



Republik
Österreich
Patentamt

(11) Nummer: **AT 404 160 B**

(12)

PATENTCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1183/94

(51) Int.Cl.⁶ : **F01D 5/18**

(22) Anmeldetag: 15. 6.1994

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 4.1997

(45) Ausgabetag: 25. 9.1998

(56) Entgegenhaltungen:

EP 326508A1 GB 1381481A US 4384452A US 4705455A
US 4726735A US 4859147A

(73) Patentinhaber:

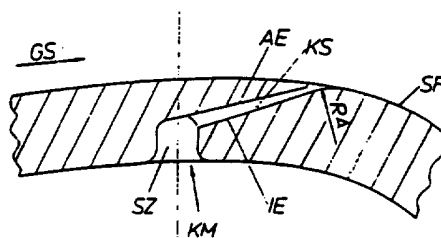
INSTITUT FÜR THERMISCHE TURBOMASCHINEN UND
MASCHINENDYNAMIK TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ
A-8010 GRAZ, STEIERMARK (AT).

(72) Erfinder:

JERICH A HERBERT DR.
WIEN (AT).
WOISETSCHLÄGER JAKOB DR.
GRAZ, STEIERMARK (AT).
SANZ WOLFGANG DR.
GRAZ, STEIERMARK (AT).

(54) HOHLE GASTURBINENSCHAUFEL UND VERFAHREN ZUR AUSSEN-FILM-KÜHLUNG DERSELBEN

(57) Außenfilmkühlung von hohlen Gasturbinenschaufeln mit Hilfe von unterexpandierten, aus Schlitzen mit Schallgeschwindigkeit austretenden, großflächigen Kühlfilmen, die durch ein genügend hohes Druckverhältnis 2 bis 3 des Kühlmittels in der Anspeisung bezogen auf den Druck der Gas-hauptströmung an der Austrittsstelle erzeugt werden. Eine sichere und hohe Kühlwirkung wird erreicht durch die Benutzung der Eigenschaft eines derartigen Strahles, der unterexpandiert aus einem Kühlschlitz austritt, sich durch die weitere Expansion auch an die eventuell stark gekrümmte Profiloberfläche (Profilnase) anlegt und dadurch großflächige Kühlfilme bildet, die durch die Turbulenzen der Hauptströmung nur wenig beeinflusst werden.



AT 404 160 B

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Außenfilmkühlung von hohlen Gasturbinenschaufeln mit Hilfe von unterexpandierten, aus Schlitzen mit Schallgeschwindigkeit austretenden, großflächigen Kühlfilmen nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, sowie die Ausbildung einer Gasturbinenschaufel zur Anwendung dieses Kühlverfahrens nach dem Patentanspruch 2.

5 Moderne Gasturbinen arbeiten mit Eintrittstemperaturen im Bereich von 1300 Grad Celsius für Industrie- und Kraftwerksanlagen, für Flugzeugtriebwerke sind diese Temperaturen bereits bis auf 1500 Grad Celsius angestiegen. Dies war nur möglich infolge der Entwicklung der modernen Werkstoffe und der Kühlungsverfahren. Auch modernste Werkstoffe erlauben nur Metalltemperaturen im Bereich von 800 bis 900 Grad Celsius, sodaß ein Bereich von mehreren Hundert Grad Celsius durch die Schaufelkühlung als Temperatur-

10 differenz zwischen der Gastemperatur und der Metalltemperatur hergestellt werden muß. Besonders erfolgreich waren dabei die sogenannten Filmkühlungsverfahren, bei denen durch eine Reihe von Bohrungen aus dem Inneren der hohlen Schaufel Kühlluft in den Gasstrom eingespeist wird. Offenbar darf diese Kühlluft aus den Bohrungen nur mit Geschwindigkeiten ausgeblasen werden, die um wenigstens größer als die Gasgeschwindigkeit sind, da sich sonst der einzelne Kühlluftstrahl nicht an die

