

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 697 503 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
21.02.1996 Patentblatt 1996/08

(51) Int. Cl.⁶: F01D 5/28, C23C 8/06

(21) Anmeldenummer: 94112802.7

(22) Anmeldetag: 17.08.1994

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH DE DK ES FR GB GR IE IT LI LU MC NL
PT SE

(71) Anmelder: ABB Management AG
CH-5401 Baden (CH)

(72) Erfinder: Gerdes, Claus, Dr.
CH-5406 Baden-Rüti (CH)

(54) Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel aus einer (alpha-Beta)-Titan-Basislegierung

(57) Das Verfahren dient der Herstellung einer vorzugsweise in der Niederdruckstufe einer Dampfturbine eingesetzten erosionsbeständigen Turbinenschaufel aus einer vanadinhaltigen (α/β)-Titan-Basislegierung. Hierbei wird durch Umschmelzlegieren eines im Bereich der Schaufelspitze befindlichen und die Schaufeleintrittskante umfassenden Schaufelabschnitts in einer bor-, kohlenstoff- und/oder stickstoffhaltigen Gasatmosphäre mit Hilfe einer Hochleistungs-Energiequelle eine erosionsbeständige Schutzschicht aus einem Titanbo-

rid-, -carbid und/oder -nitrid gebildet. Der umschmelzlegierte Schaufelabschnitt wird unter Bildung einer vanadinreichen β -Titan-Phase bei einer Temperatur zwischen 600 und 750°C wärmebehandelt. Durch die Wärmebehandlung und die damit verbundene Gefügeänderung wird die Ermüdungsfestigkeit der Turbinenschaufel im Bereich der Schutzschicht nahezu unter Beibehalt der Erosionsbeständigkeit der unbehandelten Schutzschicht erheblich verbessert.

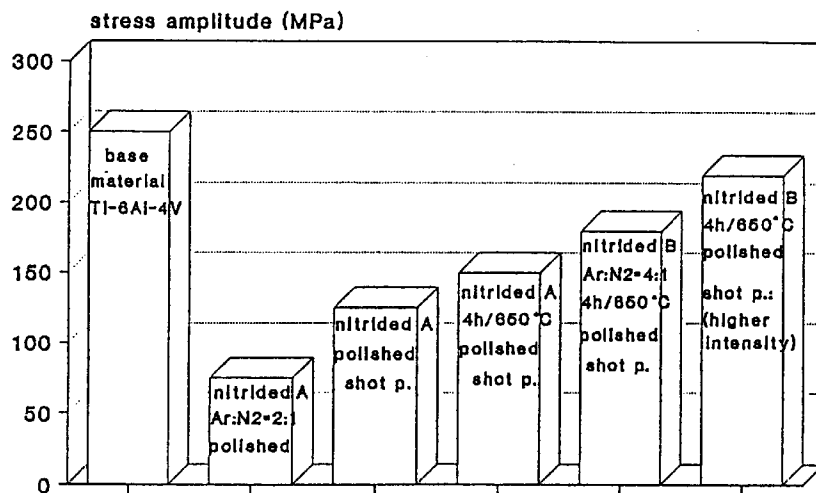


FIG.2

EP 0 697 503 A1

Beschreibung

Technisches Gebiet

Bei der Erfindung wird ausgegangen von einem Verfahren zur Herstellung einer erosionsbeständigen Turbinenschaufel aus einer (α/β)-Titan-Basislegierung nach dem einleitenden Teil von Patentanspruch 1. Eine nach einem solchen Verfahren hergestellte Schaufel wird bevorzugt in Niederdruckstufen von Dampfturbinen verwendet, da sie wegen ihrer geringen Dichte selbst bei grossen Baulängen den gestellten Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit bei Temperaturen bis ca. 150°C entspricht. In diesem Temperaturbereich enthält der in die Turbine eintretende Wasserdampf Tropfen, welche mit grosser Geschwindigkeit auf die dem eintretenden Dampf ausgesetzten Flächen der Turbinenschaufel auftreffen, wie insbesondere die Schaufeleintrittskante und die an die Schaufeleintrittskante saugseitig anschliessenden Teile der Schaufeloberfläche. Hierbei können die Tropfen Erosionsschäden hervorrufen. Besonders beansprucht wird dabei der im Bereich der Schaufelspitze befindliche Schaufelabschnitt, da dort die Umfangsgeschwindigkeit der Schaufel am grössten ist.

