plasmastrahls. Gemäß der Erfindung wird der rf-induzierte Plasmastrahl mittels folgender Verfahrensschritte erzeugt:

- Erzeugung eines stationären Hochdruck-Plasmas (2) durch Zündung eines ersten Prozessgases in einem Pilot-Plaslabrenner (1) und Einleiten des Plasmagases (2) in ein rf-transparentes Arbeitsrohr (3) umfassend eine Gaseintrittsöffnung (4) und eine Gasaustrittsöffnung (5), wobei das rf-transparente Rohr (3) von einer Koppelspule (13) umwickelt ist,
- Einleiten eines zweiten Prozessgases (6) in das rf-transparente Rohr (3) bei einem Druck $p \geq 1$ bar, wobei das zweite Prozessgas (6) durch die Gaseintrittsöffnung (4) derart in das rf-transparente Rohr (3) eingeleitet wird, dass es eine tangentielle Strömungskomponente aufweist,
- Erzeugung eines rf-Plasmas (7) im rf-transparenten Rohr (3) mittels elektrodenlosem Zünden des Gasgemischs (2, 6),
- Erzeugung eines Plasmastrahls (8) mittels Einleiten des Plasmas (7) in den Arbeitsraum (9) durch eine an der Gasaustrittsöffnung (5) des Rohrs (3) angeordnete metallische Expansionsdüse (10).

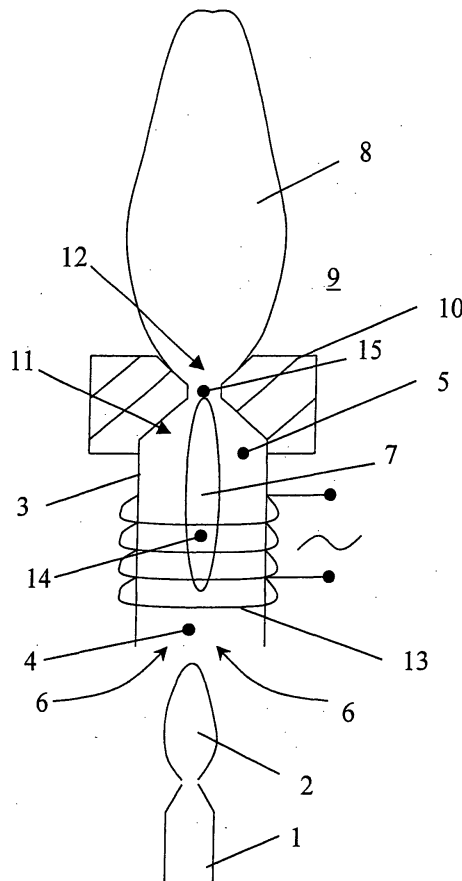


Fig.

EP 1 284 589 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Plasmaschweißen nach Patentanspruch 1.

[0002] In den letzten Jahren sind vielfältige Anstrengungen unternommen worden gerade um die Leistungsfähigkeit konventioneller Plasmaschweißverfahren, z.B. Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) oder Metallaktivgas-Schweißen (MAG) weiter zu steigern und weiterzuentwickeln.

[0003] Beim WIG-Schweißen brennt ein Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück, wobei das Werkstück aufgeschmolzen wird. Der Lichtbogen hat einen Divergenzwinkel von etwa 45°. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen WIG-Brenner und Werkstück die Leistungsdichte signifikant beeinflusst und diese insgesamt vergleichsweise gering ist. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Metalle fließt ein erheblicher Anteil der Wärme in die Umgebung der Schweißnaht ab. Bei einer durch die Lebensdauer der Elektrode begrenzten Stromstärke und damit auch begrenzten Lichtbogenleistung ergeben sich daraus relativ kleine Schweißgeschwindigkeiten.

[0004] Mittels wassergekühlter Expansionsdüsen kann der Plasmastrahl bei verschiedenen Plasmaschweißverfahren eingeschnürt werden, wodurch eine Verringerung der Lichtbogendivergenz auf ca. 10° (visuell) bewirkt werden kann. Damit wird bei den technisch üblichen Abständen zwischen Plasmabrenner und Werkstück eine höhere Leistungsdichte und daraus resultierend bei identischer Lichtbogenleistung eine höhere Schweißgeschwindigkeit erreicht. Durch den stabileren und gegenüber dem herkömmlichen WIG-Verfahren weniger divergenten Plasmastrahl ergibt sich darüber hinaus ein geringerer Einfluss der Schweißparameter auf die Lichtbogenform.

