



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 18 147 T2** 2008.12.04

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 361 340 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 18 147.3**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 252 813.5**

(96) Europäischer Anmeldetag: **06.05.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.11.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **19.12.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **04.12.2008**

(51) Int Cl.⁸: **F01D 5/30** (2006.01)
F01D 5/14 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

139534 06.05.2002 US

(73) Patentinhaber:

General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

Herman, William Charles, Blue Ash, Ohio 45242,

US; Norton, Brian Alan, Cincinnati, Ohio 45241,

US; Keith, Brian David, Cincinnati, Ohio 45224, US

(54) Bezeichnung: **Turbinenschaufel mit Schaufelfussskerbe**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf Gasturbinentriebwerke und insbesondere auf Turbinenlaufschaufeln in diesen.

[0002] In einem Gasturbinentriebwerk wird Luft in einem Verdichter komprimiert und mit einem Treibstoff vermischt, um heiße Verbrennungsgase zu erzeugen, die stromabwärts durch die Turbinenstufen strömen. Hoch- und Niederdruckturbinen enthalten entsprechende Reihen von Turbinenrotorschaukeln, die sich von stützenden Rotorscheibe radial nach außen erstrecken, wobei den heißen Verbrennungsgasen durch die Rotorscheufeln Energie zur Drehung der Scheibe entzogen wird, die wiederum verwendet wird, um in einer typischen Triebwerksanwendung den Verdichter und ein stromauf befindliches Gebläse anzutreiben.

[0003] Ein vorrangiges Konstruktionsziel bei Flugzeugtriebwerken ist es, ihre Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Minimierung ihres Gewichts zu maximieren. Dementsprechend sind die verschiedenen Komponenten eines Gasturbinentriebwerks konstruiert, um so viel Gewicht wie möglich zu entfernen, ohne die in ihnen auftretenden zulässigen Spannungen zu übertreffen.

[0004] Eine Gewichtsreduktion gestaltet sich insbesondere in Triebwerksrotorkomponenten schwierig, da sie im Betrieb rotieren und beträchtliche Zentrifugallasten aufnehmen müssen, die in ihnen entsprechende Spannungen hervorrufen. Zusätzlich zu den Zentrifugallasten werden infolge der verdichteten Luft oder der Verbrennungsgase, die sich durch den Verdichter und die Turbinen ausdehnen, die Rotorscheufeln aerodynamischen Belastungen oder Druckbelastungen ausgesetzt.

[0005] Da eine Turbinenrotorschaukel im Betrieb heißen Verbrennungsgasen ausgesetzt ist, wird sie gewöhnlich unter Verwendung von von dem Verdichter abgezapfter Luft gekühlt. Eine typische Turbinenschaufel enthält ein hohles Schaufelblatt, in dem verschiedene Kühlkreise vorgesehen sind, die mit einer aus dem Verdichter empfangenen Kühlluft gespeist werden, die in die Turbinenschaufel durch Einlassöffnungen einströmt, die sich radial durch tragende Schwalbenschwänze der Schaufeln erstrecken.

[0006] Der Schwalbenschwanz einer Turbinenschaufel enthält typischerweise zugehörige Paare oberer und unterer Schwalbenschwanzkeulen oder -schenkel in einer tannenbaumartigen Anordnung. Der Umfang der Rotorscheibe enthält eine Reihe axialer Schwalbenschwanzschlitze, die zwischen entsprechenden Scheibensäulen definiert sind, die komplementäre obere und untere Tragkeulen oder -schenkel aufweisen.

[0007] Die Scheibenschlitze werden typischerweise unter Verwendung eines konventionellen Räumprozesses hergestellt, bei dem eine Reihe von zunehmend größeren Schneidwerkzeugen axial durch den Rotorumfang geführt werden, bis die endgültige tannenbaumartige Gestaltung der Scheibenschlitze erzielt wird.

[0008] Die Scheibenschenkel sind deshalb zwischen der vorderen und hinteren Endfläche axial gerade. Und die zugehörigen Schwalbenschwanzschenkel sind ebenfalls in Axialrichtung gerade, um mit den komplementären Scheibenschenkeln übereinzustimmen.

[0009] Auf diese Weise stellen die beiden Schwalbenschwanzschenkelpaare vier axial gerade Druckflächen zur Verfügung, die mit den zugehörigen Druckflächen der Scheibenschenkel in Eingriff stehen, um im Betrieb zentrifugale und sonstige Belastungen von jeder Laufschaufel auf den Umfang der die Schaufeln stützenden Scheibe zu übertragen.

[0010] In anderen Konstruktionen können die Schwalbenschwanzschlitze durch den Scheibenrand bezüglich der Triebwerksmittellinie oder axialer Achse winklig oder schräg verlaufen, und die Schaufelschwalbenschwänze sind entsprechend winklig oder schräg angesetzt.

[0011] Da sich die Schwalbenschwanzschenkel in Umfangsrichtung in entgegengesetzte Richtung zueinander erstrecken, definieren sie entsprechende Halsstücke mit lokal minimalen Bereichen direkt über jedem der unteren und oberen Schenkelpaare. Diese Schwalbenschwanzhalsstücke müssen eine ausreichend große Fläche aufweisen, um über diese die Zentrifugalbelastung zur Minimierung der maximalen oder Spitzenspannung in dem Schwalbenschwanz zu verteilen. Im Betrieb muss die Spitzenspannung in dem Schwalbenschwanz begrenzt werden um eine ausreichende Nutzungsdauer der Schaufel im Betrieb sicherzustellen. Entsprechend weisen die Schwalbenschwänze eine minimale Größe auf, die durch eine maximal zulässige Spitzenspannung in diesen bedingt ist.