Stand der Technik

Ein Verfahren der eingangs genannten Art ist in EP-A-0 491 075 beschrieben. Dieses Verfahren dient der Herstellung einer Schutzschicht hoher Erosionsbeständigkeit auf einer Turbinenschaufel aus einer (α/β)-Titan-Basislegierung im Bereich der Schaufelspitze. Die Schutzschicht wird hierbei durch Umschmelzlegieren der (α/β)-Titan-Basislegierung an der Oberfläche in einer bor-, kohlenstoff- oder stickstoffhaltigen Gasatmosphäre mittels eines Lasers erzeugt. Eine solche Schicht weist gegenüber den unbehandelten Bereichen der Schaufel eine grosse Härte auf und schützt die darunter liegende Titan-Basislegierung wirksam gegen Tropfen-erosion. Es hat sich aber gezeigt, dass ein derart erosionsgeschützter Schaufelwerkstoff eine geringere Ermüdungsfestigkeit aufweist als der ungeschützte Schaufelwerkstoff.

Darstellung der Erfindung

Der Erfindung, wie sie in Patentanspruch 1 definiert ist, liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, mit dem in preisgünstiger und in einer für eine Serienfertigung geeigneten Weise eine erosionsbeständige Turbinenschaufel hergestellt werden kann, welche sich auch unter ständig wechselnder Beanspruchung durch eine grosse Lebensdauer auszeichnet.

Mit dem erfindungsgemässen Verfahren wird in wenigen leicht auszuführenden Verfahrensschritten, nämlich einer Oberflächenbehandlung der ungeschützten (α/β)-Titan-Basislegierung durch Umschmelzlegie-

ren mittels einer Hochleistungs-Energiequelle sowie durch daran anschliessendes Wärmebehandeln, eine Turbinenschaufel geschaffen, welche sich im Bereich ihrer Schaufelspitze sowohl durch eine hohe Erosionsbeständigkeit als auch durch eine gute Ermüdungsfestigkeit auszeichnet.

Während der Vorteil der Erosionsfestigkeit im wesentlichen durch das Umschmelzlegieren in einer geeigneten Gasatmosphäre hervorgerufen wird, wird die Bildung unerwünschter Risse in der Schutzschicht beim Vorhandensein von äusseren Spannungen und damit eine vorzeitige Werkstoffermüdung durch eine Wärmebehandlung bei Temperaturen zwischen 600 und 750°C vermieden. Bei diesen vergleichsweise geringen Temperaturen treten ganz erhebliche Gefügeänderungen in der umschmelzlegierten Schutzschicht aber nicht im daran anschliessenden Bereich der unbeeinflussten (α/β)-Titan-Basislegierung auf.

Die Ermüdungsfestigkeit besonders günstig beeinflussende Gefügeänderungen treten auf, wenn die Wärmebehandlung bei Temperaturen zwischen 650 und 700°C ausgeführt wird. Wird die Wärmebehandlung über mindestens eine Stunde, vorzugsweise zwischen 2 bis 6 Stunden, ausgeführt, so tritt aufgrund von Diffusionsvorgängen eine Homogenisierung zwischen den α stabilisierten Phasen ein. Zugleich tritt eine Rekristallisation in der umschmelzlegierten Schutzschicht und in der wärmebeeinflussten Zone der daran anschliessenden (α/β)-Titan-Basislegierung auf, wobei sich Korngrössen mit einem Durchmesser zwischen 20 und 100 μm ausbilden. Von besonderer Bedeutung ist jedoch das Auftreten gleichmässig verteilter, vanadinreicher β -Ausscheidungen. Die niedrige Löslichkeit von Vanadin in α -Titan dürfte dies besonders fördern.