15 Oberfläche der Schaufel anlegt und die beabsichtigte Kühlwirkung hervorruft. Außerdem sind bisher nur eine Reihe von relativ dünnen Bohrungen im Bereich von einem halben bis einem Millimeter Durchmesser ausgeführt worden, sodaß der aus diesen Bohrungen austretende Kühlluftstrahl seitlich vom Gasstrom umschlossen wird und es ein schwieriges Strömungsproblem ist, diese Geschwindigkeiten und den Austrittswinkel des Kühlluftstrahls aus der Oberfläche so zu wählen, daß die gewünschte Entstehung eines

20 Kühlfilms bewirkt wird. Besonders schwierig ist dies an der Eintrittskante eines Turbinenprofils und ebenso in der Nähe des engsten Querschnittes auf der Saugseite, da im ersten Fall zwar eine laminare aber sehr dünne Grenzschicht in dieser Zone herrscht und im letzteren Fall eine hochturbulente Grenzschicht eine rasche Durchmischung des Kühlluftstrahls mit der Hauptströmung hervorruft.

Bei einer der vorliegenden Erfindung am nächsten kommenden Ausbildung nach der EP 0 326 508 A1

25 wird durch Schlitze ein Kühlfilm an die Oberfläche der Schaufel geleitet, wobei aber die Menge an Kühlmittel, die in den Schlitz eingeleitet wird, durch eine Zumeßbohrung beschränkt ist, sodaß im Austritt des Schlitzes an die Profiloberfläche nur Unterschallgeschwindigkeit bestehen kann, in ähnlicher Größe wie die Geschwindigkeit der Grenzschicht an der Oberfläche der Schaufel. Damit wird die Absicht dieser konstruktiven Lösung deutlich, eben den Kühlfilm in die untere Zone der Grenzschicht direkt an die

30 Oberfläche der Schaufel mit geringer Geschwindigkeit einzuleiten. Wie die Fig.2 dieses Patentess zeigt, sind derartige Kühlschlitze zu beiden Seiten der gerundeten Profilnase in Strömungsrichtung der Hauptströmung ausblasend vorgesehen, sodaß auch hier die oben erwähnte geringe Geschwindigkeit des austretenden Films ersichtlich wird. Dieses Patent bringt daher einen Fortschritt gegenüber den Lösungen, die direkt aus

35 Strahl besteht. Aber die zitierte Patentschrift zeigt keine Lösung auf, um in wirksamer Weise die gerundete Profilnase selbst zu kühlen, in der, zufolge der Nähe des Staupunktes und der laminaren Grenzschichten geringer Dicke, die sich von beiden Seiten desselben aus entwickeln, ein besonders hoher Wärmeübergang besteht.

Es ist bekannt, daß unterexpandierte Strahlen, die mit Schallgeschwindigkeit in einen Raum tieferen

40 Druckes austreten, bei der nachfolgenden Expansion sich an eine gekrümmte Oberfläche anlegen, auch wenn diese stark von der geraden Richtung des Strahles abweicht. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, diesen Effekt zur Kühlung von Schaufelprofilen von Gasturbinen nutzbar zu machen. Diese Aufgabe wird mit den kennzeichnenden Merkmalen der Patentansprüche 1 und 2 gelöst und zwar in der Weise, daß in der Oberfläche Schlitze eingearbeitet sind, die vom Inneren der hohlen Schale, die die Gasturbinenschaufel

45 bildet, her mit Kühlmittel angeströmt werden, wobei dieses Kühlmittel eine stetige Beschleunigung erfährt bis zum engsten Querschnitt des Schlitzes unmittelbar an der Oberfläche, in dem dann die Schallgeschwindigkeit herrscht, wenn das Kühlmittel mit genügender Druckerhöhung zugeführt wird, also mit einem Druckverhältnis von zwei bis drei bezogen auf das Verhältnis des Speisedruckes zum statischen Drucke der Gashauptrömung an der Oberfläche.

50 Es tritt dabei im engsten Querschnitt, eben im Schlitz, Schallgeschwindigkeit auf. Der Zustrom zum engsten Querschnitt wird dabei zweckmäßigerweise durch zwei wenig gegeneinander geneigte Ebenen gestaltet, die eine Beschleunigung zum Schlitz herstellen, wobei andererseits die seitliche Berandung in einer mehr oder minder kreisförmigen oder ellipsenförmigen Kontur gestaltet ist.