[0005] Führt man dem Lichtbogen bei geeigneter Elektrodenanordnung durch Erhöhung der Stromstärke deutlich mehr Energie zu, entsteht der sogenannte Stichlocheffekt. Bei entsprechender Dicke wird das Werkstück ösenförmig aufgeschmolzen und bei kontinuierlichem Vorschub des Plasmabrenners fließt das geschmolzene Metall um den Plasmastrahl herum und hinter ihm wieder zusammen.

[0006] Nachteilig wirkt sich bei den beschriebenen Verfahren aus, dass die mögliche Stromstärke durch die Lebensdauer der Elektroden begrenzt und damit die Schweißgeschwindigkeit limitiert ist. Dadurch kommt es zu einer hohen Wärmebelastung des Bauteils, breiten Wärmeeinflusszonen und darüber hinaus zu einem erheblichen Verzug des Werkstücks.

[0007] Die technischen Möglichkeiten, die Schweißgeschwindigkeit weiter zu steigern, sind im wesentlichen ausgeschöpft. Neben den daraus folgenden betriebswirtschaftlichen Konsequenzen wirkt sich das dahingehend aus, dass die gegenwärtig erreichten Grenzen für die Streckenenergie, den Verzug und die

Eigenschaftsverschlechterung durch die relativ breite Wärmeeinflusszone zukünftig nicht wesentlich unterschritten werden können. Das ist dahingehend besonders nachteilig, als das Eigenschaftspotential moderner, hochfester Werkstoffe, deren Eigenschaften erst durch spezifische Wärmebehandlungen erreicht werden, durch den gegenwärtigen Entwicklungsstand der konventionellen Schweißverfahren bei weitem nicht genutzt werden kann.

[0008] Ein weiterer Nachteil der konventionellen Plasmaschweißverfahren besteht in der eingeschränkten Zugänglichkeit und Beobachtungsmöglichkeit der Schweißstelle aufgrund eines relativ großen Düsendurchmessers bei kleinem Werkstückabstand (ca. 5 mm).

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es, ein neues Verfahren zum Plasmaschweißen anzugeben, bei dem die Nachteile des Standes der Technik vermieden werden.

[0010] Diese Aufgabe wird durch das Verfahren des Patentanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

[0011] Erfindungsgemäß wird zum Plasmaschweißen ein freier radiofrequenz- (rf-) induzierter Plasmastrahl verwendet, der im Rahmen eines Hybrid-Brennerprozesses wie folgt erzeugt wird:

- Erzeugen eines stationären Hochdruck-Plasmas, im weiteren als Pilot-Plasma bezeichnet, durch Zünden eines ersten Prozessgases mittels eines Pilot-Plasmabrenners,
- Einleiten des Pilot-Plasmas in ein rf-transparentes Arbeitsrohr, umfassend eine Gaseintritts- und eine Gasaustrittsöffnung, wobei das Arbeitsrohr von einer Koppelspule umwickelt ist,
- Einleiten eines zweiten Prozeßgases in das rf-transparente Rohr bei einem Druck von $p \geq 1$ bar, wobei das zweite Prozeßgas derart in das Rohr eingeleitet wird, dass es in dem Rohr eine tangential Strömungskomponente aufweist,
- Erzeugung eines rf-Plasmas im rf-transparenten Rohr mittels elektrodenlosem Zünden des Gasgemischs, umfassend das Pilot-Plasma und das zweite Prozeßgas,
- Erzeugung eines Plasmastrahls mittels Einleiten des rf-Plasmas in einen Arbeitsraum durch eine an der Gasaustrittsöffnung des Rohrs angeordnete metallische Expansionsdüse.

