



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 27 892 T2** 2004.03.11

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 877 657 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 27 892.8**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US96/11412**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 924 390.6**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 97/002914**

(86) PCT-Anmeldetag: **08.07.1996**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **30.01.1997**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **18.11.1998**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **02.05.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **11.03.2004**

(51) Int Cl.7: **B22C 9/00**
B22D 31/00

(30) Unionspriorität:
501511 11.07.1995 US

(73) Patentinhaber:
Extrude Hone Corp., Irwin, Pa., US

(74) Vertreter:
derzeit kein Vertreter bestellt

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT, CH, DE, FR, GB, IT, LI, NL, PT, SE

(72) Erfinder:
RHOADES, J., Lawrence, Pittsburgh, US;
GILMORE, R., James, Ligonier, US

(54) Bezeichnung: **FEINGUSSFORM UND -KERNE**

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**HINTERGRUND DER ERFINDUNG TECHNISCHES GEBIET**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet des Feingusses. Feingussartikel werden in einem weit verbreiteten Maße in vielen Industriezweigen verwendet und verbesserte Herstellungstechniken sind von großer Wichtigkeit.

EINLEITUNG

[0002] Der Feinguss ist eine alte Technik, aber eine, die in vielen Industriezweigen eine beträchtliche andauernde Wichtigkeit hält und die bevorzugte Technik für die Herstellung von kompliziert ausgebildeten Teilen und insbesondere von Teilen mit komplexen und nicht-zugänglichen internen Bohrungen, Hohlräumen oder Kammern.

[0003] In allgemeiner Hinsicht basiert ein Feinguss auf der Bildung eines Teils, welches gebildet werden soll, in Wachs oder einem wachsartigen Material, welches bemessen ist, um ein Schrumpfen des Gusses zu erlauben, wenn er abkühlt, und das mit einer keramischen hitzebeständigen Hülle bzw. Haut beschichtet ist. Das Wachsmaterial wird von der Hülle entfernt, wobei ein Hohlraum zurückgelassen wird, der die Anpassung an das ursprüngliche Wachsteil aufweist. Die Keramik wird gebrannt, um die Partikel zu sintern, wobei eine Festkörpergießform mit einem Hohlraum gebildet wird, der zur Aufnahme von geschmolzenem Metall ausgelegt ist. Der Hohlraum wird mit geschmolzenem Metall gefüllt, welches dann auf eine Festkörperform abgekühlt wird. Die Hülle bzw. Haut wird durch Hämmern oder Sandstrahlen oder dgl. entfernt und der Guss wird zurückgewonnen.

[0004] Nach Trimm-, Reinigungs-, Schleif-, Polier- und ähnlichen Endbearbeitungsvorgängen wird ein Teil, welches eine Endbearbeitung durchlaufen hat, bereitgestellt. Als allgemeiner Hinweis ist die dimensionsmäßige Genauigkeit von Feingüssen sehr respektabel und der Schleifvorgang, der als ein Element einer Endbearbeitung verwendet wird, kann Teile mit im Wesentlichen irgendeinem Grad einer Präzision und geforderten Genauigkeit herstellen.

[0005] Es ist gebräuchlich geworden, Kerneinsätze in der Gießform zu verwenden, um die Grundlage für hohle Elemente in dem Guss bereitzustellen. In der Tat ist es durch die Verwendung von Gießformkerneinsätzen möglich, Teile zu bilden, die durch irgendeine andere Technik nicht gebildet werden können. Derartige interne Aufbauten können wichtig sein, um das Gewicht des Gusses zu steuern oder um Flusspfade für Fluids oder dgl. bereitzustellen. Die Hohlräume, die für ein bestimmtes Teil benötigt werden, können einfacher als Teil der Gießvorgänge gebildet werden, anstelle dass ein getrennter und zusätzlicher Bearbeitungs- oder Bohrvorgang benötigt

wird, und es gibt viele Gussteile, die mit hohlen internen Formen ausgebildet sind, die durch Bearbeitungstechniken überhaupt nicht gebildet werden können.

[0006] Wenn Gussformkerneinsätze verwendet werden, werden sie gewöhnlicherweise getrennt von der Hülle aus hitzebeständigen Keramikmaterialien gebildet, die die gleichen wie diejenigen oder vergleichbar mit denjenigen sind, die zum Bilden der Gießformhülle verwendet werden. Wie die Hülle, in die sie eingesetzt werden, müssen Kerne oder Einsätze dimensioniert sein, um ein Schrumpfen zu ermöglichen, und müssen innerhalb der Hülle mit Genauigkeit und Präzision platziert, positioniert und gehalten werden.

[0007] Nach dem Gießen wird das Kernmaterial durch Techniken entfernt, die im Allgemeinen die gleichen sind wie diejenigen, die zum Entfernen der Hülle verwendet wird, was durch eine chemische Entfernung des Materials in Bereichen, die für einen Hämmern- oder Sandstrahlvorgang nicht zugänglich sind, ergänzt werden kann. Das Erfordernis einer chemischen Entfernung kann die Auswahl von Materialien für den Kern beschränken.

[0008] Es gibt eine Vielfalt von Techniken zum Entfernen von Gießformeinsätzen und Kernen, die relativ aufwändig sind und Formen und Abmessungen diktieren. Eine gleichermaßen vielfältige Anzahl von Techniken wird verwendet, um die Einsätze in den Hüllen zu positionieren und zu halten. Die gebräuchlichste Technik zum Haltern von Kernen innerhalb von Gießformaufbauten ist die Anordnung von Keramikstiften mittlerer Größe, die integral mit der Hülle oder dem Kern oder beiden gebildet werden können, die von der Oberfläche der Hülle an die Oberfläche des Kernaufbaus vorstehen und dazu dienen, den Kerneinsatz zu lokalisieren und zu halten. Nach dem Gießvorgang werden die Löcher in den Guss gefüllt, beispielsweise durch Verschweißen oder dgl., vorzugsweise mit der Legierung, aus der die Gießform gebildet ist.

[0009] Feingusstechniken neigen zu einer Anzahl von Ungenauigkeiten. Während externe Ungenauigkeiten oft mit herkömmlichen Maschinenbanktechniken korrigiert werden können, können diejenigen, die in internen strukturellen Formen angetroffen werden, die mit Kernen hergestellt werden, schwierig und oft unmöglich aufgelöst werden.

[0010] Interne Unzulänglichkeiten und Ungenauigkeiten stammen von bekannten Faktoren. Diese sind im Allgemeinen ein Mangel einer Genauigkeit bei der Bildung der Kernstruktur, ein Mangel der Genauigkeit beim Einsetzen des Kerns in die Hülle bei der Herstellung, dem Zusammenbau der Gießform, nicht erwarteten Änderungen oder Defekten, die während des Brennens der Keramikformen eingeführt werden, und Fehlern der Hülle, des Kerneinsatzes oder von Anbringungselementen während der Herstellung, des Zusammenbaus und der Behandlung vor dem oder während dem Gießvorgang.

[0011] Die präzise und genaue Ausformung, Dimensionierung und Positionierung des Kerneinsatzes ist die komplizierteste Schwierigkeit bei der Herstellung von Gießformen gewesen. Es sind diese Aspekte des Feingusses gewesen, die die Anstrengungen der Erfinder initiiert haben, obwohl es sich herausgestellt hat, dass die Methodologie der vorliegenden Erfindung eine breitere Anwendbarkeit aufweist.

[0012] Typischerweise sind die Gießformhülle und die Kernausbildung auf die Fähigkeit, in zuverlässiger Weise feine Details mit vernünftigen Auflösungsgraden zu bilden, beschränkt gewesen. Im Hinblick auf die Genauigkeit einer Positionierung und einer Anlage, von zuverlässigen Dimensionen und der Erzeugung von komplizierten und detaillierten Formen sind derartige Systeme relativ beschränkt gewesen.

[0013] Die Kerneinsätze sind typischerweise Gussteile oder Formteile, die ein gewöhnliches keramisches Gussteil oder Formteil verwenden, gefolgt von geeigneten Brenntechniken. Eigentümlich für die Art des keramischen Gussteils bzw. Gusses ist, dass eine Genauigkeit und Präzision im Wesentlichen geringer als diejenigen sind, die durch Metallgusstechniken erreicht werden. Bei den gewöhnlichen Keramikgussformulierungen oder "Streifen" ("Slips") gibt es ein weitaus größeres Schrumpfen mit einer viel größeren Tendenz zum Bilden von Sprüngen, Blasen und anderen Defekten. Es gibt demzufolge eine hohe Ausfall- und Zurückweisungsrate bei der Herstellung von Metallfeingüssen, die von nicht korrigierbaren Defekten stammen, die durch fehlerhafte Kerne und eine fehlerhafte Kernplatzierung stammen, und eine Anforderung für eine aufwändige Bearbeitung beim Gießen, um diejenigen Gussteile zu korrigieren, die außerhalb der Spezifikationen liegen, aber einer Korrekture durch eine Bearbeitung, einen Schleifvorgang und dgl. zugänglich sind. Die Produktivität und Effizienz von Gießformvorgängen werden durch derartige Anforderungen wesentlich behindert.

[0014] Ein anderes beschränkendes Merkmal für den Feinguss ist die sehr beträchtliche Werkzeugentwicklungs-Vorlaufzeit und der sehr intensive Grad von Arbeiten und Anstrengungen, die für die Werkzeugentwicklung benötigt werden, gewesen. Die Entwicklung von jeder Stufe der Werkzeugbehandlung, einschließlich insbesondere der Form und der Dimensionen der Wachstform, der Form und der Dimensionen der Rohkörper, und der Nettoform der gebrannten Gießformen, insbesondere der Kerne, und der sich ergebenden Konfiguration und der Dimensionen des Gussteils, das in den Gießformen hergestellt wird, werden durch eine große Anzahl von Variablen beeinflusst, einschließlich einer Wölbung, eines Schrumpfens und einer Bruchbildung während der verschiedenen Herstellungsschritte, und insbesondere während des Brennens der keramischen Rohkörper. Wie durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet allgemein bekannt ist, sind diese Parameter nicht genau vorhersagbar und die Entwicklung von Feingussformen ist ein höchst iterativer und

empirischer Versuchsprozess (Trial und Error-Prozess), der sich für komplexe Gussteile typischerweise über Perioden von zwanzig bis fünfzig Wochen erstreckt, bevor der Prozess in die Produktion gebracht werden kann.

[0015] Infolgedessen ist ein Feinguss mit komplexer Genauigkeit, insbesondere aus hohlen Teilen, auf die Herstellung von Teilen und das Gießen in großen Anzahlen beschränkt und ist im Allgemeinen für begrenzte Herstellungsläufe nicht geeignet. Änderungen im Design des Gussteils erfordern Neueinstellungen der Werkzeugbehandlung von beträchtlicher Größe und sind somit relativ kostenintensiv und zeitaufwändig.

STAND DER TECHNIK

[0016] Der Stand der Technik hat sich diesen Problemen gewidmet und hat Fortschritte bei der Entwicklung von überlegenen Keramikformulierungen gemacht, die das Auftreten von derartigen Problemen zu einem gewissen Grad verringern.

[0017] Während diese Techniken zu Verbesserungen geführt haben, tragen sie zu den Kosten des Gießvorgangs bei, und erreichen nicht die gesamte Verbesserung, die gewünscht werden könnte.

[0018] Für diese Techniken, die ein Arbeiten an und insbesondere eine Bearbeitung von Rohkörpern verwenden, hat die Erfahrung gezeigt, dass die Änderungen in der Dimension während eines Brennvorgangs des Keramikkörpers eine Anzahl von Ungenauigkeiten einführt, die das Erreichen der beabsichtigten Form und der beabsichtigten Dimensionen in dem gebrannten Körper begrenzen. Wegen der Zerbrechlichkeit der Rohkörper sind die Techniken, die verwendet werden können, begrenzt und beträchtliche manuelle Arbeiten werden gewöhnlicherweise benötigt. Selbst mit den besten Vorkehrungen und mit Vorsicht wird ein wesentlicher Anteil der Kerne durch die Arbeitsvorgänge beschädigt werden.

[0019] Am wichtigsten ist, dass die Merkmale des Standes der Technik bis heute wenig beitragen, den Werkzeugentwicklungszyklus zu verbessern oder die Anzahl von Iterationen zu verringern, die benötigt werden, um eine abschließende Werkzeugbehandlung mit der benötigten Präzision und Genauigkeit der Form und der Dimensionen zu erzeugen. Der Stand der Technik gibt nicht effektive Techniken her, um Gießformhüllen und Kerne, die außerhalb der Spezifikationen liegen, neu zu bearbeiten oder die Nettoformen zu ändern, um Designänderungen ohne Wiederholen des Werkzeugentwicklungsprozesses aufzunehmen.

AUFGABEN DER ERFINDUNG

[0020] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren für die Herstellung von Feingießformen und insbesondere von Gießformkernen mit einer hohen und verbesserten dimensionsmäßigen

Genauigkeit und Präzision bereitzustellen.