Der Übergang des Schlitzes in die Profilloberfläche der Schaufel ist nun in erfindungsgemäßer Weise mit

55 einem Radius gestaltet, der tangential sowohl an die Innenwand des Zuströmschlitzes, als auch nach außen zu tangential in die Profilkontur der Schaufel übergeht, wodurch sich eine Beschleunigung auf Überschall des Filmes ergibt, der mit großer Oberfläche sowohl in Längsrichtung der Schaufel, als auch Richtung der expandierenden Strömung entlang des Profils an dieser Schaufeloberfläche anliegt, durch die Relativge-

schwindigkeit eine gute Kühlwirkung und eben eine gute Wärmeübergangszahl bewirkt. Zu Folge der Eigenschaften des unterexpandierten Strahles, mit dem erfindungsgemäßen hohen Druckverhältnis in die Hauptströmung eingespeist, übt er die gewünschte großflächige Kühlwirkung aus, ohne daß, wie bei einer einzelnen Bohrung, das Kühlmittel die Grenzschicht der Hauptströmung durchschlägt und somit ohne seine Kühlwirkung auszuüben im heißen Gasstrom verloren geht.

Die Erfindung wird nun anhand eines Ausführungsbeispiels erläutert, wobei die Zeichnungsfiguren das Folgende zeigen: Fig. 1a und b zeigen Auf- und Grundriß einer Gasturbinenschaufel wobei SP das Schaufelprofil, KK die Kühlkanäle, KS die erfindungsgemäßen Kühlschlitze und KSEK den Kühlschlitz an der Profilnase (Eintrittskante) angeordnet an der Druckseite des Profils, gegen die Hauptströmung gerichtet, darstellen. Die Befestigung der Schaufel in der Rotorscheibe erfolgt beispielsweise durch einen Tannenbaumfuß TF. Fig. 1c zeigt einen Schnitt durch die gegossenen Schaufel der Gasturbinenschaufel mit dem Gasstrom GS, dem Kühlmittelzustrom KM zum Speisezyylinder SZ, der mit dem Kühlschlitz KS, gebildet aus der äußeren Ebene AE und der inneren Ebene IE, in Verbindung ist, dessen innere Ebene IE mit dem Ausrundungsradius RA tangential in das Schaufelprofil SP an der Außenseite übergeht. Fig. 1d zeigt einen Blick senkrecht auf die Profiloberfläche in der die Öffnung des Schlitzes in entsprechender Projektion sichtbar ist und der Übergang des Ausrundungsradius RA in das Schaufelprofil SP mit einer dünnen Linie angedeutet ist. Die Seitenberandung SB ist in dieser Zone als Verschneidung sichtbar, und ist im Bereich, wo sie im Inneren der Schaufelschale verläuft, strichliert angedeutet, ebenso wie der, in diesem Blick verdeckte Speisezyylinder. Hier ist die Seitenberandung SB halbreisförmig oder elliptisch gestaltet, während Fig. 1e eine Lösung mit geraden Seitenbegrenzungen zeigt. In Fig. 2a,b wird die strömungsmäßige Funktion des erfindungsgemäßen Vorschlages demonstriert, die bereits durch Versuche in der gezeigten Weise als gültig nachgewiesen werden konnte. Dabei zeigt Fig. 2a die Ausströmung des Kühlmittels KM aus dem Kühlschlitz KS, wie sie an der Saug- oder Druckseite des Profils im wesentlichen in Richtung der Hauptströmung (Gasströmung GS), stattfindet, wobei im engsten Querschnitt die Schalllinie SL strichliert angedeutet ist, und die sich bildende Grenzlinie GL zwischen dem weiter expandierenden Kühlfilm und der Hauptströmung GS strichpunktiert eingetragen ist, wobei dünne Linien die Expansionsflächen und Stoßlinien andeuten, die die Abströmung des der Schaufelprofilkrümmung SP folgenden Kühlfilmes KF bestimmen. Auf diese Art kommt es zur Ausbildung eines großflächigen Überschallkühlfilmes KF. In Fig. 2b ist die spezielle Situation der Umströmung der Profilnase PN (im Turbinenbau auch als Eintrittskante bezeichnet) mit der erfindungsgemäßen Kühlung durch den Kühlschlitz KSEK (Kühlschlitz Eintrittskante) dargestellt, wobei KM wieder das Kühlmittel bedeutet. Die Gasströmung GS ist hier in der Umgebung des vorderen Staupunktes durch Stromlinien angedeutet, und der die gesamte Profilnase überströmende Kühlfilm wie oben mit KF bezeichnet.