[0012] Die Zündung des Gasgemischs erfolgt dabei insbesondere durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung im Radiofrequenzbereich. Es ist aber auch möglich, dass das Gasgemisch durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung aus dem Mikrowellenbereich gezündet werden kann. Die Einkopplung der Radiofrequenzenergie in das Gasgemisch erfolgt induktiv mittels der um das rf-transparente Rohr gewickelten Koppelspule. Die Koppelspule kann dabei derart konfiguriert sein, dass eine optimale Einkopplung der elek-

tromagnetischen Energie in das Gasgemisch möglich ist.

[0013] Das Pilot-Plasma kann vorteilhaft in einer Hochstrombogenentladung oder in einer elektrodenlosen Mikrowellenentladung erzeugt werden.

[0014] Mittels des Pilot-Plasmas gelangt ein bereits ionisiertes Gas in das rf-transparente Rohr. Dort wird das ionisierte Gas mit dem zweiten Prozeßgas gemischt. Durch Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung, welche durch die Koppelspule in das Rohr eingekoppelt wird, mit dem ionisierten Gas, wird die Zündschwelle zur Zündung des Gasgemischs aus dem Pilot-Plasmagas und dem zweiten Prozeßgas reduziert. Es wird somit ein energiereiches Plasma erzeugt, in das nahezu die gesamte Radiofrequenzenergie einkoppelbar ist.

[0015] Das rf-transparente Rohr ist vorteilhaft ein Rohr mit dielektrischen Eigenschaften. Insbesondere wird als rf-transparentes Rohr ein Rohr aus SiO_2 oder Al_2O_3 in jeweils reiner Form ohne Dotierung verwendet.

[0016] Mittels des erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahrens ergeben sich besonders vorteilhafte Plasmaeigenschaften. So wird die spezifische Enthalpie des rf-Plasmas und die damit verbundene Enthalpieflussdichte des rf-Plasmas erhöht. Damit verbunden wird die Plasmatemperatur des rf-Plasmas und des Plasmastrahls erhöht. Daraus ergeben sich gegenüber den Plasmaschweißverfahren des Stands der Technik Vorteile hinsichtlich einer gesteigerten Schweißgeschwindigkeit und niedrigeren Schweißnahtkosten. Mit dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren wird somit ein Schweißverfahren angegeben, das erhebliche betriebswirtschaftliche und anwendungsbezogene Vorteile bei gleichzeitig großer Einsatzbreite des Schweißverfahrens bietet.

[0017] Außerdem werden die Eigenschaften des Plasmastrahls hinsichtlich eines verringerten Durchmessers sowie einer verringerten Strahlwinkeldivergenz verbessert. Darüber hinaus breitet sich der zylindersymmetrische Plasmastrahl in dem erfindungsgemäßen Verfahren parallel aus, wodurch der Einfluss der Abstandsänderung zwischen Brenner und Werkstück auf die Einbrandform des Plasmastrahls in das Werkstück verringert wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass dadurch die Zugänglichkeit zum Plasmastrahl - hervorgerufen durch einen größer möglichen Abstand zwischen Brenner und Werkstück - verbessert wird. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren sind somit Abstände zwischen Brenner und Werkstück von 30 mm bis zu 100 mm möglich, bei einem Plasmastrahldurchmesser von 1 mm bis zu 3 mm auf dem Werkstück. Mit dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren können so Leistungsdichten oberhalb von $1,5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ erzeugt werden.

[0018] Die tangentielle Einspeisung des zweiten Prozessgases unterstützt die erfindungsgemäße Erzeugung eines Plasmastrahls mit geringer Strahlwinkeldivergenz. Aufgrund der, durch die tangentielle Einspei-

sung des zweiten Prozessgases verursachte Radialbeschleunigung, die durch die Querschnittsverengung der Expansionsdüse in Richtung des Düsenaustritts weiter verstärkt wird, bewegen sich die ungleichförmig beschleunigten freien Ladungsträger in Richtung des Expansionsdüsenaustritts auf immer engeren Spiralbahnen, wodurch die Zentripetalbeschleunigung der Ladungsträger zunimmt. Diese Bewegung wird von den Ladungsträgern auch nach Austritt aus der Expansionsdüse in den Arbeitsraum beibehalten. Da aufgrund der unterschiedlichen Ionen- und Elektronenbeweglichkeit lokal keine Ladungsneutralität vorliegt, wird im Plasmastrahl ein axial orientiertes Magnetfeld induziert, welches zu einer Strömungseinschnürung des Plasmastrahls nach Austritt aus der Düse führt.