[0021] Eine andere Aufgabe besteht darin, den Werkzeugentwicklungszyklus zu verringern, um Feingießformen und Kerne mit einer hohen Genauigkeit und Präzision herzustellen.

[0022] Noch eine andere Aufgabe besteht darin, Techniken für die Rückgewinnung von Feingießformen bereitzustellen, die außerhalb von zulässigen Spezifikationen sind, um Gussteile mit hoher Genauigkeit und Präzision herzustellen.

[0023] Noch eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Bereitstellung von Techniken zum Verändern der Form und der Dimensionen von Feingießformen und Kernen, um Designänderungen ohne Wiederholen des Werkzeugentwicklungszyklus bereitzustellen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0024] Die vorliegende Erfindung stellt ein Verfahren zum Herstellen von Feingussartikeln durch einen Feinguss mit einer Keramikgießform bereit, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- A. Bilden einer Keramikgießform aus einer gesinterten Keramik;
- B. Verarbeiten wenigstens eines gewählten Teils der gesinterten Keramikgießform durch eine Ultraschallbearbeitung;
- C. Gießen von geschmolzenem Metall in die Gießform hinein;
- D. Kühlen des geschmolzenen Metalls auf einen Festguss; und
- E. Entfernen der Gießform von dem Guss.

[0025] Die vorliegende Erfindung stellt ferner ein Verfahren zum Herstellen von Feingussartikeln durch einen Feinguss mit einer Keramikgießform bereit, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- A. Bilden eines gebrannten Keramikgießkerns auf nahezu eine Nettoform und -abmessungen;
- B. Formen des Keramikkers auf eine Nettoform und -abmessungen durch eine Ultraschallbearbeitung;
- C. Anbringen des bearbeiteten Keramikkers in einer Wachsverarbeitungsgießform;
- D. Bilden einer Wachsform innerhalb der Wachsverarbeitungsgießform einschließlich des Keramikkers;
- E. Entfernen der Wachsform von der Wachsverarbeitungsgießform;
- F. Beschichten der Wachsform mit einem Keramikgießform-bildenden Streifen;
- G. Trocknen des Streifens;
- H. Erwärmen des Streifens, um das Wachs zu entfernen und den Keramikstreifen zu verdichten und zu brennen, um eine Feingussform einschließlich des Keramikkers zu bilden;
- I. Gießen des geschmolzenen Metalls in die Gießform hinein;
- J. Kühlen des geschmolzenen Metalls auf einen

Festkörper; und

K. Entfernen der Keramikgießform und des Keramikkers aus dem festen Metall.

[0026] Bei der vorliegenden Erfindung werden Feingießformen, und insbesondere Gießform-Kerneinsätze mit einer hohen und reproduzierbaren Genauigkeit und Präzision durch Gießen des Kerneinsatzes aus einer Keramik, Brennen der Keramik, und Bearbeiten der Keramikhülle oder des Kernelements auf einen benötigten Genauigkeits- und Präzisionsgrad durch die Verwendung von einer oder mehreren Ultraschallbearbeitungstechniken gebildet und bilden insbesondere Bearbeitungstechniken für die gebrannte Keramik.

[0027] In der Tat können die Hülle oder der Kerneinsatz aus Blöcken oder einem "Balken-Bestand" (Balken-Vorrat) eines vorgesinterten Keramikmaterials mit einer gleichförmigen Porosität bearbeitet werden, um ein Schrumpfen bei der nachfolgenden Verarbeitung und Behandlung zu ermöglichen, und die Oberflächen können nach der Bearbeitung beschichtet werden, um eine glatte Oberfläche für einen Guss bereitzustellen. Die glatte Oberfläche der Keramik wird eine entsprechende glatte Oberfläche auf dem Metallguss, der in der Gießform gebildet werden soll, erzeugen. Es ist möglich, derartige Blöcke oder einen derartigen "Balken-Bestand" aus vorgesinterten Keramikmaterialien mit sehr gleichförmigen und höchst vorhersagbaren Schrumpfeigenschaften zu bilden, wobei ein genaueres Gießen im Vergleich mit Kernen ermöglicht wird, die durch die Techniken gebildet werden, die in dem technischen Gebiet gewöhnlicherweise verwendet werden und deren Porositäts- und Schrumpfeigenschaften sich beträchtlich verändern können.

[0028] Eine der größten Vorteile der Prozeduren der vorliegenden Erfindung ist die Verringerung der Vorlaufzeit zum Herstellen von Teilen und die Beschleunigung des Prozesses zum Entwickeln der Gießformen. Der iterative Prozess einer Entwicklung, der in dem technischen Gebiet gebräuchlich ist, wird stark verringert, weil keine Notwendigkeit besteht, eine abschließende Form zu erreichen, die eine nettodimensionierte Gießformkonfiguration in dem Keramikguss oder dem Formungsvorgang erzeugt. Da die Netto-Gießform-Formen leicht eingestellt werden können, ist die Herstellung von Gussteilen mit der gewünschten Form und den gewünschten Abmessungen nicht der schwierige und zeitaufwändige, größtenteils Trial-und-Error-Prozess, der gewöhnlicherweise in dem technischen Gebiet benötigt wird.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0029] In den Zeichnungen zeigen:

[0030] **Fig. 1** eine perspektivische aufgeschnittene Ansicht einer stilisierten Feingussturbinenmaschinen-Flügelstruktur, die Merkmale darstellt, die in der vorliegenden Erfindung gebildet sind;

[0031] **Fig. 2** eine schematische Darstellung von einem keramischen Gießkern, der in einer Halterung angebracht ist, und von zwei gegenüberliegenden Ultraschallbearbeitungs-Formwerkzeugen zur Verwendung in der vorliegenden Erfindung;

[0032] **Fig. 3a** einen schematischen Querschnitt durch eine Wachsverarbeitungsgießform, wobei ein richtig ausgerichteter Kern innerhalb der Form gezeigt ist; und

[0033] **Fig. 3b** einen schematischen Querschnitt durch eine Wachsverarbeitungsform, wobei ein Kern gezeigt ist, der innerhalb der Form nicht richtig ausgerichtet ist.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0034] In der vorliegenden Erfindung werden Gießformen und insbesondere Kerne für einen Feinguss auf den benötigten Präzisions- und Genauigkeitsgrad der Form und der Dimensionen nach einem Brennen einen vollständig gesinterten Zustand verarbeitet.

[0035] Derartige Techniken sind wegen der Schwierigkeit einer Verarbeitung von harten und brüchigen Keramiken, die zur Verwendung als Feingusskerne geeignet sind, bislang nicht verwendet worden. Traditionelle Bearbeitungs- und andere Verarbeitungstechniken führen zu unakzeptablen Graden von Brüchen und Rissen der Keramiken, um von einem praktischen Nutzen zu sein.

[0036] Die Erfinder haben Punkt- und Form-Ultraschallbearbeitungstechniken entwickelt, die zur Verwendung bei der Verarbeitung von gesinterten und ausgehärteten, vollständig harten und dimensionsmäßig stabilen Keramikkörpern vollständig effektiv und produktiv sind. Durch die Verwendung von diesen Techniken werden Feingusshüllen und Kerne mit einer nicht dagewesenen Präzision, Genauigkeit und Details hergestellt, die verwendet werden können, um Feingussteile herzustellen, die selbst eine daraus folgende Verbesserung der Genauigkeit, Präzision und Detailauflösung und in der Oberflächenendbearbeitung aufweisen, wobei die Gießform und Gussteil-Zurückweisungsrate verringert und der Arbeitsaufwand, der beim Gießen benötigt wird, minimiert wird.

[0037] Bei der vorliegenden Erfindung stellt die Ultraschallbearbeitungstechnik wesentliche Vorteile bereit. Es ist nicht relevant, ob die keramischen Strukturen nicht-leitend und komplex sind; dreidimensionale Formen können so leicht und so schnell wie einfache bearbeitet werden. Es gibt keine chemischen oder thermischen Änderungen der Oberflächen.

[0038] Die Vorlaufzeit, die benötigt wird, um die Gießformen und Kerne zu entwickeln, wird stark verringert, und Modifikationen an den Gießformen, Kernen und dem abschließenden Gussteil können zweckdienlicherweise und schnell erreicht werden.

[0039] Während die Prozeduren der vorliegenden Erfindung besonders signifikant zum Gießen bzw.

Form von Kerneinsätzen sind, wegen dem fehlenden Zugang zu den internen Bohrungen und Hohlräumen der Gussteile für eine Korrektur durch traditionelle Bearbeitungsprozeduren, wie Schleifen, Polieren und dgl., stellt die vorliegende Erfindung die erste Technik bereit, die für die Korrektur von Gießformkomponenten vor dem Gießen praktisch ist, so dass das Gussteil von einer größeren Präzision und Genauigkeit ist, wobei die Notwendigkeit von vielerlei Verarbeitungsvorgängen der Gussteile eingespart wird. Während eine Verarbeitung der gebrannten Gießformhülle nicht in allen Fällen kosteneffektiv sein kann, kann sie beträchtliche Verbesserungen in einigen sehr komplexen und schwierig zu verarbeitenden Formen darstellen und wird in derartigen Fällen produktiv sein.

[0040] In der vorliegenden Erfindung werden Rohkörper durch Techniken gebildet, die in dem technischen Gebiet herkömmlich sind. Es gibt keine spezifischen Erwägungen, die benötigt werden, um die Rohkörper auf die Praxis der vorliegenden Erfindung anzuwenden, obwohl einige bevorzugte Merkmale vorhanden sind, die wünschenswert sein können, um die Nutzen zu maximieren, die realisiert werden sollen.

[0041] Von allen am wichtigsten ist sicherzustellen, dass die Dimensionen des Rohkörpers in Bezug auf Designspezifikationen nicht unterbemessen sind, da es in der vorliegenden Erfindung einfach ist, Überschussmaterialien durch die Bearbeitungsprozedur zu entfernen, aber nicht Material hinzuzufügen. Während die Rohkörper auf die nächsten Toleranzen gebildet werden sollten, die vernünftig möglich sind, wobei der geeignete Schrumpfbetrag während des Brennens der Rohkörper erlaubt wird, sollte er, im Einklang mit einer guten Praxis und zur Minimierung der Verarbeitungsanforderungen, falls ein Fehler vorhanden sein sollte, auf der Seite des Überschussmaterials sein, welches durch Stützung auf die vorliegende Erfindung entfernt werden kann. Es ist dieser Aspekt der vorliegenden Erfindung, der den Werkzeugbehandlungs-Entwicklungszyklus von den gewöhnlichen zwanzig bis fünfzig Wochen auf ungefähr zwei bis vier Wochen bei der Praxis der vorliegenden Erfindung verringert.

[0042] Das heißt nicht, dass Spalte, Defekte, Hohlräume und andere Unzulänglichkeiten in Rohkörpern durch die bekannten Techniken in dem technischen Gebiet nicht repariert werden können, aber es wird allgemein bevorzugt, dass diese Anforderungen verringert werden können.

[0043] Sämtliche Zusammensetzungen, die gewöhnlicherweise in dem technischen Gebiet verwendet werden, können mit der vorliegenden Erfindung verwendet werden. Es wird allgemein bevorzugt, dass die Formulierungen, die die geringsten Kosten und das höchste Betriebsverhalten bei den Gieß- und Gießform-Entfernungsprozeduren bereitstellen, verwendet werden; es ist nicht erforderlich, dass die komplexen Formulierungen, die entwickelt werden,

geeignete Dicke der Beschichtung bereitzustellen, um als eine Gießformhülle zu dienen, mit oder ohne einem Trocknen zwischen den Beschichtungen, wird die geformte Hülle getrocknet, die Wachsgießform wird entfernt, allgemein durch Wärme oder durch eine chemische Reaktion in einer herkömmlichen Weise, und der Rohkörper ist dann bereit zum Brennen, um die Keramik zu sintern.

[0053] Einlauch-Gießtechniken sind für die Bildung von Kernen weniger günstig, da die Kontrolle des Prozesses schwieriger ist, wenn die Keramik auf der Innenseite von weiblichen Formen aufgebracht wird. Gewöhnlicherweise gibt es Fehlstellen, die Defekte in den Rohkörpern darstellen, wenn die Gießform entfernt wird. Deshalb werden Gießprozeduren allgemein für die Bildung von Kernen bevorzugt.

[0054] Bei Gießoperationen wird die Keramikformulierung in einem geeigneten Bindemittel aufgelöst, um eine Plastikgießformzusammensetzung zu bilden, die in eine weibliche Gießform oder eine Form geformt wird. Die Formung kann durch einen Spritzguss bei relativ erhöhter Temperatur erreicht werden, oder durch irgendwelchen der zahlreichen verwandten Plastikformungsvariationen, die in dem Stand der Technik bekannt sind.