Die Ermüdungsfestigkeit kann zusätzlich durch mechanische Verfestigung, insbesondere durch kontrolliertes Kugelstrahlen, des wärmebehandelten Schaufelabschnitts verbessert werden.

Eine weitere Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit kann erreicht werden, wenn das Umschmelzlegieren in einer Gasatmosphäre ausgeführt wird, die neben einem bor-, kohlenstoff- und/oder stickstoffhaltigen Gas ein inertes Trägergas enthält, wobei das Verhältnis der Partialdrücke von Trägergas zu bor-, kohlenstoff- und/oder stickstoffhaltigem Gas mindestens 2:1 beträgt. Zu bevorzugen ist hierbei eine Gasatmosphäre, in der das Verhältnis grösser 2:1 und höchstens 4:1 ist, und in der als Gase Edelgas, wie insbesondere Argon, und Stickstoff verwendet werden.

Kurze Beschreibung der Zeichnung

Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Hierbei zeigen die beiden Figuren 1 und 2 jeweils ein Diagramm, in dem die Erosionsbeständigkeit bzw. die Ermüdungsfestigkeit von Schaufelabschnitten, die nach dem Stand der Technik hergestellt wurden, verglichen wird mit der Erosionsbeständigkeit bzw. der Ermüdungsfestigkeit von Schaufelabschnitten,

die nach dem erfindungsgemässen Verfahren hergestellt wurden.

Weg zur Ausführung der Erfindung

Wie im Stand der Technik gemäss EP-A-0 491 075 beschrieben, wird die unbeschichtete Turbinenschaufel auf einem horizontal verschiebbaren Auflagetisch gelagert. Die Schaufelspitze wird im Bereich der Schaufel-eintrittskante einer sauerstofffreien bor-, carbid- und/oder stickstoffhaltigen Gasatmosphäre ausgesetzt und zugleich mit einer Hochleistungs-Energiequelle, insbesondere mit einem Laser, bestrahlt.

In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel bestand die Turbinenschaufel aus einer Titan-Basislegierung mit 6 Gewichtsprozent Aluminium und 4 Gewichtsprozent Vanadin (Ti-6Al-4V) und wurde ein CO₂-Gaslaser mit einer Leistung von 1,5 kW und mit einem Energiespektrum gemäss einer Gauss-Verteilung eingesetzt. Die bevorzugte Breite der Laserstrahlen betrug 1,3 mm. Die auf der Schaufeloberfläche beim Umschmelzlegieren gebildeten Schmelzspuren überlappten sich zu ca. 50% und wiesen eine Schmelztiefe von ca. 0,5 mm auf. Die Gasatmosphäre enthielt Stickstoff und Argon und wurde im Form eines Gasstroms an den Aufstrahlpunkt des Lasers an der Schaufeloberfläche geführt. Hierbei wurde ein strahlförmiger Stickstoffstrom von einem Argonstrom umhüllt. Es konnten so Sauerstoff und andere unerwünschte Substanzen vom Aufstrahlpunkt und damit vom Umschmelzlegierprozess ferngehalten werden. Die Stickstoffaufnahme beim Umschmelzlegieren war abhängig vom Partialdruck des Stickstoffs im Gasstrom. Das Verhältnis der Partialdrücke von Argon zu Stickstoff wurde zwischen 2:1 und 4:1 variiert.

Beim Bestrahlen wurde der Laser gegenüber der Turbinenschaufel auf mäanderförmigen Bahnen bewegt. Hierbei wurde der im Aufstrahlpunkt gelegene Teil der Oberfläche der (α/β)-Titan-Basislegierung aufgeschmolzen und wurde in die Schmelze Stickstoff eingelegt, welcher mit dem Titan der aufgeschmolzenen Basislegierung hartes Titannitrid bildete. Bei geeigneter Zusammensetzung des zugeführten Gases könnten entsprechend auch Titanborid und/oder Titancarbid gebildet werden.