Die strömungstechnische Funktion der Erfindung wird nun anhand dieser Zeichnungen beschrieben. So zeigt Fig. 1a den Grundriß einer Gasturbinenschaufel, Fig. 1b den Aufriß einer solchen Schaufel mit dem Tannenbaumfuß TF, sowie dem Schaufelprofil SP in dem die erwähnten Kühlschlitze KS in mehreren Reihen hintereinander, aber entsprechend versetzt angeordnet sind und in einfacher Weise durch die großflächige Ausbildung der angestrebten Kühlfilme die ganze Oberfläche der Schaufel zu bedecken gestatten. Es wird besonders auf den Kühlschlitz an der Profilnase KSEK hingewiesen, der eine Ausblasung gegen die einströmende Gasströmung bewirkt, aber durch die Eigenschaft des unterexpandierten Strahls ist dieser in der Lage, sich um die stark gekrümmte Eintrittskante herumzulegen und dort die besonders notwendige Kühlung zu bewirken.

Fig. 1c zeigt nun einen Schnitt durch die Schaufelschale in einer Schnittebene etwa senkrecht zur Radialen, entsprechend auch dem Schnitt der im Grundriß der Fig. 1a gezeigt ist. In Fig. 1c werden die erwähnten Details des Kühlmittelzustroms KM zum engsten Querschnitt gezeigt. Vom Speisezyylinder SZ folgt ein durch zwei Ebenen begrenzter Kühlkanal, der den eigentlichen Kühlschlitz KS darstellt, dieser mündet an seiner engsten Stelle an die Oberfläche, wobei die untere Kontur dieses Kühlschlitzes mit dem erwähnten Ausrundungsradius RA tangential in das Schaufelprofil SP übergeht.

Diese geometrische Anordnung des Kühlschlitzes wird in Fig. 1d im Grundriß dargestellt. Wir sehen von außen auf die Gasturbinenschaufel, daher verdeckt den Speisezyylinder und die Verschneidung der beiden Ebenen des Kühlschlitzes mit dem Speisezyylinder, sowie die Kontur ihrer seitlichen Begrenzung. Eine Alternative dieser Anordnung ist für eine andere Kontur in der Fig. 1e nochmals wiederholt.

Die Vorteile der erfindungsgemäßen Konstruktion sind die folgenden:

Die Druckverluste der Einspeisung sind deutlich verringert, da die größte Geschwindigkeit erst im Austrittsquerschnitt des Schlitzes auftritt. Es herrscht somit ein genau definierter gut berechenbarer Druck in diesem Austrittsquerschnitt und der Austrittsquerschnitt selbst kann durch das gewählte Fertigungsverfahren und durch allfällige plastische Verformung genau auf die gewünschte Form gebracht werden.

Das Kühlmittel tritt in einem breiten Fächer in den Hauptstrom ein, sodaß es von diesem umflossen werden kann. Der Hauptstrom zwingt daher das Kühlmittel sich an die Oberfläche anzulegen, entlang der vorgesehenen Rundung als Grenzschicht über die Oberfläche zu strömen und somit einen stark kühlend wirkenden Kühlfilm zu bilden.

5 Auch in festigkeitsmäßiger Hinsicht bestehen Vorteile. Bei einer gekühlten Schaufel treten die höchsten Spannungen in der kalten Zone am Innenrand der tragenden Schale der Schaufel auf. Bei den konventionellen Verfahren mit den zahlreichen Bohrungen kleiner Durchmesser treten hier sehr hohe Kerbwirkungen bei der Mündung der Bohrungen an der Innenseite der Schale auf. Bei der erfindungsgemäßen Konstruktion ist hier ein Zylinder mit großen Ausrundungsradien vorgegeben, wodurch die Kerbwirkungen deutlich verringert werden.