[0019] Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, dass der erfindungsgemäße Plasmastrahl mittels kostengünstiger und robuster Radiofrequenzsysteme z.B. Schwingkreissysteme mit einer Frequenz von ca. 300 kHz bis in den typischen UHF-Bereich (ca. 1 - 150 MHz) erzeugt werden kann.

[0020] In dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren ist außerdem die Energieeffizienz gegenüber konventionellen Plasmaschweißverfahren gesteigert. So ist es möglich, radiofrequenzinduzierte Plasmen zu erzeugen, bei denen die Leistungseinkopplung größer als 90% ist. Somit ergeben sich gegenüber Schweißverfahren mit Hochleistungsdioden eine um das 1,5-fache und gegenüber Laserschweißverfahren eine um das 20-fache gesteigerte Energieeffizienz.

[0021] Es ist möglich, durch geeignete Wahl prozessstauglicher Gase oder Gasgemischungen die spezifische Enthalpie des Plasmas in Verbindung mit einer verbesserten Wärmeleitung zwischen Plasma und Werkstück zu vergrößern. Außerdem ist es mit dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren möglich, ein breiteres Spektrum an Prozeßgasen einzusetzen, als es bei den bekannten Plasmaschweißverfahren möglich ist.

[0022] In einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung ist es möglich, dass dem zweiten Prozessgas vor Eintritt in die induktive Koppelstrecke, also vor Eintritt in das rf-transparente Arbeitsrohr, Pulver zugeführt wird. Dadurch ist es z.B. möglich, das erfindungsgemäße Verfahren als Pulverauftragsschweißverfahren einzusetzen. Es ist selbstverständlich auch möglich, dem Plasmastrahl nach Austritt aus der Expansionsdüse das Pulver zuzuführen.

[0023] Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahrens ist, dass die Wärmeeinflusszone des Plasmastrahls auf dem Werkstück wesentlich reduziert wird, was einen geringeren Wärmeeintrag, einen reduzierten Werkstückverzug und eine Verringerung der Werkstoffschädigung zur Folge hat. Außerdem wird mittels des erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahrens ein fehlerarmes Schweißen hinsichtlich geringerer Randkerben und geringer Porosität der Schweißnaht ermöglicht.

[0024] In einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung wird das zweite Prozessgas derart in die induktive Koppelzone eingebracht, z.B. mittels einer oder mehrerer Düsen, dass das in das Rohr einströmende zweite Prozessgas eine tangentiale und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung des Rohrs gerichtete axiale Strömungskomponente aufweist.

[0025] In einer weiteren vorteilhaften Ausführung der Erfindung weist die metallische Expansionsdüse, in Strömungsrichtung des Plasmas gesehen, plasmaseitig einen konvergenten Einlauf und plasmastrahlseitig einen freien oder divergenten Auslauf auf. Dadurch wird die Strömungsgeschwindigkeit der Ladungsträger des Plasmas vom konvergenten Einlauf bis hin zum divergenten Auslauf gesteigert.

[0026] Darüber hinaus ist es möglich, die Eigenschaften des Plasmastrahls hinsichtlich einer Verringerung der Strahlwinkeldivergenz zu verbessern. Außerdem kann mittels des Öffnungsquerschnitts der Expansionsdüse der Strahldurchmesser limitiert werden. Aufgrund der hohen Plasmatemperaturen kann die metallische Expansionsdüse in einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung gekühlt werden.

[0027] Es ist außerdem möglich, bei geeigneten Druckverhältnissen zwischen dem Druck im Arbeitsraum und dem Druck im Innern des rf-transparenten Rohrs, bei geeigneter Größe der Austrittsöffnung der Expansionsdüse sowie bei einer geeigneten Ausgestaltung des Einlaufbereichs und des Auslaufbereichs der Expansionsdüse einen frei expandierenden Plasmastrahl zu erhalten, der mit Überschall in den Arbeitsraum strömt.