Aus Röntgenbeugungsdiagrammen, Mikrohärtemessungen, raster- und durchstrahlungs-elektronenmikroskopischen Untersuchungen sowie aus Mikrosondenauswertungen wurde festgestellt, dass die hierbei gebildete und typischerweise eine Dicke zwischen 0,4 und 1 mm aufweisende Schutzschicht im wesentlichen Titannitride enthält, welche in eine Matrix aus α -Titan eingebettet sind. Morphologie und Verteilung der Titannitride hängen von den Verfahrensparametern beim Umschmelzlegieren und von der Stickstoffkonzentration in der Gasatmosphäre ab. Je nach Stickstoffkonzentration in der Gasatmosphäre können die Titannitride plattenförmig oder dendritisch ausgebildet sein. Die gebildete Schutzschicht kann je nach den Bedingungen beim Umschmelzlegieren eine Vik-

kershärte von 600 bis 800 HV aufweisen gegenüber einer Vickershärte von 350 bis 370 HV der (α/β)-Titan-Basislegierung.

An einem solchermassen hergestellten Schaufelwerkstoff wurden nach dem Polieren der Schutzschicht die Erosionsbeständigkeit und die Ermüdungsfestigkeit gemessen.

Die Messung der Erosionsbeständigkeit wurde in einer Testmaschine durchgeführt, welche im wesentlichen einen rotierenden Doppelarm enthielt, an dessen freien Ende rechteckig ausgebildete Proben des zu untersuchenden Schaufelwerkstoffs angebracht waren. Der Doppelarm war in einer Kammer angeordnet, welche auf ca. 25 mbar evakuiert wurde, um so Luftreibung zu vermeiden und hohe Geschwindigkeiten erreichen zu können. Am Umfang der Kammer war ein Tropfengenerator angebracht, welcher drei Strahlen mit jeweils gleich grossen Wassertropfen erzeugte. Die Wassertropfen prallten senkrecht auf die Oberfläche der Proben auf. Die Intensität jedes Aufpralls wurde durch die Grösse der Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Arms am Ort des Aufpralls festgelegt. Die von Generator erzeugten Tropfen wiesen typischerweise einen Durchmesser von ca. 0,2 mm auf. Die Umfangsgeschwindigkeit des Arms am Ort der zu untersuchenden Probe war konstant und variierte von Probe zu Probe zwischen 300 und 500 m/s. Als Mass für die Erosionsbeständigkeit wurde der Volumenverlust [mm³] der untersuchten Probe in Abhängigkeit von der Zahl der aufprallenden Tropfen bei einer vorgegebenen Umfangsgeschwindigkeit bestimmt (Fig.1).

Zur Messung der Ermüdungsfestigkeit wurde die Probe in einer servohydraulischen Prüfmaschine unter Vierpunkt-Biege-Bedingungen mit einer Frequenz von 30 Hz und bei einem Spannungsverhältnis R ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) von 0,2 über 10⁷ Zyklen einer Biegewechselbelastung unterworfen. Die hierbei ermittelte maximale Spannungsamplitude $\sigma_{\max}$ [MPa], die die Probe ohne zu brechen aufnehmen konnte, wurde als Mass für die Ermüdungsfestigkeit verwendet (Fig.2).

Aus Fig.1 ist ersichtlich, dass die (α/β)-Titan-Basislegierung im Vergleich zu der durch Umschmelzlegieren mit einem Verhältnis der Partialdrücke Argon zu Stickstoff wie 2:1 erzeugten Schutzschicht eine sehr geringe Erosionsbeständigkeit aufweist. Die unbehandelte (α/β)-Titan-Basislegierung ist wesentlich duktiler und wird durch die aufprallenden Wassertropfen plastisch deformiert. Es bilden sich daher bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt Erosionskrater, welche sich später überlagern und schliesslich zu Rissen führen oder das Ablösen plattenförmiger Bereiche bewirken. Im Unterschied dazu weist die durch Umschmelzlegieren gebildete Schutzschicht eine grosse Härte auf und verhindert so weitgehend die unerwünschte Kraterbildung. Die grosse Härte und dementsprechend die geringe Duktilität der Schutzschicht bedingt jedoch eine Abnahme der Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht im Vergleich zur (α/β)-Titan-Basislegierung um ca. 70% (Fig.2).