[0055] Die gebildeten Rohkörper können in einigen Fällen durch ein isostatisches Drücken, einschließlich eines Heißdrucks, verbessert werden, um die Keramikmaterialien vor dem Brennen zu verdichten.

[0056] In Situationen mit hohen Anforderungen können die Rohkörper durch den Einschluss von faserförmigen Verstärkungen oder Armaturen, die aus Keramik- oder Metallfasern gebildet sind, verstärkt werden, um die strukturellen Elemente der Form zu halten.

[0057] Wenn Armaturen verwendet werden, sollte aufgepasst werden, dass die Armatur so positioniert ist, dass sie nicht an der Oberfläche freigelegt ist oder so nah an der Oberfläche ist, dass sie bei einer nachfolgenden Verarbeitung nicht freigelegt wird.

[0058] Wenn keramische oder metallische Fasern eingebaut sind, wird bevorzugt, dass sie in die Streifen- und Formungs-Formulierung, die die Oberfläche bildet, eingebaut werden oder einer nachfolgenden Verarbeitung ausgesetzt werden.

[0059] In beiden Fällen ist es nicht erwünscht, wenn Verstärkungsmaterialien und insbesondere Metalle an der Oberfläche der fertig gestellten Gießform freigelegt sind oder in einen Kontakt mit dem geschmolzenen Metall kommen, welches gerade in die Gießform gegossen wird. Eine Verunreinigung der Gießlegierung durch Extraktion oder Diffusion von derartigen Einschlüssen in der Gießformstruktur ist allgemein nicht wünschenswert.

[0060] Wie normalerweise in dem technischen Gebiet verständlich, sind die Rohkörper, die in Übereinstimmung mit dem Stand der Technik hergestellt werden, brüchig und relativ einfach zu beschädigen. Die gewöhnlichen Vorkehrungen zum Behandeln von diesen Strukturen wird in der vorliegenden Erfindung

benötigt, wie bei irgendeiner anderen Feingussoperation.

[0061] Bei der Umsetzung der vorliegenden Erfindung besteht keine Anforderung zur Verarbeitung von Rohkörpern, aber es kann wünschenswert sein, Material hinzuzufügen, um Oberflächendefekte zu füllen oder in einigen Fällen die Wanddicke zu erhöhen. Wenn derartige Techniken verwendet werden, ist es akzeptabel und sogar wünschenswert, dass ein gewisser Teil von Überschussmaterial hinzugefügt wird, so dass die Prozedur innerhalb von vernünftigen Grenzen relativ unanspruchsvoll und leicht ist.

[0062] Das Brennen der Rohkörper ist der letzte kontrollierbare und am wenigsten vorhersagbare Schritt bei der Bildung der Feingussformen, und der die Qualität des Gussteils, welches hergestellt werden soll, am meisten bestimmende Schritt. Die vorliegende Erfindung arbeitet nicht, um die Prozeduren kontrollierbarer oder vorhersagbarer zu machen; in der vorliegenden Erfindung werden die Qualität der Gestalt, die Dimensionen und die Oberflächenendbearbeitung der Gießformelemente und die sich ergebenden Formen, Dimensionen und die Oberflächenendbearbeitung des Gussteils, welches in der Gießform hergestellt werden soll, nicht durch den Brennschritt oder durch den Zustand der Gießformelemente wie gebrannt gesteuert. Ein Brennen ist demzufolge ein Aspekt mit weitaus geringeren Anforderungen bei der Praxis des Feingusses in der vorliegenden Erfindung. Da die Form und Dimension der gebrannten Gießform bei der vorliegenden Erfindung be- bzw. verarbeitet werden sollen, ist es ausreichend, in dem gebrannten Körper vor der Verarbeitung eine nahezu Netto-Form zu erreichen.

[0063] Die Brennoperation selbst wird durch die Sinteranforderungen der Keramik und die Ausbrennanforderungen des Rohkörper-Bindemittels diktiert werden. Erwärmungspläne, die Haltezeit auf der Temperatur und Abkühlplanungen sind in dem Stand der Technik bekannt und werden in der vorliegenden Erfindung nicht verändert.

[0064] Es sei darauf hingewiesen, dass die vorliegende Erfindung die Anforderungen eines guten Designs und der Herstellungspraxis bei der Entwicklung von Rohkörpern nicht beseitigt. Auf ein Brennen hin wird das Keramikmaterial noch die gewöhnlichen Schrumpfbeträge durchlaufen und Vorsicht muss walten gelassen werden, um ein Absacken und Brechen der Form während des Brennvorgangs zu vermeiden. Es wird für Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet auch offensichtlich sein, dass das Ausmaß der Verarbeitung der gebrannten Gießformelemente im großen Maßstab durch die Qualität des gebrannten Körpers diktiert werden wird, die wiederum durch die Qualität des Rohkörper diktiert wird. Der Rohkörper sollte demzufolge nahe zu der benötigten Form und den benötigten Dimensionen sein, die entwickelt werden, um eine gebrannte Keramik mit guter Qualität und in der Nähe der erforderlichen Netto-Form und den erforderlichen Netto-Abmessun-

gen zu erzeugen, die zum Erzeugen des bestimmten Gussteils erforderlich sind. In sämtlichen Umständen in der vorliegenden Erfindung wird stark bevorzugt, dass die Rohkörper auf eine derartige "nahezu-Netto"-Form erzeugt werden, wobei mit jeder Veränderung von dem Ziel, eine Netto-Form, die bei dem Gießvorgang benötigt wird, einen übergroßen Rohkörper favorisiert. Es wird stark bevorzugt, dass der Rohkörper nicht unter der Größe ist.

[0065] Quantitativ sollte der Rohkörper entwickelt werden, um eine gebrannte Form zu erzeugen, die auf Spezifikationen ist, plus 1 mm, minus null, vorzugsweise plus 0,1 mm, minus null. Wie Durchschnittsfachleute leicht verstehen werden, kann die Entwicklung von Rohkörpern auf diese erforderlichen Präzisions- und Genauigkeitsgrade gewöhnlicherweise mit geringen Schwierigkeiten und einer begrenzten Anzahl von Iterationen erreicht werden. Je enger der gebrannte Körper auf Spezifikationen entwickelt werden kann, ohne unter die Konstruktionswerte zu gehen, desto schneller und kostengünstiger kann die abschließende Form hergestellt werden, wenn die Gießform verarbeitet wird.

[0066] Die strukturellen und physikalischen Eigenschaften der Rohkörper und der gebrannten Keramikkörper werden in der vorliegenden Erfindung nicht verändert und Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet werden vollständig verstehen, dass diese Formen mit der gleichen Vorsicht behandelt werden müssen. Die gebrannten Körper sind insbesondere harte, brüchige und relativ zerbrechliche Materialien.

[0067] Anstelle einen Rohkörper auf eine "nahezu Netto-Form" zu bilden, kann es relativ effektiv in vieler Hinsicht sein, wenn die Hülle oder der Kerneinsatz aus standardisierten "Blöcken" oder einem "Balken-Bestand" von vorgesintertem Keramikmaterial bearbeitet wird. Derartig vorgeformte und vorgebrannte "Bestands-Materialien" können mit überlegener Gleichförmigkeit und insbesondere mit einer gleichförmigen Porosität gebildet werden, um wiederum ein gleichförmiges und höchst vorhersagbares Schrumpfen bei der nachfolgenden Verarbeitung und Behandlung zu erlauben. Das "Bestands-Material" wird in die Netto-Form, die benötigt wird, durch die Ultraschallbearbeitungstechnik der vorliegenden Erfindung gebildet und die Oberflächen können nach der Bearbeitung beschichtet werden, um eine glatte Oberfläche für das Gießen bereitzustellen; die beschichtete Form kann erneut gebrannt werden, wenn dies erforderlich oder gewünscht ist, um die Beschichtung zu fixieren, und zwar in Abhängigkeit von der verwendeten Zusammensetzung. Die glatte Oberfläche der Keramik wird eine entsprechende glatte Oberfläche dem Metallgussteil, welches in der Gießform gebildet werden soll, herstellen. Es ist möglich, derartige Blöcke oder einen "Balken-Bestand" von vorgesinterten Keramikmaterialien mit sehr gleichförmigen und höchst vorhersagbaren Schrumpfeigenschaften herzustellen, wobei ein ge-

naueres Gießen erlaubt wird im Vergleich mit Kernen, die durch die Techniken gebildet werden, die in dem technischen Gebiet gewöhnlicherweise verwendet werden und deren Porositäts- und Schrumpfeigenschaften sich beträchtlich verändern können.

[0068] Durch die Verwendung von "Bestands-Material" ("Vorrats-Material") in der Technik wird die Notwendigkeit eines Spritzguss-, Eintauch-, Isostatikdruck- oder einer anderen Form eines Rohkörpers vermieden. Bestandsformen sind weitaus einfacher und wirtschaftlicher zu erzeugen und deren gleichförmige Form, deren Größe und deren Verarbeitungstechnik ist weitaus zuverlässiger als das Bilden, Brennen und Behandeln von Komplexen und oft komplizierten Rohkörpern. Weitaus weniger Abfall wird in einer derartigen Technik erfahren.

[0069] Durchschnittsfachleute können ausreichend die Netto-Form bestimmen, die von der gebrannten Gießform benötigt wird, um das benötigte Gussteil zu erzeugen, und zwar mit geeigneten Toleranzen für ein Schrumpfen, wenn das Metall abkühlt und es sich verfestigt. In der vorliegenden Erfindung wird ein Gießformkern oder eine Hülle hergestellt, die nahezu die erforderliche Netto-Form und die erforderlichen Netto-Dimensionen aufweist, diese aber nicht hat, und wird dann verarbeitet, um das Gießformelement auf die abschließend benötigte Form und Abmessung zu bearbeiten, mit einer höchst entwickelten Oberflächenendbearbeitung, mit hohen Präzisions- und Genauigkeitsgraden.

[0070] Bearbeitungstechniken zum Verarbeiten von Keramiken sind begrenzt und hier wurde eine Ultraschallbearbeitung entwickelt, um eine schnelle, höchst regelmäßige und reproduzierbare und kostengünstige Verarbeitung auf den benötigten Präzisions- und Genauigkeitsgrad in der Form, in den Dimensionen und in der Oberflächenendbearbeitung bereitzustellen. Die Ultraschalltechniken, die hier verwendet werden, können höchst automatisiert sein, wodurch die benötigten Arbeiten mit hohen Fertigkeiten beschränkt werden, und können bei Verarbeitungsraten ausgeführt werden, die gleich zu oder schneller wie die Herstellung der gebrannten Gießformkörper sind.

[0071] Die Bearbeitungstechniken können verwendet werden, um die gebrannten Gießformelemente zu verbessern, aber sie können auch verwendet werden, um Modifikationen in der Gießform herzustellen, um Merkmale zu gewährleisten, die bei den gewöhnlichen Bildungsvorgängen nicht einfach hergestellt werden können. Z.B. können kleine Löcher in die Gießformstruktur hinein und durch diese gebohrt werden, und zwar mit einer Positionsgenauigkeit, einer Regelmäßigkeit und mit Abmessungen, die in einem gewöhnlichen Gießformherstellungsvorgang nicht praktisch sind.

[0072] Feinguss-Gießformen sind oft komplexe Strukturen, die den Gussteilen entsprechen, die hergestellt werden sollen. Zusätzlich erfordern derartige Gießformen die normalen zusätzlichen Teile, die benötigt werden, um das Gussteil herzustellen, ein-

schließlich von z.B. Kanälen, Gatter, Gießtassen und dgl. In dem technischen Gebiet ist es gebräuchlich, derartige Strukturen zu der Wachsgießform hinzuzufügen, aus der die Gießformstruktur hergestellt wird. Derartige Prozeduren werden gewöhnlicherweise auch in der vorliegenden Erfindung bevorzugt werden, obwohl es erwähnenswert ist, dass Hinzufügungen auf dem Rohkörper vor dem Brennen an einer Stelle oder zu der gebrannten Gießform, entweder vor oder nach der Verarbeitung, die von der vorliegenden Erfindung in Erwägung gezogen wird, zementiert werden können.

[0073] Eine Ultraschallbearbeitung ist zunehmend wichtig in jüngster Zeit für eine Vielzahl von Anwendungen geworden. Sie ist verwendet worden, um unter anderen Materialien in einer Vielzahl von Aspekten Keramiken zu bearbeiten. Sie ist bei Feingussprozessen oder zum Verarbeiten von Feinguss-Gießformen und Gießformkomponenten noch nicht verwendet worden, weil das technische Gebiet sich auf andere Methodologien zum Herstellen von überlegenen Gießformen konzentriert hat. Wie voranstehend angegeben, ist es allgemein einfacher gewesen, die Wachsgießformen zu verändern, Keramikformulierungen anzupassen oder die Rohkörper zu frühen Stufen in dem Prozess zu verarbeiten, da diese Materialien weitaus einfacher zu verarbeiten sind.