[0028] Die Erfindung wird im folgenden anhand einer Zeichnung näher erläutert.

[0029] Die einzige Figur zeigt eine mögliche Ausführung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0030] Einem Pilot-Plasmabrenner 1 wird ein erstes Prozessgas (nicht dargestellt), z.B. Stickstoff, zugeführt. In diesem Pilot-Plasmabrenner 1 wird ein Pilot-Plasma 2 erzeugt, welches in ein rf-transparentes Arbeitsrohr 3 geleitet wird. Das Arbeitsrohr 3 weist eine Gaseintrittsöffnung 4 und eine Gasaustrittsöffnung 5 auf. Durch die Gaseintrittsöffnung 4 wird zusätzlich zu dem Pilot-Plasma 2 ein zweites Prozessgas 6 in das Arbeitsrohr 3 eingeleitet. Die Zufuhr des zweiten Prozessgases 6 erfolgt dabei derart, dass das zweite Prozessgas 6 eine tangentiale und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung 5 gerichtete axiale Strömungskomponente (nicht dargestellt) aufweist.

[0031] Das Arbeitsrohr 3 ist mit einer Koppelspule 13 umwickelt, welcher mittels eines nicht dargestellten Radiofrequenzsystems Energie zugeführt wird. Durch Absorption von Radioenergie wird in dem Bereich 14, in dem das Arbeitsrohr 3 von der Koppelspule 13 umwickelt ist, ein rf-Plasma 7 gezündet.

[0032] An der Gasaustrittsöffnung 5 des Arbeitsrohrs 3 ist eine metallische Expansionsdüse 10 befestigt. Die

Expansionsdüse 10 weist an ihrer Unterseite, also an der dem rf-Plasma 7 zugewandten Seite einen konvergenten Einlauf 11 auf. Durch diese Verengung werden die Ladungsträger im Plasma 7 bis hin zur Austrittsöffnung 15 immer weiter beschleunigt. Das rf-Plasma 7 tritt dann als Plasmastrahl 8 durch die Austrittsöffnung 15 der Expansionsdüse 10 in den Arbeitsraum 9 ein. Der Auslauf 12 der Expansionsdüse 10 ist in der vorliegenden Darstellung als divergenter Auslauf dargestellt. Es ist aber auch jede andere beliebige Auslauform, z.B. ein freier Auslauf möglich.

Patentansprüche

- Verfahren zum Plasmaschweißen mittels eines freien radiofrequenzinduzierten Plasmastrahls, der mittels folgender Verfahrensschritte erzeugt wird
 - Erzeugung eines stationären Hochdruck-Plasmas (2) durch Zündung eines ersten Prozessgases in einem Pilot-Plasmabrenner (1) und Einleiten des Plasmagases in ein rf-transparentes Arbeitsrohr (3) umfassend eine Gaseintrittsöffnung (4) und eine Gasaustrittsöffnung (5), wobei das rf-transparente Rohr (3) von einer Koppelspule (13) umwickelt ist,
 - Einleiten eines zweiten Prozessgases (6) in das rf-transparente Rohr (3) bei einem Druck $p \geq 1$ bar, wobei das zweite Prozessgas (6) durch die Gaseintrittsöffnung (4) derart in das rf-transparente Rohr (3) eingeleitet wird, dass es eine tangentiale Strömungskomponente aufweist,
 - Erzeugung eines rf-Plasmas (7) im rf-transparenten Rohr (3) mittels elektrodenlosem Zünden des Gasgemischs (2, 6),
 - Erzeugung eines Plasmastrahls (8) mittels Einleiten des rf-Plasmas (7) in den Arbeitsraum (9) durch eine an der Gasaustrittsöffnung (5) des Rohrs (3) angeordnete metallische Expansionsdüse (10).
- Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zweite Prozessgas (6) derart in das rf-transparente Rohr (3) eingeleitet wird, dass das in das Rohr (3) einströmende zweite Prozessgas (6) eine tangentiale und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung (5) gerichtete axiale Strömungskomponente aufweist.
- Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die metallische Expansionsdüse (10), in Strömungsrichtung des rf-Plasmas (7) gesehen, plasmaseitig einen konvergenten Einlauf (11) und plasmastrahlseitig einen freien oder divergenten Auslauf (12) aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die metallische Expansionsdüse (10) gekühlt wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur rf-Plasmaerzeugung infolge induktiver Kopplung Radiowellen im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 150 MHz eingesetzt werden.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als rf-transparentes Rohr (3) ein Rohr mit dielektrischen Eigenschaften aus SiO_2 oder Al_2O_3 in reiner Form ohne Dotierungen eingesetzt wird.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** dem zweiten Prozessgas (6) vor Eintritt in das rf-transparente Rohr (3) Pulver zugeführt wird.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das stationäre Hochdruck-Plasma (2) mittels einer Bogenentladung oder mittels elektrodenlosen Mikrowellenentladungen erzeugt wird.