Um die Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht zu verbessern, wurde der beschichtete Schaufelabschnitt

über 4 h bei Temperaturen zwischen 650 und 700°C wärmebehandelt. Neben einer Homogenisierung und Rekristallisation des Gefüges der Schutzschicht bzw. der wärmebeeinflussten Zone wurden hierbei vor allem vanadinreiche und gleichförmig verteilte β -Ausscheidungen in der aufgelegten Schutzschicht gebildet. Wie aus den Figuren 1 und 2 zu ersehen ist, bewirken diese Gefügeänderungen eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht um ca. 10 bis 15 % (Probe A in Fig.2) unter Beibehalt der Erosionsbeständigkeit der nicht wärmebehandelten Schutzschicht.

Eine weitere Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit praktisch unter Beibehalt der Erosionsbeständigkeit der nicht wärmebehandelten Schutzschicht wurde zusätzlich durch mechanisches Verfestigen der wärmebehandelten Schutzschicht mit kontrolliertem Kugelstrahlen erreicht. Typische Werte des hierbei verwendeten Kugelstrahlens waren ein Kugeldurchmesser von 0,3 und Pressluftdrücke zur Beschleunigung der Kugeln von 3 bis 5 bar. Mit Almen-Intensitäten von 0,2 mm A konnte so die Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht gegenüber der nicht wärmebehandelten und nicht kugelbestrahlten Schutzschicht verdoppelt werden.

Eine weitere Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht unter Beibehalt der guten Erosionsbeständigkeit der nicht wärmebehandelten Schutzschicht wurde auch dadurch erreicht, dass in der Gasatmosphäre das Verhältnis der Partialdrücke von Argon zu Stickstoff grösser 2:1 ist und bei 4:1 liegt. Wie aus Fig. 2 am Beispiel B zu ersehen ist, konnte durch diese Massnahme die Ermüdungsfestigkeit gegenüber der ebenfalls wärmebehandelten Schutzschicht gemäss dem Beispiel A um ca. 20% gesteigert werden. (Figuren 1 und 2).

Von besonderem Vorteil für eine hohe Ermüdungsfestigkeit des Gefüges ist eine Ausführung des Kugelstrahlen mit mindestens zweifacher vollständiger Deckung. Ferner ist es äusserst günstig, die Intensität beim kontrollierten Kugelstrahlen grösser 0,2 und kleiner 0,45 mm A zu wählen. Durch Kugelstrahlen mit einer Almen-Intensität von ca. 0,3 mm A konnte die Ermüdungsfestigkeit der Schutzschicht gemäss dem Beispiel B gegenüber der entsprechenden Schutzschicht, welche jedoch nur mit Kugelstrahlen der Almen-Intensität 0,2 mm A verfestigt wurde, um ca. 15-20% verbessert werden, wodurch eine Schutzschicht erreicht wurde, welche praktisch die gleiche Erosionsbeständigkeit aufweist wie die unbehandelte Schutzschicht und welche zugleich ca. 85 % der Ermüdungsfestigkeit der Titan-Basislegierung erreicht (Fig.2).