[0074] Weil eine Verarbeitung von Keramikkörpern, beispielsweise gebrannten Keramikgießformen und insbesondere von Kernen als schwieriger, mit höheren Anforderungen und langsam und zu einem Bruch der Gießformstrukturen mit hervortretenden Verlusten der Produktivität neigend angesehen worden ist, ist einer Verarbeitung von derartigen gebrannten Keramiken wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden.

[0075] Hier wurde erfolgreich eine schnelle und effektive Ultraschallbearbeitung von gebrannten Keramikfeinguss-Gießformen und Gießformkomponenten, sowohl bei der Verwendung von "Punkt"-Werkzeugen mit einer begrenzten Größe und Form, als auch bei der Entwicklung und Verwendung von produktiven und effektiven "Form"-Werkzeugen, die zur Verarbeitung von Oberflächen mit einer beträchtlichen Fläche auf eine spezifiziertere entworfene Form mit genauen und präzisen Abmessungen ausgelegt sind, erreicht.

[0076] Eine Ultraschallbearbeitung wird in vernünftiger Weise in dem technischen Gebiet zum Verarbeiten einer Vielzahl von Materialien, einschließlich von Keramikmaterialien, entwickelt. In derartigen Techniken wird ein Werkzeug oder eine Sonotrode entwickelt, die die gewünschte Anpassung aufweist, und wird auf einem Wandler angebracht, der zum Vibrieren bei Ultraschallfrequenzen veranlasst wird, beispielsweise durch piezoelektrische Effekte und dgl. Das Werkzeug oder die Sonotrode wird auf die Oberfläche eines Werkstücks hin vorgerückt, wobei ein Abriebmedium zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und der Werkstückoberfläche angeordnet ist. Die Vibrationen werden durch das Abriebmittel über-

tragen, um eine Verarbeitung der Werkstückoberfläche zu bewirken. Eine Anregung der Abriebmittel-Partikel reibt die Werkstückoberfläche ab, wobei eine genaue umgekehrte Form der Werkzeug- oder Sonotrodenform zurückgelassen wird.

[0077] Wegen der Beschränkungen von Ultraschallwandlern ist die Verarbeitungsoberfläche des Werkzeugs oder der Sonotrode allgemein auf nicht mehr als ungefähr 100 cm² begrenzt, so dass dann, wenn größere Flächen verarbeitet werden sollen, der Teil oder der Wandler an unterschiedliche Stellen bewegt und erneut verarbeitet werden muss, oft mit einem anderen Werkzeug oder einer anderen Sonotrode, die eine andere Form aufweist, die für die bestimmte zu bearbeitende Fläche geeignet ist. Niedrigere Frequenzen, in dem akustischen Bereich, können nach Wunsch verwendet werden und sind innerhalb des Umfangs des hier verwendeten Ausdrucks "Ultraschallbearbeitung", so wie er hier verwendet wird.

[0078] Für den Fall von kleineren Gießformkomponenten, die von einem Ultraschallwerkzeug oder einer Ultraschallsonotrode mit einer akzeptablen Fläche überspannt werden können, wird hier bevorzugt das Werkzeug oder die Sonotrode in das Spiegelbild der benötigten Oberfläche zu bilden und die Gießformkomponente, beispielsweise einen Kerneinsatz, in einem einzelnen Betriebsvorgang zu verarbeiten.

[0079] Mit den Ultraschallwerkzeugen der vorliegenden Erfindung können die gebrannte Gießform oder Gießformkomponenten bearbeitet, geschnitten oder gebohrt werden, je nach Bedarf. Während derartige Bearbeitungsvorgänge für Gießformherstellungsvorgänge nicht gebräuchlich sind, erlaubt die Einführung der vorliegenden Erfindung die Entwicklung von Strukturen, die bei Gießoperationen bislang nicht praktisch oder öfter auf die Entwicklung von groben Strukturen beschränkt waren, die eine erneute Verarbeitung des gebildeten Gussteils in der Gießform, nachdem es gebildet ist, erfordern.

[0080] Zusätzlich wird die vorliegende Erfindung verwendet werden, um die Oberflächen der gebrannten Gießform oder der Gießformkomponenten auf eine Netto-Größe und -Form aus nahezu-Netto-Zuständen, die bei der ursprünglichen Bildung des Keramikkörpers erreicht werden, zu schleifen. Die Ultraschallbearbeitungstechniken können die gebrannte Keramik auf dimensionsgrößige Toleranzen im Wesentlichen so eng wie erforderlich, typischerweise bis -0, +0,1 mm, gewöhnlicherweise in der Größenordnung von -0, +0,05 mm oder weniger, und wenn benötigt, auf -0, +0,02 mm schleifen. Bei diesen Werten sind die Dimensionen typischerweise so fein wie die Korngrößen der gesinterten Keramik, was allgemein der begrenzende Parameter der Genauigkeit und der Präzision bei derartigen Schleifvorgängen ist.

[0081] In ähnlicher Weise kann die Oberflächenrauigkeit leicht durch ein Ultraschallpolieren der Oberflächen des geschliffenen Keramikkörpers herunter auf die Begrenzungen der Korngröße und der Porosität der gesinterten Keramik verringert werden. Weitere

Verringerungen der Rauigkeit können verwendet werden, indem Bearbeitungsbedingungen verwendet werden, die die einzelnen Körner an der Oberfläche bearbeiten werden. Für ausreichend dichte Keramiken kann eine glasglatte Oberfläche mit einer Oberflächenrauigkeit so gering wie 0,01 mm RMS erreicht werden, wird aber oft nicht vorgegeben oder benötigt.

[0082] Die Qualität des ursprünglichen Gussteils des keramischen Rohkörpers, und insbesondere die Dichte des keramischen Gussteils an der Netto-Oberfläche, ist ebenfalls ein begrenzender Faktor, da die Oberflächenrauigkeit einer höchst porösen Keramik niemals kleiner als die Porosität des Materials sein kann. Es wird immer eine Begrenzung hinsichtlich des Ausmaßes einer Oberflächenverarbeitung, die gefordert werden wird, vorhanden sein, und zwar definiert durch die Anforderungen des zu bildenden Gussteils, und Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet werden wenig Schwierigkeiten haben, die Verbesserungen in der Oberflächenendverarbeitung gegenüber der hinzugefügten Verarbeitungszeit und den damit verbundenen Kosten im Gleichgewicht zu halten. Wenn ein Polieren der Oberflächen der Keramik geeignet ist, ist es besonders zweckdienlich, die Techniken zu verwenden, die in unserem früheren Patent U.S. 5.187.899 offenbart und beansprucht sind. Wie voranstehend angegeben, ist es auch möglich, eine geeignete Beschichtung auf die bearbeitete Keramikoberfläche anzuwenden, um die Löcher und Poren zwischen den gesinterten Partikeln zu füllen.

[0083] Eine Vielzahl von Ultraschallgeneratoren, die die Wandler ansteuern, die in der vorliegenden Erfindung verwendet werden, sind bekannt und verfügbar.

[0084] Um die Produktivität zu maximieren und die Möglichkeit von Fehlern zu minimieren, wird bevorzugt, Generatoren zu verwenden, die bei einer Resonanzfrequenz der Wandler-Werkstück-Kombination arbeiten. Automatische Resonanzfolgegeneratoren des Typs, die in der U.S. 4.748.365 offenbart und beansprucht werden, werden bevorzugt.

[0085] Eine Vielzahl von Wandlerkomponenten sind kommerziell erhältlich und viele können in der vorliegenden Erfindung verwendet werden, die die elektrischen Signale, die in dem Generator erzeugt werden, in eine mechanische Vibration bei der geeigneten angelegten Frequenz umwandeln werden, typischerweise durch einen piezoelektrischen Effekt, gekoppelt mit einem Booster, der zum Verstärken (oder manchmal zum Unterdrücken) der Amplitude der Vibrationen dient.

[0086] Die Werkzeuge oder Sonotroden wenden die Vibration des Wandlers auf das Abriebmittel an, um den Bearbeitungsbetrieb zu bewirken. Die Sonotrode ist typischerweise ein Metallstab oder ein Balken aus einem geeigneten Metall, der eine Resonanzlänge aufweist, die für die Frequenz der zu erzeugenden Vibrationen geeignet ist, und für Metalle wie beispielsweise Stahl, Aluminium oder Titan sind typische Resonanzlängen von ungefähr 100 bis ungefähr 150

mm, und am häufigsten ungefähr 115 bis ungefähr 140 mm.

[0087] Die Bearbeitungsoberflächen des Ultraschallbearbeitungswerkzeugs oder der Sonotrode können über breite Grenzen verändert werden, und zwar von relativ kleinen "Punktbearbeitungs"-Werkzeugen mit einer Verarbeitungsfläche von weniger als ungefähr 1 mm² bis zu einem gegenwärtigen Maximum von ungefähr 100 cm². Kleine Punktbearbeitungswerkzeuge sind besonders geeignet für Prototyparbeiten und können für die abschließende Endbearbeitung und Detaillierungsbetriebe bei der Herstellung nützlich sein, während Formwerkzeuge mit größerer Fläche geeignet zur Herstellung einer Werkzeugverarbeitung sind.

[0088] Die kleinen "Punktbearbeitungs"-Werkzeuge können in einer Vielzahl von kleinen Formen ausgebildet werden, einschließlich von kugelförmigen, quadratischen, kreisförmigen oder konischen Querschnitten, mit abgeschnittenen konischen Abschnitten und dgl., um eine zweckdienliche Mischung bereitzustellen, um für die besonderen Bearbeitungsanforderungen von besonderen Betriebsvorgängen geeignet zu sein.

[0089] Bearbeitungswerkzeuge mit einer größeren Form werden typischerweise geformt, um direkt die erforderliche Form herzustellen, einschließlich einer dreidimensionalen Form, einer Detaillierung und von Dimensionen, die von der gebrannten Keramik benötigt werden. Die Form des Werkzeugs oder der Sonotrode wird ein Spiegelbild der Keramikform sein, die bearbeitet werden soll, mit geeigneten Toleranzen für den Spalt zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und der gebrannten Keramik.

[0090] Wenn Keramikgießformen über größere Oberflächen als die maximal mögliche Werkzeuggröße bearbeitet werden sollen oder wenn gegenüberliegende Stirnflächen der Keramik verarbeitet werden sollen oder andere Formbeschränkungen vorhanden sind, werden mehrere Form- und/oder Punktwerkzeuge verwendet, die sequenziell und kollektiv bei der Bearbeitung der Keramik auf die benötigte Form verwendet werden.

[0091] Werkzeuge mit mehreren Formen sind in einer stilisierten Weise in **Fig. 2** dargestellt, wobei ein Werkstück (**50**) in einem Halter (**60**) gehalten wird. Ein Paar von Ultraschallbearbeitungswerkzeugen (**70, 80**) sind in einer aufeinander zugerichteten Anordnung an dem Halter (**60**) und dem Werkstück (**50**) gezeigt. Die Stirnfläche G des Werkzeugs ist ein negatives Bild der gewünschten Konfiguration eines entsprechenden Abschnitts der Werkstückoberfläche. In **Fig. 2** ist das Werkstück in der Gestalt einer höchst stilisierten und vereinfachten Form eines Kerneinsatzes zum Gießen eines Turbinenmaschinenflügels. Im Betrieb wird das Werkstück (**50**) in dem Halter (**60**) montiert, der wiederum auf einer geeigneten Halterung, die nicht gezeigt ist, montiert wird. Eines der Ultraschallbearbeitungswerkzeuge ist auf einer Sonotrode angebracht, die auf einer Ramme ge-

führt wird; um das Werkzeug in eine Arbeitsposition in Bezug auf das Werkstück, welches ebenfalls nicht gezeigt ist, vorzurücken. Das Werkzeug wird vorge-rückt, um einen Abschnitt der Oberfläche der Werkstückoberfläche in einer Anlage und Ausrichtung zu bearbeiten. Sobald die Bearbeitung mit dem ersten Werkzeug abgeschlossen ist, wird das Werkzeug entfernt und durch das zweite Werkzeug ersetzt und das zweite Werkzeug wird dann in eine Verarbeitungsposition in einer Anlage und Ausrichtung zu dem entsprechenden und zusammenpassenden Oberflächenabschnitt des Werkstücks vorgerückt und führt die erforderliche Bearbeitung auf diesem Abschnitt der Werkstückoberfläche aus.

[0092] Wie durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet erkennen werden, ist es möglich, einige Formen mit einem einzelnen Formwerkzeug entsprechend zu der gesamten zu bearbeitenden Oberfläche zu bearbeiten, während andere Formen mehr als die zwei in **Fig. 2** gezeigten erfordern können. Die Anzahl von Werkzeugen, die für ein bestimmtes Werkstück benötigt werden, wird durch die Größe und die Form des Werkstücks bestimmt werden. Als allgemeine Regel wird bevorzugt, die minimale Anzahl von Werkzeugen zu verwenden, die ausreicht, um die Bearbeitungsoperation auszuführen, und zwar wegen der Wirtschaftlichkeit und Produktivität.