[0012] Um die Festigkeit des radial innersten oder unteren Schwalbenschwanzschenkelpaares zu steigern, kann sein Fußende einen rechteckigen Fußblock aus zusätzlichem Material aufweisen, der sich entlang der gesamten axialen Länge des Schwalbenschwanzes zwischen seiner vorderen und hinteren Endfläche erstreckt und sich über die seitliche oder in Umfangsrichtung gerichtete Weite des Schwalbenschwanzes zwischen den Basisenden der zugehörigen gegenüberliegenden Schenkel erstreckt. Der Fußblock verbindet gewöhnlich die unteren Schenkel an den zugehörigen Kehlen, die zur Reduktion von an ihnen auftretenden Spannungskonzentrationen

einen geeigneten Radius aufweisen.

[0013] Der sich ergebende Schaufelschwalbenschwanz weist angesichts der zur Übertragung aller betrieblichen Belastungen von der Schaufel auf die Rotorscheibe erforderlichen tannenbaumartigen Gestaltung einen relativ komplexen Aufbau auf.

[0014] Eine Verminderung der Masse oder des Gewichts von einzelnen Schaufelschwalbenschwänzen ist derzeit durch die maximal zulässige Spitzenspannung in diesen begrenzt. Da ein typisches Gasturbinentriebwerk eine beträchtliche Anzahl von Turbinenschaufeln in jeder Stufenreihe enthält, wäre es wünschenswert, das Gewicht des Triebwerks durch eine entsprechende Reduktion des Gewichts der Schwalbenschwänze weiter zu verringern, wenn vorausgesetzt ist, dass die zulässige Schwalbenschwanzspitzenspannung nicht überschritten wird.

[0015] GB 537 121 beschreibt den Aufbau und die Art der Montage von Impulsschaufeln von Turbinen für elastische Fluide.

[0016] US 2,755,062 beschreibt Schaufelverriegelungseinrichtungen für Turbinenrotoranordnungen.

[0017] US 4,500,258 beschreibt eine gekühlte Turbinenschaufel für ein Gasturbinentriebwerk.

[0018] US 4,936,749 beschreibt einen Schaufel/Schaufel-Schwingungsdämpfer.

[0019] Demgemäß ist es erwünscht, einen verbesserten Schwalbenschwanz zu schaffen, der eine weitere Gewichtsreduktion aufweist, ohne dass eine maximal zulässige Spitzenspannung in diesem überschritten wird.

[0020] Gemäß der vorliegenden Erfindung ist eine Turbinenlaufschaufel geschaffen, die ein Schaufelblatt und einen Schwalbenschwanz gemäß dem beigefügten Anspruch 1 enthält. Der Schwalbenschwanz enthält ein Paar Tragschenkel. Ein rechteckiger Fußblock überbrückt die Schenkel über einen Großteil seines Fußendes. Der Block endet kurz vor einer Endfläche des Schwalbenschwanzes, um an dieser eine Fußkerbe zur vorteilhaften Gewichtsreduktion auszubilden.

[0021] Die Erfindung gemäß bevorzugten und beispielhaften Ausführungsformen ist zusammen mit weiteren Aufgaben und ihren Vorteilen in der folgenden detaillierten Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen genauer beschrieben:

[0022] [Fig. 1](#) zeigt eine teilweise im Querschnitt dargestellte isometrische Ansicht eines Paares benachbarter Turbinenrotorscheaufeln, die durch axiale Schwalbenschwänze am Umfang einer stützenden

Rotorscheibe befestigt sind.

[0023] [Fig. 2](#) zeigt eine vergrößerte Ansicht des Schwalbenschwanzteils der in [Fig. 1](#) dargestellten Schaufel, die an der Scheibe durch den axialen Schwalbenschwanz befestigt ist, der zur bevorzugten Reduktion seines Gewichts eine darin vorgesehene Fußkerbe aufweist.

[0024] [Fig. 3](#) zeigt eine vergrößerte isometrische Ansicht des in [Fig. 2](#) gezeigten Schaufelschwalbenschwanzes, in dem eine bevorzugte Ausführungsform einer Fußkerbe vorgesehen ist.

[0025] [Fig. 4](#) zeigt eine vergrößerte Endansicht eines Bereichs des Schaufelschwalbenschwanzes und der Fußkerbe, wie sie in [Fig. 3](#) veranschaulicht sind.

[0026] [Fig. 5](#) zeigt eine Draufsicht einer der in [Fig. 1](#) gezeigten Laufschaufeln unter Veranschaulichung der Ausrichtung eines Schaufelblatts, das über dem darunter liegenden Schwalbenschwanz angeordnet ist.

[0027] In [Fig. 1](#) sind beispielhafte Turbinenlaufschaufeln **10** eines Turbofan-Gasturbinenflugzeugtriebwerks dargestellt. Das Triebwerk enthält einen konventionellen Verdichter (nicht gezeigt) zur Verdichtung von Luft **12**, die mit einem Treibstoff in einer Brennkammer (nicht gezeigt) vermischt und gezündet wird, um heiße Verbrennungsgase **14** zu erzeugen, die stromab durch Hoch- und Niederdruckturbinen strömen, die ihnen Energie entziehen.

[0028] Die in [Fig. 1](#) gezeigten beispielhaften Turbinenrotorscheaufeln **10** sind in der zweiten Stufe einer zweistufigen Hochdruckturbinen zu finden, die den Gasen zum Antreiben des Verdichters Energie entzieht. Eine Niederdruckturbinen (nicht gezeigt) entzieht den Gasen weitere Energie, um einen Bläser (nicht gezeigt) anzutreiben, der in einer typischen Turbofan-Flugzeugtriebwerksanwendung stromauf von dem Verdichter montiert ist.

[0029] Jede Turbinenschaufel **10** enthält ein vorzugsweise hohles Schaufelblatt **16**, das mit einem Schwalbenschwanz **18** zur axialen Einführung an einer Plattform **20** integral verbunden ist, die die radial innere Begrenzung für die Verbrennungsgase definiert.