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer erosionsbeständigen Turbinenschaufel aus einer vanadinhaltigen (α/β)-Titan-Basislegierung durch Umschmelzlegieren eines im Bereich der Schaufelspitze befindlichen und die Schaufeleintrittskante umfassenden

Schaufelabschnitts in einer bor-, kohlenstoff-, und/oder stickstoffhaltigen Gasatmosphäre mit Hilfe einer Hochleistungs-Energiequelle unter Bildung einer Schutzschicht aus einem gegenüber der Titan-Basislegierung erosionsbeständigeren Werkstoff auf der Basis eines Titanborids, -carbids und/oder -nitrids, dadurch gekennzeichnet, dass der umschmelzlegierte Schaufelabschnitt unter Bildung einer vanadinreichen β -Titan-Phase bei einer Temperatur zwischen 600 und 750°C wärmebehandelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmebehandlung zwischen 650 und 700°C ausgeführt wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmebehandlung während mindestens 1 h ausgeführt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmebehandlung zwischen 2 und 6 h ausgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der wärmebehandelte Schaufelabschnitt mechanisch verfestigt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Schaufelabschnitt kontrolliert kugelgestrahlt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Kugelstrahlen mit mindestens zweifacher vollständiger Deckung ausgeführt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Kugelstrahlen mit einer Almen-Intensität grösser 0,2 und kleiner 0,45 mm A ausgeführt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Gasatmosphäre neben dem bor-, kohlenstoff- und/oder stickstoffhaltigen Gas ein Trägergas aufweist, wobei das Verhältnis der Partialdrücke von Trägergas zu bor-, kohlenstoff- und/oder stickstoffhaltigem Gas mindestens 2:1 beträgt.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Gasatmosphäre Stickstoff und Edelgas, insbesondere Argon, enthält, wobei das Verhältnis der Partialdrücke von Edelgas zu Stickstoff grösser 2:1 und kleiner 4:1 ist.