[0093] Wie Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet ebenfalls erkennen werden, können eine Anzahl von existierenden Maschinen angepasst werden, um die Funktionen zum Haltern, Ausrichten, Anlegen und Vorrücken des Halters und seines Werkstücks und der Werkzeuge auszuführen. Ein derartiges Gerät bildet keinen Teil der vorliegenden Erfindung.

[0094] Irgendwelche der vielen Werkzeugmaterialien, die gewöhnlicherweise beim Bilden von Ultraschallbearbeitungswerkzeugen verwendet werden, können in geeigneter Weise in der vorliegenden Erfindung verwendet werden. Am gebräuchlichsten in dem technischen Gebiet ist die Verwendung eines Hochgeschwindigkeits-Werkzeugstahls, obwohl in vielen Fällen ein Stahl, der gegenüber einem Abrieb resistenter ist, und nicht-metallische Legierungen verwendet werden. Die Auswahl der geeigneten Werkzeug- oder Sonotrodenmaterialien ist nicht ein kritisches Merkmal der vorliegenden Erfindung.

[0095] In vielen Fällen wird bevorzugt, das Verarbeitungswerkzeug oder die Sonotrodenoberfläche in das Ultraschallfeld hinein zu bearbeiten, wobei die erforderliche Form direkt in dem Sonotrodenmaterial gebildet wird.

[0096] Wenn eine Oberflächenpolitur verwendet wird, in Übereinstimmung mit unserem früheren Patent 5.187.899, wird normalerweise ein Werkzeug oder eine Sonotrode verwendet, die einfacher in dem Betrieb als der zu polierende Keramikteil verarbeitet wird. Graphitwerkzeuge werden allgemein bei derartigen Operationen bevorzugt.

[0097] Wie angegeben, kann das Werkzeug oder

die Sonotrode direkt in dem Ultraschallfeld gebildet werden oder kann getrennt gebildet und an der Verarbeitungsoberfläche der Sonotrode durch Löten oder dgl. angebracht werden. In jedem Fall kann die erforderliche Gestalt und Form des Werkzeugs durch irgendeine geeignete Bearbeitungstechnik hergestellt werden. Allgemein wird bevorzugt ein orbitales Schleifen, EDM, oder eine Kombination von beidem für die schnelle Herstellung der benötigten Form mit sehr hohen Graden der Präzision und Reproduzierbarkeit, die bereitgestellt wird, zu verwenden. Derartige Techniken ermöglichen auch die Reparatur des Werkzeugs oder der Sonotrode, wenn sie während Ultraschallbearbeitungsoperationen abgenutzt wird.

[0098] Formwerkzeuge können mit irgendeiner gewünschten Gestalt und mit einer feinen Detaillierung wie gewünscht versehen werden, vorausgesetzt, dass die folgenden Randbedingungen beachtet werden:

Die Gestalt muss konsistent mit einem axialen Vorrücken des Wandlers und der Werkzeugs oder der Sonotrode in einem Eingriff mit der zu verarbeitenden Keramikstruktur sein. Das Werkzeug oder die Elektrode können keine Unterätzungen bilden und getrennte Bearbeitungsoperationen, mit einer anderen Orientierung des Wandlers und einem anderen Werkzeug oder einer anderen Sonotrode werden allgemein benötigt, um Unterätzungsformen zu erzeugen. Wegen der hinzugefügten Komplexität des beteiligten Bearbeitungsbetriebs sollten derartige Konstruktionsmerkmale wann immer möglich vermieden werden, obwohl zusätzliche Operationen die meisten Gestaltsanforderungen erfüllen können, wenn dies gewünscht ist.

[0099] Wenn diese Wandformen in der Keramik gebildet werden sollen, beispielsweise Finnen, Stifte, Pfosten und dgl., werden die Minimumdimensionen, die toleriert werden können, vorwiegend durch die Charakteristiken des Keramikmaterials vorgegeben. Da die zu verarbeitende Keramik bereits gebrannt ist, wird sie eine weitaus größere Festigkeit und Haltbarkeit in vielerlei Hinsicht als ein nicht gebrannter Rohkörper aufweisen, da aber die Dimensionen in dünnwandigen Strukturen mit feinen Details verringert sind, muss Vorsicht walten gelassen werden. Es kann wünschenswert sein, derartige Merkmale mit wenigstens irgendeiner Verjüngung, wenn möglich, zu konstruieren, um das Vorrücken und das Zurückziehen des Werkzeugs oder der Sonotrode und des Wandlers, ohne einen direkten Kontakt zu ermöglichen. Ein Keil bzw. eine Verjüngung so klein wie 1 Grad wird eine gewisse Hilfe sein, aber wann immer möglich wird ein Keil von 3 bis 5 Grad in einer typischeren Weise verwendet. Ein Keil ist nicht eine kritische Anforderung, da die Dimension des Schnitts den Spalt zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und dem Werkstück, wie voranstehend diskutiert, in der Größenordnung von wenigstens ungefähr zweimal des Durchmessers der Abriebpartikel in dem Spalt bereitstellen wird.

[0100] Es ist allgemein wünschenswert, dass Formwerkzeuge in der Größe beschränkt sind, wie voranstehend angegeben, und zwar auf nicht mehr als 100 cm². Es ist auch zweckdienlich, die maximalen Dimensionen des Werkzeugs oder der Sonotrode so zu beschränken, dass sie in einen Kreis mit einem Radius von ungefähr 15 cm² passen.

[0101] Während die Werkzeug- oder Sonotrodenoberflächen allgemein aus abnutzungsresistenten Materialien gebildet sind und für den Fall von Bearbeitungs-, Schneide- und Schleifoperationen das Material gegenüber dem Ultraschallbearbeitungseffekt des Betriebs resistenter ist als das keramische Werkstück, wird eine Abnutzung vorhanden sein und über der Zeit werden die von dem Werkzeug benötigten Toleranzen die Grenze der Akzeptierbarkeit erreichen. An diesem Punkt muss das Werkzeug oder die Sonotrode repariert werden, um die ursprüngliche Gestalt und die Dimensionen wiederherzustellen, oder muss durch ein anderes, neues Werkzeug ersetzt werden.

[0102] In den meisten Fällen wird das Werkzeug oder die Sonotrode die Toleranzen nicht verlieren, bis eine wesentliche Anzahl von Teilen innerhalb von akzeptablen Toleranzen hergestellt worden ist. Wenn die Grenze erreicht wird, wird allgemein bevorzugt, das Werkzeug durch eine EDM, Orbitalschleif- oder Ultraschall-Verarbeitung neu zu formen. Eine Kombination von diesen Techniken kann verwendet werden. Typischerweise kann jedes Werkzeug oder jede Sonotrode mehrmals repariert werden, bevor zu viel Material verloren geht, um eine weitere Reparatur und eine erneute Verwendung zuzulassen.

[0103] Wie voranstehend angegeben, wird die Abrieb-Verarbeitung, die bei Ultraschallbearbeitungs-, Schleif- und Polieroperationen benötigt wird, am häufigsten durch Abriebpartikel ausgeführt, die in einem flüssigen Träger verteilt sind, der durch das Ultraschallwerkzeug oder eine Sonotrode in Vibrationen versetzt wird. In dieser Weise ist es das Abriebmittel, welches tatsächlich die Verarbeitungskraft auf die Werkstückoberfläche überträgt, als ein Zwischenglied zwischen dem vibrierenden Werkzeug oder der vibrierenden Sonotrode und dem Werkstück. Das Werkzeug oder die Sonotrode wird somit niemals in einen direkten Kontakt mit der Werkstückoberfläche gebracht und ein Spalt wird zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und dem Werkstück aufrechterhalten. Es ist möglich, einen Bruch des Werkzeugs oder der Sonotrode durch einen Aufschlag auf dem Werkstück zu vermeiden und einen Fluss eines frischen nicht abgenutzten Abriebmittels in den Spalt hinein während des Betriebs sicherzustellen. Zusätzlich wird der Abfall, der während der Verarbeitung des Werkstücks erzeugt wird, von dem Schnittstellenspalt weggewaschen und baut sich nicht auf Pegel auf, die den Betrieb stören könnten.

[0104] Das Fluid bzw. die Flüssigkeit wird verwendet, um das Abriebmittel aufzulösen und dieses in den Spalt zwischen das Werkzeug und das Werk-

stück hinein- und davon herauszutransportieren, um Wärme von dem Spalt zu transportieren und den Abfall des Verarbeitungsbetriebs aus dem Spalt herauszuspülen.

[0105] Die Art des Fluids ist keine kritische Angelegenheit, solange es mit dem Werkzeug und der Keramik kompatibel ist und die angezeigten Funktionen ausführen kann. Irgendwelche der Fluids, die gewöhnlicherweise in dem technischen Gebiet verwendet werden, können in einer geeigneten Weise verwendet werden.

[0106] Eine breite Vielfalt von Abriebmitteln können in der vorliegenden Erfindung verwendet werden, einschließlich von all denjenigen, die typischerweise in Ultraschallbearbeitungsprozessen des Standes der Technik verwendet werden. Damit die Keramikmaterialien in der vorliegenden Erfindung verarbeitet werden können, wird bevorzugt Siliciumcarbid für Keramiken mit relativ geringer Dichte, wie Siliciumoxid- und Aluminiumoxid-gestützte Keramiken und Borcarbid zur Verarbeitung von Keramiken mit hoher Dichte, die aus Siliciumnitrid und Siliciumcarbid gebildet sind, zu verwenden.

[0107] Die Partikelgrößen des Abriebmittels sind vorzugsweise in der Größenordnung von ungefähr 25 bis 75 mm Durchmesser, obwohl, wenn gewünscht, ein breiterer Bereich verwendet werden kann, solange wie die Spaltabmessungen zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und dem Keramikwerkstück entsprechend eingestellt werden.

[0108] Die Frequenz der Ultraschallbearbeitungsvibrationen wird normalerweise in dem Bereich von ungefähr 200 bis ungefähr 30.000 Hz sein. In einigen Fällen können sich niedrigere oder höhere Frequenzen bei der Verarbeitung von bestimmten Keramiken oder bei der Verwendung bestimmter Werkzeug- oder Sonotrodenmaterialien oder beiden als effektiver erweisen. Die vorliegende Erfindung wurde mit einer Oszillationsfrequenz so gering wie ungefähr 50 Hz und so hoch wie 50.000 Hz praktiziert, die beide außerhalb des normalen Bereichs sind, mit dem Ausdruck "Ultraschall" verbunden wird, es sei aber darauf hingewiesen, dass der Ausdruck in dem breiteren Sinn zum Definieren von Frequenzen verwendet wird, die um den Ultraschallbereich herum zentriert sind und sich zwischen oberen und unteren hörbaren Grenzen erstreckt, von ungefähr 50 Hz bis ungefähr 50.000 Hz. Am häufigsten sind die gewünschten Frequenzen diejenigen, bei denen die Kombination des Wandlers, einschließlich irgendeines Booster-Elements, und des Werkzeugs oder der Sonotrode in Resonanz sind. Für die meisten Werkzeuge ist die Resonanzfrequenz in dem Bereich von ungefähr 15.000 bis ungefähr 25.000 Hz und vorzugsweise zwischen ungefähr 19.000 bis ungefähr 21.000.

[0109] Die Amplitude der Oszillationen während des Bearbeitungsbetriebs ist allgemein in der Größenordnung von ungefähr 1 bis ungefähr 1000 µm, am häufigsten zwischen 10 bis 250 µm, und bevorzugt ungefähr zwischen 25 bis ungefähr 50 µm.

[0110] Die optimale Frequenz und Amplitude wird sich mit der Zusammensetzung der Keramik, aus der die Gießform gebildet ist, verändern ist und wird leicht durch empirische Techniken bestimmt. Es wird jedoch festgestellt werden, dass der Grad einer Verbesserung in optimalen Bedingungen sich nicht stark von anderen Frequenzen und Amplituden verändert, und es gut möglich ist, bei einer festen Frequenz und einer festen Amplitude für alle Gießformmaterialien zu arbeiten, wenn gewünscht.

[0111] Die Bearbeitungsgeschwindigkeiten, die typischerweise bei der Verarbeitung der Keramikmaterialien in der vorliegenden Erfindung erreicht werden, stellen eine Materialentfernung bei einer Rate bereit, die typischerweise in der Größenordnung von 0,25 bis 100 mm³ pro Minute ist, wobei die Amplitude der Vibration, die Abriebmittel-Korngröße und die spezifischen Charakteristiken der Keramik verändert werden. Die Vorrückungsrate oder Eindringungsrate wird entsprechend in der Größenordnung von 0,25 mm bis ungefähr 2,5 mm pro Minute sein, und zwar in Abhängigkeit von der Härte und der Dichte der Keramik. Typische Oberflächenendbearbeitungen, wie hergestellt, werden in dem Bereich von ungefähr 0,2 bis ungefähr 1,5 µm RMS, mit typischerweise Genauigkeiten von -0, +0,1 mm, liegen und wenn erforderlich, können Toleranzen so gering wie 0, +2 µm erhalten werden.