[0030] Wie in [Fig. 2](#) zusätzlich gezeigt, enthält jedes Schaufelblatt eine Vorderkante **22**, die die Verbrennungsgase zuerst empfängt, und eine axial gegenüber liegende Hinterkante **24**, mit einer sich dazwischen erstreckenden, im Wesentlichen konkaven Druckseite und einer gegenüberliegenden konvexen Saugseite, die zur Entnahme von Energie aus den Verbrennungsgasen geschaffen sind.

[0031] Wie in [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) gezeigt, enthält die bevorzugte Ausführungsform des Schaufelschwalbenschwanzes **18** ein oberes Paar von in Seitenrichtung oder in Umfangsrichtung gegenüberliegenden Ausbuchtungen oder Schenkeln **26** und ein unteres Schenkelpaar **26**, die in Form einer typischen tannenbaumartigen Konfiguration zur Stützung einer einzelnen Schaufel in einem entsprechenden Schwalbenschwanzschlitz **28** gestaltet sind, der, wie in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) veranschaulicht, am Umfang der stützenden Rotorscheibe **30** ausgebildet ist. Jeder Schwalbenschwanzschlitz **28** ist am Umfang zwischen sich radial nach außen erstreckenden Scheibensäulen definiert, die sich axial erstreckende Keulen oder Schenkel **32** aufweisen, die die doppelten Schwalbenschwanzschenkel zur Schaffung von vier Druckkontaktflächen zwischen ihnen ergänzen, durch die zentrifugale und sonstige Belastungen von den Schaufeln auf die stützende Rotorscheibe übertragen werden.

[0032] Wie am besten in [Fig. 3](#) veranschaulicht, sind die oberen und die unteren Schwalbenschwanzschenkel symmetrisch um die radiale oder Längsachse der Turbinenschaufel und weisen eine schmale Weite auf, um entsprechende rechteckige Halsstücke **34** mit örtlich minimalem Querschnittsbereich über jedem der oberen und unteren Schenkelpaare zu definieren. Die während des Rotationsbetriebs durch die Schaufeln in dem Triebwerk erzeugten Zentrifugalkraftlasten werden radial nach innen zuerst durch das obere Halsstück und auf die oberen Schwalbenschwanzschenkel zur Übertragung in die zugehörigen oberen Schenkel der Schwalbenschwanzschlitze in der stützenden Rotorscheibe übertragen.

[0033] Einige der Zentrifugalbelastungen werden ferner durch das untere Halsstück des Schwalbenschwanzes und durch die unteren Schwalbenschwanzschenkel auf die zugehörigen unteren Schenkel des Schwalbenschwanzschlitzes in der Rotorscheibe übertragen. Auf diese Weise werden die beiden Schwalbenschwanzschenkelpaare gemeinsam zur Aufnahme der gesamten zentrifugalen und sonstigen Belastungen, die während eines Rotorbetriebs in der Turbinenlaufschaufel erzeugt werden, in die tragende Rotorlaufscheibe verwendet.

[0034] Zur Gewichtsreduktion der einzelnen Turbinenschaufeln werden die zugehörigen Schwalbenschwänze **18** so klein wie möglich hergestellt, was aber durch die maximal zulässige Spitzenspannung innerhalb des Schwalbenschwanzes zur Sicherstellung einer geeigneten Nutzungsdauer der Schaufel während eines Betriebs in dem Triebwerk begrenzt ist. Da die Schwalbenschwanzhalse **34** eine minimale Querschnittsfläche aufweisen, stellen sie gewöhnlich die Stelle mit der Spitzenspannung in dem Schwalbenschwanz dar.

[0035] Wie in [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#) gezeigt, enthält der Schwalbenschwanz vorzugsweise auch einen integrierten rechteckigen Fußblock **36**, der die unteren Schenkel **26** seitlich oder in Umfangsrichtung über den Großteil ihres Fußendes überbrückt. In einem herkömmlichen Schaufelschwalbenschwanz würde der Fußblock an der vorderen Endfläche des Schwalbenschwanzes beginnen und sich vollständig bis zu einer hinteren Endfläche des Schwalbenschwanzes erstrecken und an ihr enden. Der rechteckige Block verstärkt die strukturelle Integrität und Festigkeit des Schwalbenschwanzes, ist aber in der radialen Spannungsweite ziemlich dünn, um die dadurch geschaffene Gewichtszunahme zu begrenzen.

[0036] Die Erfinder haben entdeckt, dass die z. B. in [Fig. 1](#) dargestellte axial gerade Konstruktion der Scheibenschenkel **32** eine axiale Schwankung ihrer Tragfestigkeit herbeiführt. Insbesondere sind die Scheibenschenkel **32** an ihren axial mittleren Abschnitten tatsächlich steifer als an ihren axial entgegengesetzten Enden in der Nähe der vorderen und der hinteren Stirnfläche des Scheibenumfangs.

[0037] Demgemäß führt die axiale Schwankung der Steifigkeit der Scheibenschenkel zu einer axialen Schwankung der zwischen den Schwalbenschwanzschenkel **26** und den Scheibenschenkeln **32** übertragenen Zentrifugalkräfte.

[0038] Wie in [Fig. 3](#) veranschaulicht, zeigt eine detaillierte Belastungsanalyse an, dass die Spitzen- oder maximale Spannung SM in dem unteren Schwalbenschwanzhalsstück **34** in der Nähe der axialen Mitte des Schwalbenschwanzes zwischen seinen beiden entgegengesetzten Endflächen **38**, **40** auftritt.

[0039] Dementsprechend kann die Größe des in [Fig. 3](#) dargestellten zweischenkligen Schwalbenschwanzes mit konventionellen Methoden nicht mehr als bis zu der Größe reduziert werden, bei der für ein bestimmtes für den Schwalbenschwanz verwendetes Material sich die örtlich maximale Spitzenspannung SM der erlaubten oder zulässigen Spitzenspannung nähert, aber diese nicht übersteigt.