30

35

40

45

50

55

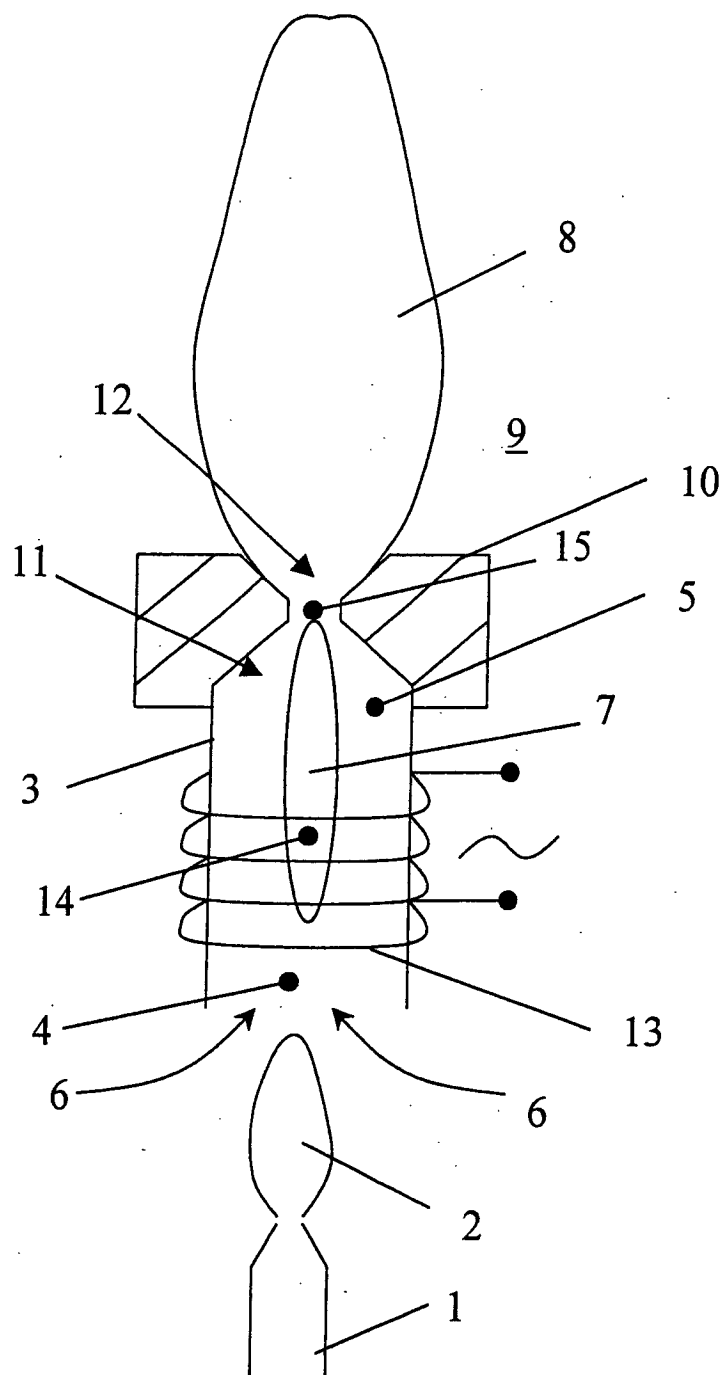


Fig.