[0112] Es wird gewöhnlicherweise bevorzugt, sicherzustellen, dass sämtliche Oberflächen der Gießform oder der Gießformkomponente, die in der vorliegenden Erfindung verarbeitet werden soll, auf der Stirnfläche gegenüberliegend zu der Oberfläche, die gerade verarbeitet wird, gut gehalten wird, um die Biegemomente zu minimieren, die angelegt werden und die dazu tendieren, das brüchige Keramikmaterial einzufangen. Befestigungsteile zum Ergreifen und Haltern der Oberflächen der Keramikkomponente sind ausreichend innerhalb der Fertigkeiten, die gewöhnlicherweise in dem technischen Gebiet vorhanden sind.

[0113] Ein angepasstes Paar von Halterungen, für die gegenüberliegenden Stirnflächen der Gießform oder der Gießformkomponente, werden gewöhnlicherweise eine vollständige Verarbeitung des Werkstücks in zwei sequenziellen Bearbeitungsvorgängen erlauben, während es in jedem Halterungsbefestigungsteil gehalten wird.

[0114] Die Effektivität des Verarbeitungsvorgangs wird oft dadurch verbessert, dass zu den Oszillationen eine periodische, vorzugsweise intermittierende Hin- und Herbewegung mit relativ großer Amplitude des Werkzeugs oder der Sonotrode relativ zu der Oberfläche des Keramikkörpers hinzugefügt wird. Eine derartige Hin- und Herbewegung dient zum "Pumpen" des Fluids und des Abriebmediums in dem Spalt zwischen dem Werkzeug oder der Sonotrode und der Keramikoberfläche, um eine frische Zuführung von Abriebmittel und eine hohe Homogenität des Schneidemediums sicherzustellen. Die Orientie-

rung der Abriebpartikel in dem Spalt wird während jedes Impulses durch eine Schwenkaktion während derartigen Hin- und Herbewegungen verändert, wodurch sichergestellt wird, dass frische Schneidekanten und Punkte an der Keramikoberfläche während der Dauer des Betriebs dargeboten werden. Eine Hin- und Herbewegung von ungefähr 0,1 bis 2,5 mm, bei einer Frequenz von ungefähr 0,1 bis 5 Hz, für eine Dauer von 1 bis 2 Zyklen, wird für derartige Zwecke effektiv sein.

[0115] Während Schneide- und Schleifoperationen mit einer hohen Rate kann es auch effektiv sein, auf das Werkzeug oder die Sonotrode eine orbitale Bewegung aufzuprägen, die auf die Ultraschallvibrationen des Werkzeugs überlagert werden. Eine derartige orbitale Bewegung kann den Schneidvorgang auf der Keramikoberfläche durch Kombinieren von Merkmalen eines orbitalen Schleifvorgangs mit den Effekten einer Ultraschallbearbeitung beschleunigen. Die orbitale Bewegung dient dazu, die Homogenität des Schneidemediums in dem Spalt zwischen dem Werkzeug und der Keramikoberfläche sicherzustellen und eine Verarbeitungskomponente mit ihrem eigenen "Läppungs"-Typ eines Vorgangs zu versehen. [0116] Wenn ein orbitales Schleifen in Kombination mit dem Ultraschallbearbeitungsbetrieb verwendet wird, werden kleine Orbits in der Größenordnung von ungefähr 0,1 bis 2 Millimeter allgemein am effektivsten sein, bei einer Orbitalfrequenz von ungefähr 1 bis 60 Hz.

[0117] Wenn Formwerkzeuge verwendet werden, wird bevorzugt, einen Einzelachsenbetrieb zu verwenden, bei dem das Werkzeug und das Keramikwerkstück in einer aufeinander zugerichteten Orientierung angebracht werden und eines in einen Eingriff mit dem anderen vorgerückt und dann zurückgezogen wird, wenn der Bearbeitungsbetrieb abgeschlossen ist. Eine Genauigkeit und Reproduzierbarkeit hängen von der Ausrichtung und der Anlage des Werkzeugs und des keramischen Werkstücks ab.

[0118] Typischerweise wird es zweckdienlich sein, den Wandler und das Werkzeug oder die Sonotrode auf einer hydraulisch, elektrisch oder pneumatisch bewegten Ramme (einem Schlitten) anzuordnen, vorzugsweise in einem Werkzeugwechslermechanismus des allgemeinen Typs, der gewöhnlicherweise in dem technischen Gebiet der Bearbeitungswerkzeuge verwendet wird, um schnelle Werkzeugänderungen zu erleichtern, wenn dies benötigt wird, und um eine genaue und reproduzierbare Ausrichtung des Werkzeugs sicherzustellen. Das Keramikwerkstück wird typischerweise in einem Befestigungsteil angebracht, welches das Werkstück an dem Werkzeug positioniert, zu diesem ausrichtet und mit diesem in Anlage bringt. Das Abriebmittel, welches in seinem flüssigen Träger aufgelöst ist, kann in den Spalt von ein oder mehreren Punkten, die an der Kante des Spalts angeordnet sind, oder durch Kanäle, die durch die Sonotrode oder das Werkstück vorgesehen sind, eingeleitet werden. Die Suspension wird typischerweise

eingefangen und recycelt, vorzugsweise mit einer Kühlwirkung.

[0119] Sobald das Werkzeug und das Teil richtig angebracht sind, wird die Ramme vorgerückt, um den richtigen Spalt einzurichten und der Generator wird betätigt, um den Bearbeitungsbetrieb zu beginnen. Die Ramme wird dann bei einer Rate konsistent mit der Rate einer Materialentfernung von der Keramik vorgerückt, bis die gewünschte Grenze erreicht wird. Es ist oft wünschenswert, periodisch den Betrieb zu unterbrechen, das Werkzeug zurückzuziehen und dann dieses wieder in einen Betriebseingriff vorzurücken. Die Überlagerung einer derartigen periodischen axialen Oszillation dient dazu, den sich angesammelten Abfall und das abgenutzte Abriebsmittel aus dem Spalt herauszudrängen, und wird durch die Spülwirkung des auferlegten Flusses der Abriebsuspension unterstützt. Der Vorgang sieht auch eine Verbesserung des Kühleffekts des Flüssigkeitsflusses in dem Spalt vor. Beide Effekte unterstützen die Genauigkeit des Bearbeitungsbetriebs. Die Amplitude ist nicht kritisch und kann im Bereich von 0,1 mm bis 2,5 mm liegen und kann bei einer Impulsrate von ungefähr einmal in fünf Minuten bis so oft wie 5 Hz auftreten., Typischerweise wird ein Impuls zu jeweils 10-30 Sekunden zweckdienlich sein.

[0120] Wenn die Größe des Keramikwerkstücks oder die Konfiguration der Werkzeuganordnung erfordert, wird der Bearbeitungsbetrieb oft die Verwendung von zwei oder mehreren Werkzeugen erfordern. Oft wird sich die Achse der relativen Bewegungen, die benötigt werden, unterscheiden. Derartige Merkmale können in getrennten Operationen in einer seriellen Weise auf getrennten Geräten bereitgestellt werden, oder eine einzelne Maschine kann mit mehreren Rammen versehen werden, bei unterschiedlichen Ausrichtungen zu der Keramik oder in einer typischeren Weise kann die Befestigung dafür ausgelegt werden, um abweichende Ausrichtungen bereitzustellen, entweder durch Umorientierung einer einzelnen Befestigung oder durch Bereitstellung einer Vielzahl von Befestigungen. Wenn gegenüberliegende Seiten jedes Keramikwerkstücks bearbeitet werden sollen, wird es allgemein erforderlich sein, wenigstens zwei Befestigungsteile zu verwenden.

[0121] Die Toleranzen des Bearbeitungsbetriebs werden zweckdienlicherweise durch herkömmliche Mess- und Maßstechniken überwacht. Da die Keramik normalerweise nicht-leitend ist, werden Messungen des Kontakttyps allgemein bevorzugt. Es kann zweckdienlich sein, das Werkstück indirekt maßgenau abzustimmen, indem das Werkzeug über Kontakt- oder Nicht-Kontakttechniken vermessen wird, um eine Abnutzung zu überwachen, mit periodischen Messungen von sämtlichen oder einer geeigneten Probe von bearbeiteten Werkstücken, nachdem die Bearbeitung abgeschlossen ist. Da die Schneidecharakteristiken für einen gegebenen Betrieb sehr genau vorhersagbar sind, und da der Eingriff bzw. die Anlage des Werkzeugs in Bezug auf die Befestigung glei-

chermaßen genau gesteuert und reproduziert werden kann, kann es nicht erforderlich sein, das Teil selbst während des Bearbeitungsbetriebs zu messen.

[0122] Derartige Operationen haben sich als relativ zuverlässig, schnell und effektiv bei der Herstellung von Keramikteilen bei reproduzierbaren Toleranzen so gering wie -0 bis $+2 \mu\text{m}$ (in einer typischeren Weise ungefähr 0,1 bis 0,02 nun) bei Pegeln, die 90% übersteigen, oft 95-98% von sämtlichen verarbeiteten Teilen übersteigend, erwiesen. Herstellungs- bzw. Produktionsverluste werden gewöhnlicherweise Brüche der Keramik während der Ultraschallbearbeitung darstellen und werden am häufigsten Rissen in der gebrannten Keramikstruktur zurechenbar sein. Herstellungs- bzw. Produktionsverluste werden durch die Größe und Konfiguration des Keramikteils, die Anzahl von Werkzeugen, die für den Bearbeitungsbetrieb geeignet sind, und der Qualität der nahezu auf eine Nettoform ausgebildeten Keramikrohstücke diktiert. Zu einem geringen Ausmaß wird die Rate auch von der Härte der Keramik und von Toleranzen, die von dem abschließenden Teil benötigt werden, abhängig sein. Um beispielhaft darzustellen, was möglich ist, wurden Feingießkerne für das Gießen von Turbinenflügeln bearbeitet, was nachstehend ausführlich beschrieben wird, und zwar auf eine Toleranz von -0 , $+0,5$ mm bei einer Rate von 0,6 Minuten (**40** Sekunden) pro Teil auf einer numerisch gesteuerten Version der Werkzeugbearbeitungsvorrichtung der bevorzugten Ausbildung, die voranstehend beschrieben wurde.

[0123] Die Ergebnisse sind stark über die Fähigkeiten des herkömmlichen Feingusses. Wenn geringere Toleranzen benötigt werden, können sogar höhere Herstellungsraten erzielt werden.

[0124] Es ist möglich, das System auf die Bearbeitung einer Vielzahl von Keramikwerkstücken gleichzeitig durch Anbringen von mehreren Werkzeugen auf ein oder mehreren Rammen und durch Bereitstellen von mehreren zusammenpassenden Befestigungsteilen, um eine entsprechende Anzahl von Keramikrohstücken anzubringen, anzupassen. Durch eine derartige Verarbeitung kann eine sehr hohe Produktion mit keiner Verringerung in den Toleranzen erreicht werden.

[0125] Wenn hohe Herstellungsraten nicht ein Hauptaspekt sind, wie während der Prototyp- und Konstruktionsentwicklung von Gussteilen, für begrenzte Herstellungsläufe, oder andere spezialisierte Anwendungen, können die Zeit und Ausgaben einer Formwerkzeugentwicklung nicht kosteneffektiv sein. In derartigen Fällen wird bevorzugt, ein oder mehrere Punktwerkzeuge zu verwenden, wie voranstehend beschrieben, die auf einem numerisch gesteuerten Mehrachsen-Werkzeugträger angebracht sind, der das Werkzeug in eine Anlage mit einem befestigten Keramikwerkstück orientieren und bewegen kann. Eine Vielfalt von Mehrachsen-Bearbeitungswerkzeugen können auf die Anforderungen angepasst werden und Toleranzen erreichen, die für die vorliegende

Eifindung geeignet sind. Bearbeitungswerkzeuge, die für traditionelle Bearbeitungsoperationen angepasst sind, beispielsweise Mahl-Schneidevorrichtungen und dgl., können leicht die Ultraschallvibrationen aushalten, die bei der vorliegenden Erfindung auftreten, da sie eine wesentlich geringere Amplitude und Größe als die Vibrationen aufweisen, die typischerweise von derartigen Maschinen angetroffen werden. Resonanzvibrationen innerhalb des Mehrachsensystems können leicht gedämpft werden, wenn erforderlich.

[0126] Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet des Feingusses werden erkennen, dass sämtliche Präzision, die mit der Fabrikation von Gießformteilen und insbesondere Gießformkernen gewonnen wird, verschwendet wird, wenn die Teile nicht mit einer vergleichbaren Präzision während des Zusammenbaus und bei Formungsoperationen, in denen sie verwendet werden, ausgerichtet werden können.