[0040] Entsprechend haben die Erfinder auch herausgefunden, dass aufgrund der axialen Schwankung der Steifigkeit der Scheibenschenkel die betrieblichen Belastungen in dem Schwalbenschwanz wesentlich unter der maximalen Spannung SM an beiden Endflächen **38**, **40** des Schwalbenschwanzes liegen.

[0041] Der in [Fig. 3](#) dargestellte Fußblock **36** erstreckt sich nicht vollständig über das gesamte Fußende des Schwalbenschwanzes, sondern endet kurz vor der vorderen Endfläche **40**, um an dieser eine entsprechende Fußkerbe **42** auszubilden. Diese

in bevorzugter Weise angeordnete Fußkerbe verringert örtlich begrenzt die Festigkeit des Schwalbenschwanzes, was im Betrieb einer lokalen Spannungserhöhung entspricht. Entsprechend kann eine deutliche zusätzliche Gewichtsreduktion in dem Schwalbenschwanz **18** durch eine Maximierung der Größe der Fußkerbe **42** erzielt werden, ohne andererseits die maximale Spannung in dem Schaufel-schwalbenschwanz über die vorgegebene zulässige maximale Spannung zu erhöhen.

[0042] Wie in [Fig. 3](#) gezeigt, bildet der Fußblock **36** eine integrale Erweiterung des unteren Schenkelpaares und ist radial darunter in einem gemeinsamen Gussstück angeordnet.

[0043] Die gesamte Turbinenlaufschaufel wird zunächst im Gussverfahren aus einer geeigneten Superlegierung hergestellt, um der schädigenden Temperatur- und Belastungsumgebung in der Hochdruckturbine standzuhalten. Der Schwalbenschwanz samt seiner zweifachen Schenkelpaare wird zunächst mit Überschussmaterial gegossen, das durch herkömmliches Präzisionsschleifen entfernt werden kann, um eine endgültige Gestalt und Größe und ein glattes Oberflächenfinish hierfür zu erhalten.

[0044] Wie in [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) gezeigt, ist der Fußblock **36** vorzugsweise mit den unteren Schenkeln **26** an einer ersten Kehle **44** verbunden, die einen geeigneten Radius A zur Minimierung der in ihr auftretenden Spannungskonzentration aufweist. Wie in [Fig. 3](#) gezeigt, ist die Fußkerbe **42** flach und mit dem Fußblock an einer zweiten Kehle **46** verbunden, die einen entsprechend großen Radius B ebenfalls zur Reduktion der in ihr auftretenden Spannungskonzentration aufweist.

[0045] Der Radius der ersten Kehle kann z. B. ca. 50 mils (1,27 mm) betragen, und die zweite Kehle kann einen Radius von ca. 100 mils (2,54 mm) aufweisen.

[0046] Der Fußblock weist eine Höhe C auf, die sich von der Tangente an der ersten Kehle **44** aus erstreckt, und die zweite Kehle **46** weist vorzugsweise eine so große Tiefe D wie die Blockhöhe C auf. Auf diese Weise kann die Tiefe der Fußkerbe zur Maximierung eines Abtrags des überschüssigen Materials an dem vorderen Ende des Schwalbenschwanzes maximiert werden, ohne die Schwalbenschwanzspannungen über die maximal erlaubte Spannung hinaus übermäßig zu erhöhen.

[0047] In der bevorzugten Ausführungsform sind die zweite Kehle **46** und die zugehörige Fußkerbe **42** in ihrer Tiefe D größer als die Höhe C des Blocks. Und wie in [Fig. 4](#) dargestellt, erstreckt sich die Kehle **46** in die erste Kehle **44** hinein, etwas über die Tangente der ersten Kehle hinweg mit der geraden Seitenwand

des Fußblocks **36**.

[0048] Auf diese Weise kann eine maximale Materialmenge lokal von dem Fußende des Schwalbenschwanzes in der Nähe der vorderen Endfläche entfernt werden, was einer reduzierten Steifigkeit der zugehörigen Scheibenschenkel entspricht, die die Schwalbenschwanzschenkel stützen. Die Fußkerbe ergibt eine entsprechende Erhöhung der örtlichen Spannung in dem unteren Halsstück **34** in der Nähe der vorderen Endfläche.

[0049] Wie in [Fig. 3](#) gezeigt, weist der Fußblock **36** eine Weite E auf, die sich seitlich in der Umfangsrichtung zwischen den unteren Schenkeln **26** an ihren zugehörigen ersten Kehlen **44** erstreckt. Dementsprechend weist die Fußkerbe **42** eine Weite auf, die mit der Blockweite E gleich ist, um die Menge von in dem lokalen Bereich der Kerbe entferntem Material zu maximieren.

[0050] Die Fußkerbe **42** weist ferner eine axiale Länge F auf, die sich von der vorderen Endfläche **40** bis zu der zweiten Kehle **46** erstreckt, wobei die Kerbenlänge F in der Größenordnung der Blockweite E liegt. Auf diese Weise ist die Fußkerbe in der axialen Richtung relativ kurz und weist eine maximale Weite in der Umfangsrichtung oder seitlichen Richtung auf und ist örtlich direkt neben der vorderen Endfläche **40** des Schwalbenschwanzes angeordnet, der entsprechend durch die Abschnitte der Scheibenschenkel mit relativ niedriger Steifigkeit gestützt wird.

[0051] Die Tiefe D und die Länge F der Fußkerbe **42** sind gemeinsam bemessen, um nicht nur das Gewicht des gesamten Schwalbenschwanzes zu reduzieren, sondern eine Spannung SL in dem Abschnitt des unteren Halsstücks **34** direkt über der Fußkerbe zu bewirken, wobei diese Spannung nahe an die maximale Spannung SM in dem Rest des unteren Halsstücks herankommt, aber diese nicht übersteigt.