10 Das erfindungsgemäße Kühlverfahren kann sowohl bei Anlagen mit luftsaugenden Gasturbinen verwendet werden, als auch bei Anlagen die im sogenannten kombinierten Prozeß betrieben werden, also mit einer Gasturbine mit nachgeschalteter Dampfanlage arbeiten. In Folge der üblichen Druckverhältnisse im Gasturbinenprozeß, bzw. des üblichen Kesseldruckes in solchen nachgeschalteten Anlagen besteht hier eine günstige Möglichkeit, mit Dampf hohen Druckes aber geringer Temperatur eine Einspeisung in die Gasturbinenschaufeln zur Kühlung derselben vorzunehmen, sodaß keine besonderen Maßnahmen zur Herstellung des erfindungsgemäßen Druckverhältnisses von 2 bis 3 erforderlich sind. Andererseits kann aber bei luftsaugenden Gasturbinen sehr wohl auch Luft für die Kühlung verwendet werden, da für die erste Laufschaufel bereits ein genügend hohes Druckverhältnis besteht, wenn die Anspeisung vom Kompressor her erfolgt und lediglich für die erste Leitschaufel, wenn diese in erfindungsgemäßer Weise gekühlt wird, ein relativ kleiner Zusatzkompressor erforderlich ist. Damit kann das erfindungsgemäße Verfahren für luftsaugende Gasturbinen generell verwendet werden.

Die erfindungsgemäßen Vorteile hinsichtlich der durch die geometrische Anordnung und das hohe Druckverhältnis erzielbaren Strömungseigenschaften sind in Fig.2 dargestellt. So zeigt Fig.2a den in 25 erfindungsgemäßer Weise erfolgenden Zustrom des Kühlmittels KM durch den Kühlschlitzz KS im Schnitt senkrecht zur Schaufelachse, sowie die Begrenzungsebenen und den engsten Querschnitt, in dem die Schallgeschwindigkeit (Schalllinie SL) auftritt, sowie den Verlauf des unterexpandierten Strahles beim Anlegen an die Oberfläche (Kühlfilm KF) in Folge der dann weiter eintretenden Expansion auf Überschallgeschwindigkeit. Es ist in diesem Bild die Grenzlinie GL zwischen der freien Gasströmung und dem Kühlfilm eingezeichnet und es wird darauf hingewiesen, daß infolge der verschiedenen Temperatur des Kühlmittels und der Hauptströmung und infolge der hohen Geschwindigkeit des Kühlstrahls, die sich nur wenig von der Hauptströmung unterscheidet nur ein geringer turbulenter Austausch entlang dieser Grenzlinie stattfindet, sodaß über einen weiten Bereich der Kühlstrahl mit einer niedrigen Temperatur an der Oberfläche des Profils anliegt.

35 Fig.2b zeigt in einem Schnitt die besonders schwierige Situation an der Profilnase PN einer solchen Gasturbinenschaufel. An dieser tritt ein Staupunkt der ankommenden Gasströmung (GS) auf, was bedeutet, daß die Grenzschichtdicke an dieser Stelle gleich Null wird, und an beiden Seiten hin sich eine laminare, aber sehr dünne Grenzschicht ausbildet. Diese dünne Grenzschicht stellt nur eine geringe Wärmeisolation gegenüber der hohen Temperatur der Hauptströmung dar, sodaß im Normalfall hier der Spitzenwert des Wärmeüberganges und der Aufheizung der Schaufel stattfindet. Die hier im allgemeinen durch Brausen von 40 Kühlbohrungen erzeugen Kühlmittelströme geringer Geschwindigkeit werden hier besonders leicht weggeblasen, sodaß hier ein besonders schweres Problem der Gasturbinenkühlung zu lösen ist. Der erfindungsgemäße Vorschlag ist jedoch der, hier einen Kühlschlitzz anzuordnen, der auf der Druckseite des Profils liegend, einen Überschallkühlstrahl (Kühlfilm KF), zum Teil gegen die Hauptströmung gerichtet, ausschickt. 45 Dieser Kühlfilm legt sich, durch seine, durch die Unterexpansion verursachten Eigenschaften (Schallgeschwindigkeit im Schlitzquerschnitt), auch an die extreme Krümmung der Eintrittskante. Es tritt hier somit ein Überschallkühlstrahl auf, der die gesamte Profilnase (Eintrittskante) umfließt, der zudem durch Turbulenzen in der Hauptströmung nur wenig beeinflusbar ist.