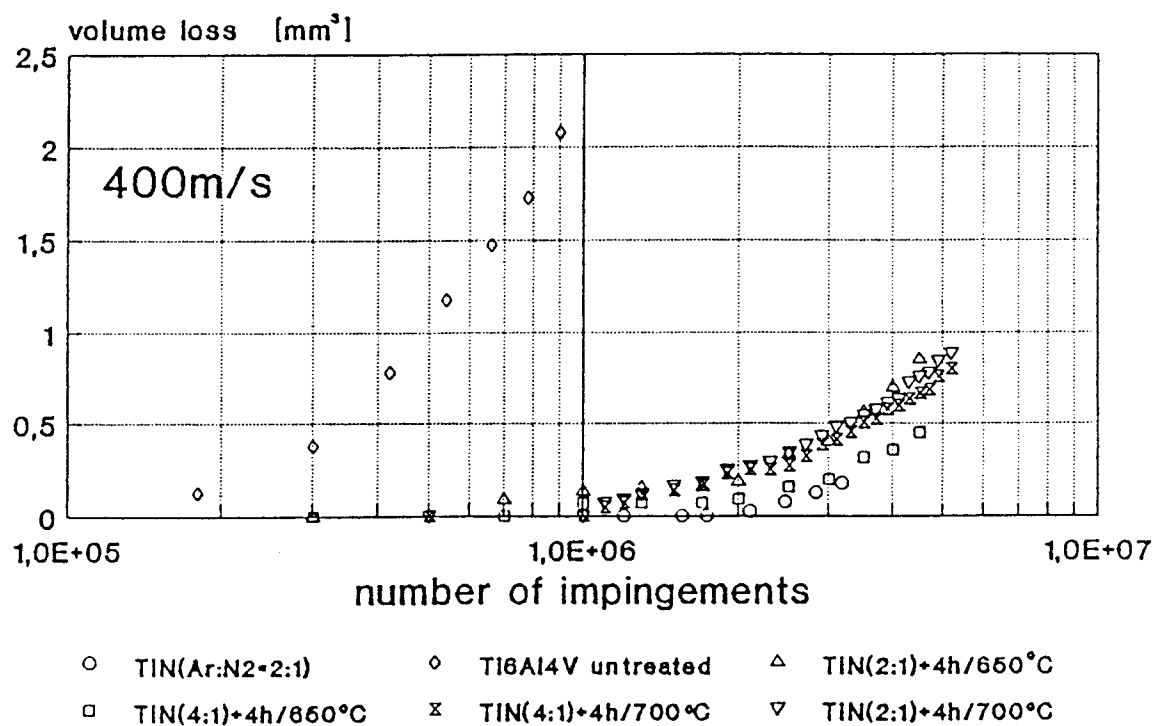


FIG.1

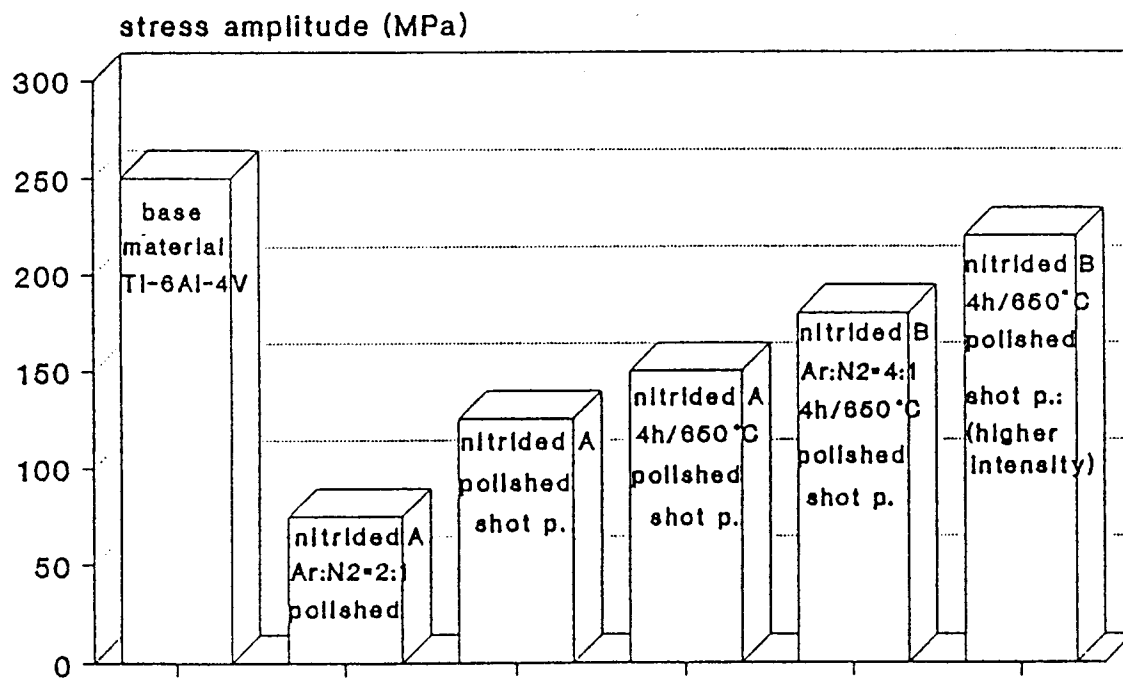


FIG.2



Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 94 11 2802

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG
D,A	EP-A-0 491 075 (A.B.B.) * das ganze Dokument * ---	1,5,9,10	F01D5/28 C23C8/06
A	WO-A-94 14955 (U.T.C.) * Seite 5, Zeile 1 - Seite 6, Zeile 12 * * Zusammenfassung * ---	1-5	
A	EP-A-0 247 582 (ALSTHOM) * Spalte 2, Zeile 15 - Spalte 3, Zeile 18 * * ---	1,2,5	
A	DATABASE WPI Section Ch, Week 9248, Derwent Publications Ltd., London, GB; Class M29, AN 92-392369 & JP-A-4 289 154 (FUJI ELECTRIC) 14. Oktober 1992 * Zusammenfassung * -----	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.CL.6)
			F01D C23C
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abchlußdatum der Recherche 17. Januar 1995	Prüfer McGinley, C
KATEGORIE DER GENANNTE DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mchtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument ----- & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 01.92 (P04C03)