[0052] Wie oben angegeben, bewirkt die axiale Gestaltung der Scheibenschenkel eine größere Steifigkeit in der Nähe der axialen Mitte dieser Schenkel als an ihren axial gegenüberliegenden Enden. Wie in [Fig. 3](#) veranschaulicht, bewirkt dies typischerweise, dass die maximale Schwalbenschwanzspannung SM in der Nähe der axialen Mitte des Schwalbenschwanzes in dem unteren Halsstück **34** auftritt. Die Spannung SL in dem unteren Halsstück in der Nähe der vorderen Endfläche ist entsprechend kleiner als die maximale Spannung SM, wobei mit der Einführung der Fußkerbe **42** die Größe der unteren Spannung SL steigt, diese jedoch begrenzt ist, um die maximale Spannung SM in der Mitte des Halsstücks nicht zu übersteigen.

[0053] Auf diese Weise kann durch die örtliche Einführung der Fußkerbe **42** an der vorderen Endfläche

40 eine deutliche Reduktion der Schwalbenschwanzmasse erzielt werden, was die Spannung in dem unteren Halsstück in der Nähe der vorderen Endfläche entsprechend erhöht. Da die lokale Spannung SL dennoch kleiner als die maximale Spannung SM ist, wird die Nutzungsdauer der Turbinenschaufel nicht reduziert, aber eine wesentliche Gewichtsreduktion erzielt.

[0054] Die Fußkerbe **42** kann z. B. relativ schmal sein, mit einer Kerbtiefe D von ca. 40 mils (1 mm) und einer Kerblänge F von ca. 400 mils (10 mm) über die gesamte Weite E des Fußendes der unteren Schenkel. In einer beispielhaften Rotorschaukel der zweiten Stufe ergibt dies eine Reduktion der Schwalbenschwanzmasse um ca. ein Prozent, was in einem Flugzeugturbofantriebwerk eine beträchtliche Größe darstellt.

[0055] Da der in [Fig. 3](#) dargestellte Fußblock **36** speziell zur Verstärkung des Schwalbenschwanzes eingeführt wurde, ist eine übermäßige Abtragung von diesem nicht erwünscht und ist vorzugsweise begrenzt. In der bevorzugten Ausführungsform endet der Fußblock insgesamt an der Stelle der Einbringung der Fußkerbe **42**, wobei die Fußkerbe eine Tiefe aufweist, die größer als die Höhe des Fußblocks ist, um eine Gewichtsreduktion zu maximieren, ohne dass daraus eine übermäßige lokale Spannung resultiert. In alternativen Ausführungsformen kann der Fußblock lediglich teilweise an der Stelle der Einbringung einer entsprechenden seichten Fußkerbe enden, die eine Tiefe aufweist, die zur Reduktion der örtlichen Spannungserhöhung bei geringerer Gewichtsreduktion kleiner als die Höhe des Fußblocks ist.

[0056] Wie in [Fig. 5](#) dargestellt, ist die Schaufelblattvorderkante **22** über der vorderen Schwalbenschwanzendfläche **40** angeordnet, wobei sie in Längsrichtung oder radial mit der Fußkerbe **42** ausgerichtet ist. Da das Schaufelblatt **16** aus aerodynamischen Gründen verwunden ist, ist die Hinterkante **24** seitlich oder in Umfangsrichtung zu der hinteren Endfläche **38** des Schwalbenschwanzes versetzt angeordnet und erzeugt einen Überstand über der Seite des Schwalbenschwanzes.

[0057] Die überstehende Hinterkante bewerkstelligt den Lastentransfer durch die Schwalbenschwanzschenkel hindurch und in die Scheibensäulen hinein. Eine Spannungsanalyse zeigt an, dass die Spannung in dem unteren Halsstück des Schwalbenschwanzes in der Nähe der hinteren Endfläche unter dem Hinterkantenüberstand hinsichtlich ihrer Größe näher an die maximale Spannung SM in dem unteren Halsstück in der Nähe der Mitte des Schwalbenschwanzes herankommt als die Spannung in dem unteren Halsstück an der vorderen Endfläche.

[0058] Demgemäß ist in der bevorzugten Ausführungsform die Fußkerbe **42** in dem Fußblock lediglich an der vorderen Endfläche und nicht an der hinteren Endfläche angeordnet. Und der Fußblock weist von der Fußkerbe vollständig bis zu der hinteren Endfläche ein vorzugsweise gleichförmiges Profil auf.

[0059] Auf diese Weise wird die Konfiguration des Fußblocks **36** von der hinteren, kurz vor der vorderen Endfläche endenden Endfläche zur Maximierung der Festigkeit des Schwalbenschwanzes maximiert, wobei die Fußkerbe eine örtlich begrenzte Gewichtsreduktion des Schwalbenschwanzes ergibt, die der axialen Stelle an dem Schwalbenschwanz entspricht, die mit der Stelle der verringerten axialen Steifigkeit der Scheibenschenkel übereinstimmt.

[0060] Das in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellte Turbinenschaufelblatt **16** ist vorzugsweise hohl und enthält innere Kühlkreise **48**, die eine beliebige konventionelle Konfiguration aufweisen können. Dementsprechend enthält der Schwalbenschwanz mehrere axial ausgerichtete Einlassöffnungen **50**, z. B. vier Öffnungen, die sich in Längsrichtung oder radial durch den Schwalbenschwanz hindurch, in Strömungsverbindung mit den Kühlkreisen des Schaufelblatts erstrecken. Von dem Triebwerksverdichter abgezapfte Kühlluft **12** wird geeignet durch die Scheibenschlitze **28** geleitet und tritt in die verschiedenen Einlassöffnungen **50** ein, um Kühlluft durch den Schwalbenschwanz hindurch und in das Schaufelblatt hinein zu liefern.

[0061] Die Fußkerbe **42** endet in Längsrichtung innerhalb der ersten Einlassöffnung **50**, die zu der vorderen Endfläche **40** des Schwalbenschwanzes am nächsten liegt.