50 Patentansprüche

1. Verfahren zur Außen-Film-Kühlung von hohlen Gasturbinenschaufeln aus hochtemperaturbeständigem Werkstoff, wobei Luft oder Dampf als Kühlmittel verwendet wird, das dem Schaufelinnenraum unter Druck zugeführt wird, anschließend durch die Schaufelwand durchsetzende Schlitze an die Schaufelaußenfläche strömt und diese unter Bildung eines Kühlfilms großflächig bedeckt, 55 **dadurch gekennzeichnet, daß** das Kühlmittel mit einem Druckverhältnis von 2 bis 3 dem Schaufelinnenraum zugeleitet wird, wobei das Druckverhältnis als der Druck in der Anspeisung des Kühlmittels, bezogen auf den statischen

Druck an der Oberfläche an der Stelle des Kühlmittelaustrittes definiert ist, und daß das Kühlmittel beim Zuströmen durch sich verengende Querschnitte zum Schlitz an der Oberfläche der Schaufel auf Schallgeschwindigkeit beschleunigt wird, wobei dieser Schlitz an der Außenfläche der Schaufel den engsten Querschnitt darstellt, in dem der sogenannte kritische Zustand herrscht, also die kritische Schallgeschwindigkeit auftritt (bezogen auf das oben erwähnte Druckverhältnis) und da der kritische Druck des Strahles somit höher liegt als der statische Druck der die Schaufel umgebenden Hauptströmung, die weitere Expansion des austretenden Strahles im Sinne des oben beschriebenen Effekts erfolgt, der ein Anliegen des nunmehr weiter expandierenden Strahles an die Oberfläche der Schaufel ermöglicht, sodaß eine intensive Kühlwirkung durch einen flächenhaft an der Oberfläche anliegenden schnellströmenden Kühlfilm ermöglicht wird.

2. Ausbildung einer Gasturbinenschaufel, bestehend aus einer hohlen, mit Kühlmittel gespeisten Schale, in deren Außenfläche (SP) - gegebenenfalls über die ganze Fläche verteilt - unter einem spitzen Winkel mit der Tangentialebene an der Schaufelaußenfläche angeordnete Schlitz (KS) einmünden, die ihrerseits über Speiseräume (SZ) mit dem Schaleninnenraum (KK) verbunden sind, zur Anwendung des Kühlverfahrens nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, daß

im Inneren der hohlen Gasturbinenschaufelschale ein relativ großer zylinder- oder halbkugelförmiger Speiseraum (SZ) vorgesehen ist, der sich mit einem Schlitz (KS) verschneidet, der durch zwei Ebenen (AE, IE) gebildet wird, die um wenige Grade gegeneinander geneigt sind und die in der Verschneidung mit der Außenfläche der Schaufel (SP) den oben erwähnten Austrittsschlitz bilden und daß die Seitenberandung (SB) dieses Schlitzes vom Speisezyylinder (SZ) ausgehend, halb kreis- oder halb ellipsenförmig übergehend in gerade Tangenten begrenzt ist und daß die im Sinne des austretenden Strahles innenliegende Ebene nach dem engsten Schlitzquerschnitt tangential in einen Krümmungskreis (RA) übergeht, der selbst wieder tangential in die Kontur der Außenfläche der Schaufel mündet und wobei eventuell die äußere Lippe des entstandenen Schlitzes, also die äußere Ebene durch entsprechende Biegung nach Innen zu eine besonders rasche Beschleunigung der Strömung unmittelbar vor dem Austrittsquerschnitt ermöglicht, und daß die beiden Ebenen, die den Schlitz bilden, miteinander einen Winkel von 0 bis 10 Grad einschließen und selbst wieder im Mittel einen Winkel von kleiner 90 Grad und größer 20 Grad zur Tangentialebene an der Schaufeloberfläche einschließen.

Hiezu 3 Blatt Zeichnungen