[0127] Die Positionierung eines Kernelements in einer Wachsgießform ist ein Beispiel der akuten Probleme, die sich beim Gießen ergeben können. Trotz der Qualität der Wachsverarbeitungsform und des Kerneinsatzes wird irgendein Fehler bei der Positionierung des Kerns innerhalb der Wachsverarbeitungsform, wenn das Wachsmedium eingespritzt wird, eine verringerte Wanddicke, wo der Kern zu nahe der Gießformwand positioniert ist, und eine entsprechend erhöhte Wanddicke gegenüber einführen. Derartige Fehler werden oft durch einen Überentwurf von Komponenten aufgelöst, wobei zusätzliches Gewicht und Material zu gegossenen Teilen hinzugefügt wird.

[0128] Es ist möglich, Kernlokalisierungssafte zu verwenden, die integral bzw. einstückig in den Kernaufbau oder üblicherweise auf einem Kernhaltebefestigungsteil angebracht sind, welches innerhalb der Wachsverarbeitungsform entwickelt wird, zu verwenden. Derartige Stifte lassen ein Loch innerhalb des Wachsmusters, wenn von der Wachsverarbeitungsform getrennt, die durch gewöhnliche Wachsmuster-Endbearbeitungstechniken gefüllt werden können, oder die in einigen Fällen an der Stelle gelassen werden können, um mit der Keramikformulierung beim nachfolgenden Eintauchen gefüllt zu werden, um ein entsprechendes Loch durch das Gussteil herzustellen. Derartige Löcher werden oft gewünscht, z.B. um einen Kühlluftfluss von dem hohlen Kern an die Oberfläche für den Fall von Turbinenmaschinenflügeln bereitzustellen, obwohl eine Lokalisierung von Stiften eines Durchmessers, der für einen derartigen Luftflusstransport geeignet ist, ziemlich zerbrechlich sein kann.

[0129] Es ist innerhalb des Umfangs der vorliegenden Erfindung, derartige Techniken für eine Ausrichtung bereitzustellen, indem Datumspunkte mit hoher Genauigkeit bereitgestellt werden, um derartige Safte auf der Oberfläche eines Kerneinsatzes genau zu bilden und zu lokalisieren, wobei die Ausrichtung des

Kerns innerhalb der Wachsverarbeitungsform mit hoher Genauigkeit, herunter auf die Toleranzen des Bearbeitungsbetriebs, sichergestellt wird.

[0130] In Situationen, bei denen Operationen Keramikkerne auf akzeptable Toleranzen herstellen, aber Wachsverarbeitungsform-Aufbauoperationen nicht akzeptable Fehler einführen, kann es sich als höchst effektiv und produktiv erweisen, den Bearbeitungsbetrieb auf die voreingestellten Datumspunkte zu beschränken, ohne eine Ultraschallbearbeitung des gesamten Teils. Die Geräte-, Werkzeuganordnungs- und Befestigungsanforderungen von derartigen Operationen können relativ einfach sein, wodurch kosteneffektive Aufrüstungen in der Qualität einer Herstellung von existierenden Gussteilen erlaubt werden.

[0131] Die Größe, Anzahl, Orientierung und die Form von Datumspunkten werden durch die Konstruktion des Kerns und die zu verwendenden Lokalisierungssafte vorgegeben. Ein Punktwerkzeug oder ein Formwerkzeug, um die Datumspunktanpassung anzupassen, um mit den Enden der Stifte I zusammenzupassen und in diese einzugreifen, stellt keine großen Anforderungen. Eine Ultraschallbearbeitung, die auf die Bildung von derartigen Datumspunkten beschränkt ist, kann sehr schnell sein, sogar bei sehr engen Toleranzen.

[0132] Es sollte jedoch vorsichtig bemerkt werden, dass dann, wenn die Ultraschallbearbeitung auf Datumspunkte beschränkt ist, keine Korrektur einer Verwindung, Biegung oder Wölbung der Keramik während ihres Brennvorgangs, Verdichtungsvorgangs und Schrumpfvorgangs durchgeführt wird. Wenn das vollständig gebrannte Keramikteil außerhalb akzeptabler Toleranzen ist, sollte eine volle Formbearbeitung, wie voranstehend beschrieben, verwendet werden. Genauso kann die höchst genaue und präzise Anordnung von Datumspunkten die Beschränkungen einer schlechten Konstruktion oder von schlechten Herstellungstechniken nicht beseitigen.

[0133] Wie bei irgendwelchen anderen Techniken für die Entwicklung von Feingussformen müssen geeignete Spielräume bestimmt werden und für das Ausmaß eines Schrumpfens des Gussteils, wenn es abkühlt, gemacht werden. Während die Techniken, die verwendet werden sollen, die gleichen wie diejenigen sein werden, die in dem technischen Gebiet gebräuchlich sind, ist es erwähnenswert, dass eine Änderung der Gussformen zum Einstellen der Dimensionen auf höchst genaue Ergebnisse weitaus einfacher und schneller durch die spezifische Anwendung von diesen Techniken auf die Verarbeitungsprozeduren, die in der vorliegenden Erfindung verwendet werden, ist. In der Tat können sogar sehr geringfügige Einstellungen, die vorher dem Schleifen und Polieren des Gussteils überlassen wurden, leicht an den Gießformhüllen und Kernen bei der praktischen Umsetzung der vorliegenden Erfindung durchgeführt werden. Infolgedessen ist es möglich und praktisch, Gussteile mit einer nicht dagewesenen Präzision und Genauigkeit bei der vorliegenden Erfindung herzu-

stellen. Wegen der dimensionsmäßigen Erfolge erfordern die Gussteile, die in der vorliegenden Erfindung erzeugt werden, eine geringe oder keine Oberflächenverarbeitung, um die Dimensionen zu korrigieren, sogar für das Ausmaß, dass die Oberflächenendbearbeitung der Gießformen von weitaus größerer Wichtigkeit sind. Für viele Gussteile kann der Teil als Gussteil verwendet werden, mit keinem Schleifen der gegossenen Oberfläche, oder eine gute Oberflächenendbearbeitung wird oft benötigt, um den vollen Nutzen der Erfindung zu erreichen.

[0134] Wie voranstehend vollständig in der Offenbarung unseres früheren Patents US-A 5187899 aufgeführt, kann die Oberflächenendbearbeitung der Keramikteile auf im Wesentlichen irgendeinen Grad einer dimensionsmäßigen Genauigkeit und Präzision und auf irgendeinen Grad einer Oberflächenendbearbeitung, die in dem Gussteil benötigt wird, geformt, geschliffen und poliert werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das Polieren der Gießformoberflächen durch das Schrumpfen des Gussteils während des Abkühlens des Metalls, welches auf eine Festkörperphase geschmolzen wird, und während der Abkühlung des Festkörpers, da das Schrumpfen das Gussteil aus einem Kontakt mit der Oberfläche der Gießform herausziehen kann, bevor die Oberfläche vollständig verfestigt ist, und Erlauben der Änderung der Oberflächenendbearbeitung, die von der Gießformoberfläche ausgeübt wird, durch eine Synerese, beschränkt sein kann. Ein Polieren der Gießform über die Grenzen der Gießoperation hinaus, ist offensichtlich nicht erforderlich und verschwenderisch und sollte nicht verwendet werden. Die geeigneten Grenzen, die verwendet werden sollen, sind eine Funktion der Größe des Gussteils und der Schrumpfcharakteristiken, wenn sich die gegossene Flüssigkeit abkühlt und verfestigt. Eine Oberflächenendbearbeitung, wie gegossen, von besser als ungefähr 10 Mikroinch RMS wird allgemein durch Gießen von Metallen nicht erhalten.

[0135] Das Gießen von geschmolzenem Metall in die Gießformen, die durch die vorliegende Erfindung gebildet werden, werden durch die vorliegende Erfindung nicht verändert, und eine gute Gießformpraxis, die in dem technischen Gebiet gut verstanden wird, ist vollständig effektiv. Derartige Techniken, wie in zentrifugales Gießen, bei dem die Gießform und das geschmolzene Metall gedreht werden, um den Fluss der Schmelze in die Gießformhöhlräume zu fördern und andere vorteilhafte Effekte zu erzielen, können mit der vorliegenden Erfindung zu einem guten Effekt verwendet werden.

[0136] Es ist zunehmend gebräuchlich, Einsätze mit vorgeformten Strukturen, einem Metall mit hohem Schmelzpunkt und einer Keramikfaserverstärkung und dgl. in Feinguss-Gießteile hinein zu verwenden, bevor die Schmelze gegossen wird. Diese Praktiken sind mit der vorliegenden Erfindung vollständig kompatibel und werden in der Tat gewöhnlicherweise durch die verringerten Anforderungen zum Verarbei-

ten der Gussteiloberflächen erleichtert. Mit einer verringerten Verarbeitung der Gussteiloberflächen besteht eine geringere Tendenz, dass derartige Einschlüsse an der Gussteiloberfläche freigelegt werden, was gewöhnlicherweise eine wichtige Erwägung ist.

[0137] Wie bei den gewöhnlichen Techniken für einen Feinguss wird es gebräuchlich sein, die Gießform und deren Einsätze vor dem Gießen Temperaturen auszusetzen, die vergleichbar mit der Schmelztemperatur oder wenigstens oberhalb der Solidifizierungstemperatur der Schmelze sind, um eine frühzeitige Verfestigung des Metalls während des Gießens zu vermeiden. Nachdem der Guss abgeschlossen ist und die gegossene Schmelze entgast ist, wenn erforderlich, und all den Schritten, die notwendig sind, um sicherzustellen, dass der Gießformhohlraum vollständig mit der Metallschmelze gefüllt ist, wird das Abkühlen der Gießform und des Metalls begonnen.

[0138] Ein Abkühlplan wird durch die Charakteristiken des Metalls, aus dem das Gussteil gerade gebildet wird, vorgegeben werden. Diese Anforderungen werden durch die vorliegende Erfindung nicht geändert und sind Durchschnittsfachleuten in dem technischen Gebiet allgemein bekannt.

[0139] Sobald das Metall auf den erforderlichen Punkt verfestigt ist, wird die Gießform entfernt. Die Hülle wird am häufigsten durch eine mechanische Einrichtung, einschließlich eines Hammers und/oder eines Sandstrahlens, entfernt.

[0140] Interne Kerne können durch Hämmern oder durch Sandstrahlen in einigen Fällen entfernt werden. In anderen wird der Kern derartigen Techniken nicht zugänglich sein und wird eine chemische Substanz oder Auflösungseffekte erfordern, um eine richtige und ausreichende Entfernung zu erzielen. Diese sind Techniken, die allgemein gebräuchlich sind und die Durchschnittsfachleuten in dem technischen Gebiet altbekannt sind. Das Keramikmaterial muss unter denen gewählt werden, die für diese Zwecke entwickelt werden, da nicht alle Keramiken einem Lösungsmittel oder chemischen Entfernungstechniken zugänglich sind, wie Durchschnittsfachleute in dem technischen Gebiet gut wissen.

[0141] Bei den Metallgussteilen, die in der vorliegenden Erfindung hergestellt werden, wird festgestellt werden, dass sie konsistent Gussteile mit sehr hoher Qualität bereitstellen. Es wird trotzdem erforderlich sein, Angüsse und Eingusskanäle, die an dem Teil angebracht sind, zu entfernen. Ein gelegentliches Blitzen, was einen Sprung in der Gießform reflektiert, wird auftreten. Die gewöhnlichen Schneide-, Schleif- und Poliertechniken, die in dem technischen Gebiet gebräuchlich sind, werden verwendet werden.

[0142] Mit entsprechender Vorsicht bei der praktischen Umsetzung der vorliegenden Erfindung wird das Gussteil jedoch eine hervorragende Oberflächenendbearbeitung aufweisen, die in vielen Verwendungen eine geringe oder keine Schleifung oder Poliereng für den beabsichtigten Zweck erfordern wird. Wenn er-

forderlich, wird ein Polieren zum Erzielen einer besseren Oberflächenendbearbeitung, wie feine Spiegeloberflächen, mit einem Minimum von Polierarbeiten erreicht werden.

[0143] Es ist natürlich weniger erforderlich, sich der Oberflächenendbearbeitung für viele Teile, bei denen eine Oberflächenendbearbeitung und eine Polierung für die Verwendung des Gussteils nicht wesentlich sind, zu widmen, wie für Oberflächen, die nicht gesehen werden oder von denen nicht gefordert wird, dass sie in einer Weise arbeiten, die durch die Oberflächenendbearbeitung beeinflusst wird. Gussteile, die Schmiedeoperationen ausgesetzt werden sollen, haben keinen Nutzen von einer hohen Oberflächenendbearbeitung. In einigen Umständen wird es nicht erforderlich sein, Polieroperationen auf den Gießformoberflächen auszuführen, und die Herstellungsrate wird erhöht und die Kosten von Betriebsvorgängen werden entsprechend erhöht.