[0062] Eine Belastungsanalyse zeigt an, dass, wenn die Fußkerbe in der Rippe zwischen der ersten und der zweiten Einlassöffnung endet, wie in [Fig. 3](#) dargestellt, unerwünschte lokale Kompressionsspannungen in der Rippe auftreten würden, die die Nutzungsdauer der Turbinenschaufel verkürzen könnten. Dadurch, dass die Fußkerbe kurz vor der zwischen den Öffnungen befindlichen Rippe, z. B. in der Mitte der ersten Öffnung, endet, kann eine deutliche Gewichtsreduktion in dem Schwalbenschwanz erzielt werden, ohne im Betrieb die maximale Spannung in diesem zu überschreiten und ohne unerwünschte Spannungen in den Rippen zwischen den Öffnungen herbeizuführen.

[0063] Ungeachtet der komplexen Gestaltung des Schwalbenschwanzes mit zweifachen Schenkeln in der beispielhaften Turbinenrotorschaukel, kann eine deutliche Gewichtsreduktion in ihm erzielt werden, ohne dass die maximale Spannung an seiner ursprünglichen Stelle überschritten wird und ohne übermäßige lokale Spannungen hervorzurufen, die

die Nutzungsdauer der Laufschaufel verkürzen würden. Die Fußkerbe wird in einer bevorzugten Anordnung mit den zusammenwirkenden ersten und zweiten Kehlen gezielt ausschließlich in der Nähe der vorderen Endfläche des Schwalbenschwanzes eingeführt, um damit verbundene Spannungskonzentrationen zu reduzieren. Die resultierende Turbinenschaufel kann eine gleich lange Nutzungsdauer erreichen wie eine entsprechende Schaufel ohne eine Fußkerbe, jedoch mit dem zusätzlichen Vorteil einer deutlichen Gewichtsreduktion.

Patentansprüche

1. Turbinenlaufschaufel (10), die aufweist:
ein integral mit einem Schwalbenschwanz (18) verbundenes Schaufelblatt (16), das eine Vorderkante (22) und eine axial gegenüberliegende Hinterkante (24) enthält;
wobei der Schwalbenschwanz ein Paar in Seitenrichtung gegenüberliegender oberer Schenkel und ein Paar unterer Schenkel (26) enthält, die miteinander über ein dazwischen liegendes Halsstück (34) verbunden sind, wobei das zweifache Schenkelpaar symmetrisch ist, um die Laufschaufel in einem komplementären Schlitz am Umfang einer Rotorscheibe (30) zu stützen; und
wobei der Schwalbenschwanz ferner einen rechteckigen Fußblock (36) aufweist, der die unteren Schenkel über den Großteil seines Fußendes überbrückt und der an einer hinteren/stromabwärtigen Endfläche (38) des Schwalbenschwanzes beginnt und zumindest teilweise kurz vor einer axial gegenüberliegenden vorderen/stromaufwärtigen Endfläche (40) des Schwalbenschwanzes endet, um an dieser eine Fußkerbe (42) auszubilden; **dadurch gekennzeichnet**, dass:
das Schaufelblatt (16) hohl ist und der Schwalbenschwanz mehrere Einlassöffnungen (50) enthält, die sich in Längsrichtung durch ihn in Strömungsverbindung mit dem Schaufelblatt erstrecken; und
die Fußkerbe (42) innerhalb der Einlassöffnung (50) endet, die der vorderen/stromaufwärtigen Schwalbenschwanzendfläche (40) am nächsten ist.

2. Schaufel nach Anspruch 1, wobei der Fußblock (36) mit den unteren Schenkeln (26) an einer ersten Kehle (44) verbunden ist und die Fußkerbe (42) an einer zweiten Kehle (46) mit dem Block verbunden ist.

3. Schaufel nach Anspruch 2, wobei der Fußblock (36) eine Höhe aufweist, die sich von der ersten Kehle (44) ausstreckt, und die Fußkerbe (42) in der Tiefe wenigstens so groß ist wie die Blockhöhe.

4. Schaufel nach Anspruch 3, wobei der Fußblock (36) eine Weite aufweist, die sich in Seitenrichtung zwischen den unteren Schenkeln (26) an zugehörigen ersten Kehlen (44) an diesem erstreckt, und

die Fußkerbe (42) eine Weite aufweist, die mit der Blockweite übereinstimmt.

5. Schaufel nach Anspruch 4, wobei die Fußkerbe (42) in dem Fußblock (36) ausschließlich an der vorderen/stromaufwärtigen Endfläche und nicht an der hinteren/stromabwärtigen Endfläche angeordnet ist und der Fußblock ein einheitliches Profil von der Kerbe vollständig bis zu der hinteren/stromabwärtigen gerichteten Endfläche aufweist.

6. Schaufel nach Anspruch 5, wobei die zweite Kehle (46) in der Tiefe größer ist als die Blockhöhe und sich in die erste Kehle (44) hinein erstreckt.

7. Schaufel nach Anspruch 5, wobei die Fußkerbe (42) eine Länge aufweist, die sich von der vorderen/stromaufwärtigen Endfläche (40) bis zu der zweiten Kehle (46) in der gesamten Breite des Blocks erstreckt.

8. Schaufel nach Anspruch 5, wobei die Tiefe und die Länge der Fußkerbe gemeinsam bemessen sind, um eine Belastung in dem Halsstück über der Kerbe zu bewirken, die der maximalen Belastung in dem Halsstück sehr nahe kommt, diese aber nicht überschreitet.

9. Schaufel nach Anspruch 5, wobei die Tiefe der Kerbe ungefähr 1 mm und die Länge der Kerbe ungefähr 10 mm beträgt.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

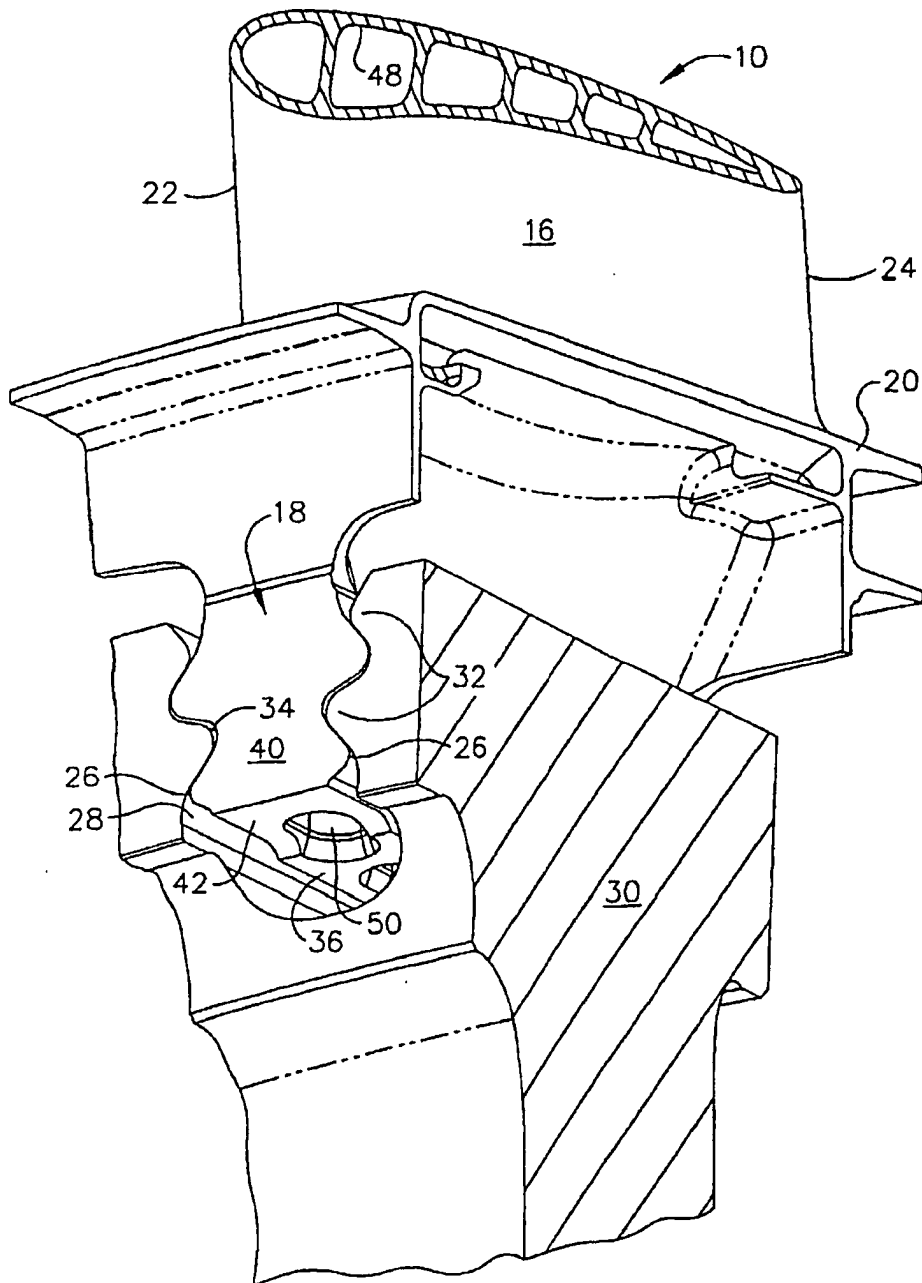
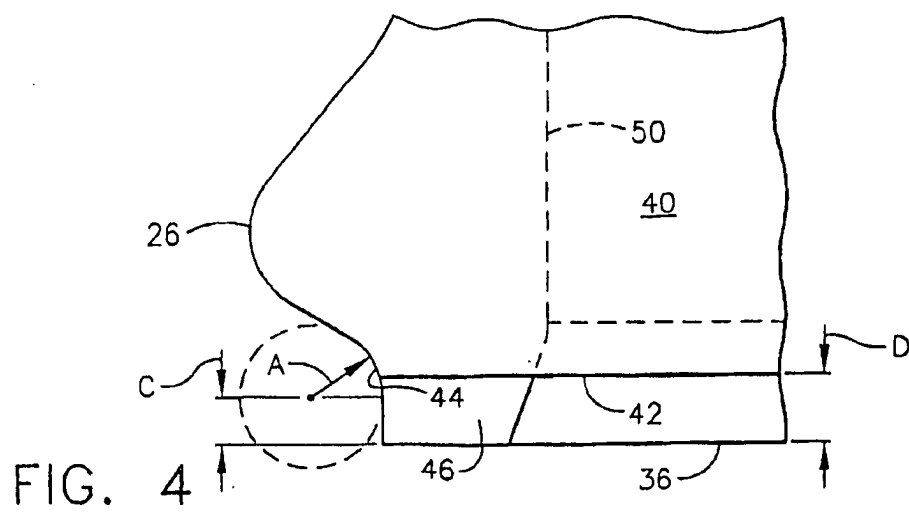
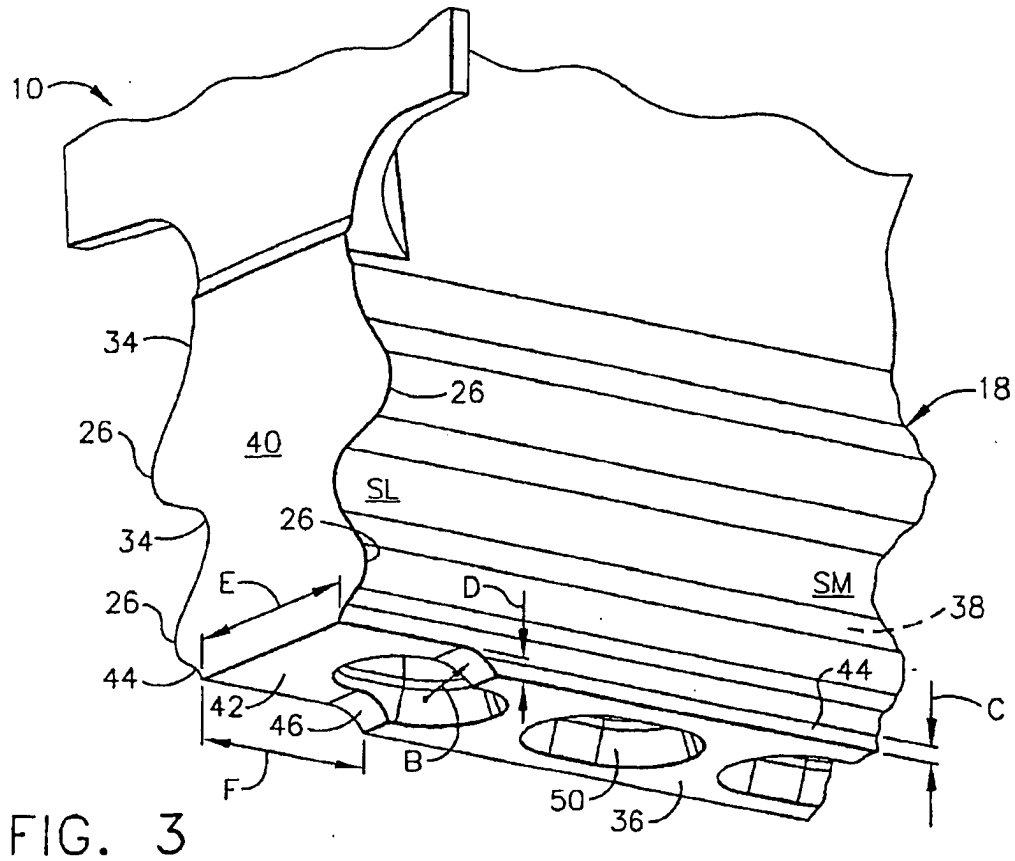


FIG. 2



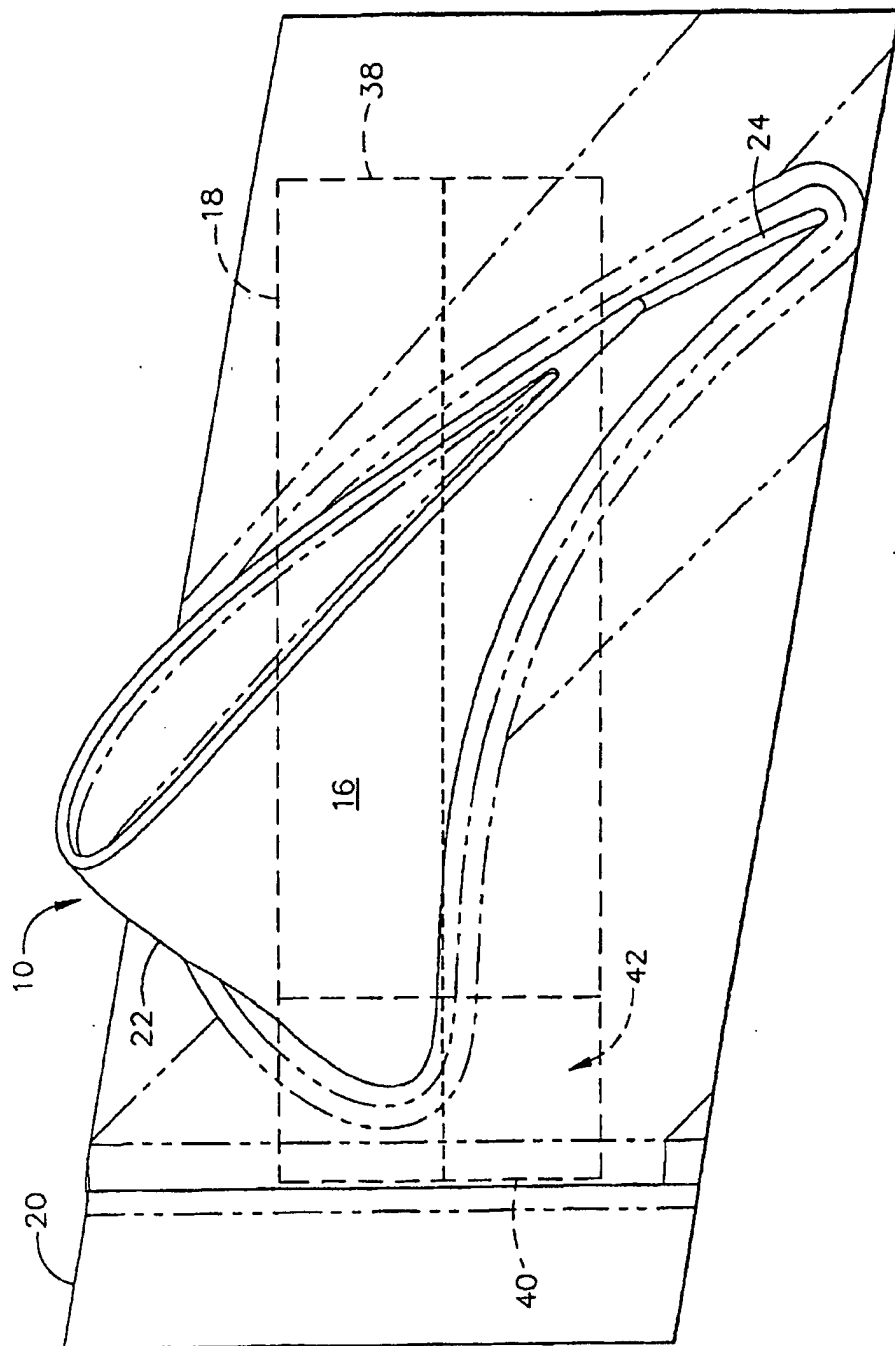


FIG. 5