[0144] Die Oberflächenendbearbeitung von inneren Bohrungen und Hohlräumen wird auch so fein wie die Grenzen der Gießform-Polieroperation sein, wie voranstehend beschrieben. Abschließende Polieroperationen, wenn erforderlich, können effizient als Ergebnis der hohen Qualität der anfänglichen Endbearbeitung der Oberflächen erreicht werden, und können durch irgendwelche der gewöhnlichen Techniken erreicht werden, die in dem technischen Gebiet verwendet werden, einschließlich insbesondere einer Abriebmittelflusstechnologie, die von Extrude Hone Corporation in Irwin, Pennsylvania, erhältlich ist.

[0145] Um die vorliegende Erfindung beispielhaft darzustellen und die bevorzugten Merkmale und die beste Vorgehensweise zur Ausführung der Erfindung zu demonstrieren, ist die Erfindung in dem Prozess eines Feingusses von Gasturbinenmaschinenflügeln verwendet worden. Derartige Flügel (bzw. Schaufeln) sind die schwierigsten und anforderndsten Gießoperationen wegen einer Vielzahl von Gründen und die Qualität des Gussteils ist kritisch zur Sicherheit und Effektivität von Turbinenmaschinen bei sämtlichen ihrer Anwendungen, einschließlich von Flugzeugmaschinen, bei denen menschliche Leben von den Herstellungsoperationen abhängen.

[0146] Während die Gussteile für Turbinenflügel in einer Vielzahl von Techniken gebildet werden, sind moderne Turbinenmaschinen von aeronautisch komplexen Flügelformen und strukturell komplexen hohlen inneren Konfigurationen mit höchsten Anforderungen abhängig, um eine Gewichtsreduktion, einen Kühlluftfluss und einen Luftauswurf durch eine Öffnung in der Oberfläche des Flügels bereitzustellen, um eine Luftflusssteuerung und eine Kühlbarriere-schicht um die Oberfläche des Flügels herum bereitzustellen.

[0147] Eine Turbinenmaschinenkonstruktion übersteigt beträchtlich gegenwärtige Herstellungsmöglichkeiten, insbesondere in der Präzision und Genauigkeit des Feingusses, so dass Spielräume und Kompromisse in der Konstruktion durchgeführt werden

müssen, um die Begrenzungen der gegenwärtigen Technologie auszugleichen. Der am meisten variable und schwierige Aspekt des Gießens von derartigen Turbinenflügeln ist die Veränderbarkeit der Gussformkerne und deren Ausrichtung in Wachsverarbeitungsformen, wobei diese Operationen die inneren Hohlräume der Flügel und die Wanddicke des Gussteils definieren.

[0148] Ein stilisierter Turbinenflügel ist in **Fig. 1** dargestellt, wobei die allgemeine äußere Konfiguration und in dem weggeschnittenen Abschnitt ein gewisser Teil des inneren Aufbaus gezeigt ist. Wie in **Fig. 1** gezeigt, ist das Turbinenrotorflügel-Gussteil (**10**) aus zwei Hauptabschnitten gebildet, nämlich dem Flügel (**20**) und dem "Weihnachtsbaum" (**30**), der mit einem einer Anzahl von entsprechenden Formen in einer Rotorplatte, die nicht gezeigt ist, zusammenpasst, die eine Vielzahl von derartigen Flügeln in einem ringförmigen Ring aufnimmt, um den Turbinenrotor zu bilden.

[0149] Die externen Oberflächen des Flügels sind vom Aufbau her relativ einfach, obwohl die Formen höchst entwickelt sind. Die Form der Flügeloberflächen wird durch die Konfiguration des Inneren der Wachsverarbeitungsform bereitgestellt, mit zulässigen Spielräumen für ein Schrumpfen des Metalls bei der Gießoperation. Die Form des Flügels (**20**) wird durch Parameter der aerodynamischen Konstruktion vorgegeben, während die Form des "Weihnachtsbaums" (**30**) durch die Anforderungen der Anbringung des Flügels auf seiner Rotorplatte vorgegeben wird. Für andere Flügelaufbautechniken können andere Formen und Konfigurationen verwendet werden, einschließlich eines einstöckigen Gießens der Rotorplatte mit ihren angefügten Flügeln, oder der Entwicklung einer Form, die dafür ausgelegt ist, um an der Oberfläche der Rotorplatte angeschweißt zu werden.

[0150] Die innere Konfiguration ist komplexer, mit serpentinartigen Luftflusskanälen (**12**), die mit Rippen (**14**) versehen sind, die dazu dienen, den Metallflügelaufbau zu verstärken und den Turbulenz- und Kühleffekt des Luftflusses durch die Kanäle zu steuern. Die Kanäle transportieren verdichtete Luft durch den Flügel von einem Auslass (**16**) von der zentralen Rotorplatte an die Austrittsöffnungen (**18**), die durch die Flügeloberfläche entlang der führenden und hinteren Kanten und an der Flügelspitze vorgesehen sind. Dünne Wandabschnitte des Flügels (**20**) benachbart zu der hinteren Kante (**22**) werden durch einstöckig gegossene Pfosten (**24**) gehalten, die eine strukturelle Verstärkung des Flügels (**20**) bereitstellen und wie die Rippen (**14**) dazu dienen, den Durchgang eines Luftflusses zu beeinflussen. Sämtliche von diesen Merkmalen müssen bei dem Gießen durch den Flügelkern bereitgestellt werden, da das Innere des Gussteils für Bearbeitungsoperationen nicht zugänglich ist, nachdem das Gussteil fertig ist und der Kern entfernt ist.

[0151] Der Kern weist eine höchst komplexe und

komplizierte Form auf, die benötigt wird, um die innere Konfiguration des Turbinenflügel-Gussteils bereitzustellen, wie voranstehend beschrieben. In der Tat weist jedes Merkmal des inneren Aufbaus des Flügels ein entsprechendes negatives Merkmal in dem Kern auf, was die Bildung des Kerns auf die benötigte Präzision und Genauigkeit einen höchst anfordernden Aspekt des Gießbetriebs macht. Der Stand der Technik kann eine derartige genaue Entwicklung von Keramikernen nicht ausführen, und die Beschränkungen der Kernformungsoperationen werden in den Maschinenentwurfsprozess zurückgeführt, um Vorkehrungen für diese Begrenzungen zu machen. Gewöhnliche Konstruktionsspielräume, die von der Veränderbarkeit der Kernherstellung vorgegeben werden, sind eine größere Dicke der Wandabschnitte des Flügels, größere Rippengrößen als von strukturellen Anforderungen benötigt werden, und ein vergrößerter Durchmesser der Halterungsposten. Die Wanddicke, die verwendet wird, muss ebenfalls geeignete Spielräume für die gebräuchlichen Pegel einer Fehlansrichtung in der Wachsverarbeitungsform bilden. In **Fig. 3** sind zwei Bedingungen einer Ausrichtung in stilisierten Querschnitten von Gießformen und Kernen gezeigt. **Fig. 3a** zeigt einen richtig ausgerichteten Kern (**100**), der innerhalb einer Gießform (**110**) positioniert ist, mit einem im Wesentlichen gleichförmigen Abstand zwischen der Gießform und dem Kern, was wiederum ein hohles Gussteil mit im Wesentlichen gleichförmiger Wanddicke erzeugen wird. **Fig. 3b** zeigt den Effekt eines fehlansgerichteten Kerns (**120**) innerhalb einer Gießform (**130**), wobei der Kern durch zwei Grad relativ zu der Gießform verwunden ist. Wie gezeigt, erzeugt die Kernfehlansrichtung einen sehr dünnen Abstand in einigen Gebieten (**140**) und einem Abstand, der größer als entworfen ist, an anderen Stellen (**150**). Wenn ein Gussteil in einer derartigen Gießform gebildet wird, wird die Wanddicke die beabsichtigte Gleichförmigkeit nicht aufweisen und wird dünne Abschnitte, die die entworfenen strukturellen Eigenschaften nicht aufweisen, und andere Gebiete, wo sie überdick sind, aufweisen und die erforderlichen strukturellen Charakteristiken und das beabsichtigte Gewicht überschreiten. In dem technischen Gebiet ist es gebräuchlich, das Entwurfsgewicht des Flügelaufbaus um zehn bis fünfzehn Prozent zu erhöhen, um derartige Toleranzen bzw. Spielräume bereitzustellen.

[0152] Es ist altbekannt, dass ein Übergewicht in Turbinenmaschinen in sämtlicher Hinsicht unerwünscht ist, insbesondere in Flugzeugen, die von derartigen Turbinenmaschinen angetrieben werden. Ein Übergewicht in den Turbinenrotorflügeln ist besonders unerwünscht in Turbinenmaschinen für taktische Militärflugzeuge, bei denen abrupte, wesentliche und schnelle Schubänderungen erforderlich und gewöhnliche Aspekte des Betriebs sind.

[0153] Die gebräuchlichsten und signifikantesten Quellen von Kernbildungsfehlern, die gegenwärtig Maschinenentwurfskompromisse vorgeben, und die

durch die vorliegende Erfindung beseitigt werden können, umfassen die folgenden:

A. Der minimale Durchmesser der Pfosten (**24**) in dem Flügel wird durch das Loch der minimalen Größe vorgegeben, welches in-situ innerhalb des Kernaufbaus geformt werden kann, was effektiv in dem Stand der Technik auf einen Durchmesser von ungefähr 0,5 mm beschränkt ist. Die Alternative besteht darin, Löcher in den Kernrohrkörper nach einem Formen zu bohren, was gewöhnlicherweise die Quelle von exzessiven und nicht akzeptierbaren Sprüngen bzw. Brüchen und Kernverlusten ist, was aber Pfosten von ungefähr einem Durchmesser von 0,3 mm bereitstellen kann. Wie nachstehend diskutiert, können die Ultraschallbearbeitungstechniken der vorliegenden Erfindung ein zufälliges Loch für die Bildung von Pfosten in dem Gussteil bis auf 0,5 mm Durchmesser herunterbilden, wenn gewünscht oder benötigt. Deren Anzahl, Orte und Anordnung ist größtenteils unbeschränkt.

B. Die gegossenen Rippen (**14**) sind in den herkömmlichen Techniken durch das Ausmaß eines Schrumpfens während des Brennens auf eine minimale Dicke von ungefähr 0,3 mm und auf eine maximale Höhe von ungefähr 0,5 mm beschränkt. In der vorliegenden Erfindung kann die Dicke der Rippen so klein wie 0,05 mm sein und kann durchgeschnitten sein, wenn gewünscht, d.h. mit keiner maximalen Tiefe.

C. Während eines Brennens kann die Entwicklung einer überspannenden Biegung, einer sehnartigen Wölbung, und einer Spitze-zu-Wurzel-Verwindung sich entwickeln, was Abweichungen in der Gestalt von der Konstruktion von typischerweise $\pm 0,75$ mm oder mehr verursacht. In der vorliegenden Erfindung können Abweichungen von der Entwurfsform auf minus null, +0,02 mm beschränkt werden.

D. Die Dicke der hinteren Kante verändert sich typischerweise $\pm 0,15$ mm bei Techniken des Standes der Technik. In der vorliegenden Erfindung kann die Veränderung auf minus null, +0,002 mm beschränkt werden.

E. Eine Fehlansordnung des Kerns innerhalb der Wachsverarbeitungsgießform durch herkömmliche Techniken und im Hinblick auf die dimensionsmäßige Veränderung des Kernaufbaus selbst kann Gusswanddickenveränderungen von bis zu 0,75 mm beim Gießen typischerweise ungefähr 1,5 mm in der nominellen Entwurfsdicke produzieren, siehe **Fig. 3a** und **3b**. Die Fehler bei der Kernbildung und bei der Anbringung sind oft kumulativ. Mit der vollständigen Entwicklung des Potenzials der vorliegenden Erfindung kann die Veränderung in der Wanddicke des Gussteils auf 0,02 mm beschränkt werden, was eine Verbesserung von mehr als 3.500% darstellt.

F. Gegenwärtige Kernentwicklungstechniken, so gar mit den voranstehenden Beschränkungen,

führen zu einer Zurückweisungsrate von 10 bis 20% von Kerngießteilen durch eine Rissbildung, Brüche, Teilen außerhalb der Spezifikation und anderen Fehlern. Da in der vorliegenden Erfindung das Gießen und Brennen der Kerne nicht so starke Anforderungen stellt, überschreiten die verwendbaren Kerne, die in der vorliegenden Erfindung hergestellt werden, sogar bei den weit höheren Spezifikationen, 95% und oft 98% oder mehr.

[0154] Die Prozedur zum Herstellen der Turbinenflügel folgt der normalen Sequenz von Feingusstechniken, mit der Einführung der Ultraschallbearbeitung des Keramikernaufbaus nach dessen Brennen und dessen Verdichtung. Zusammenfassend schließt die Sequenz von Operationen in der Prozedur die folgenden Schritte ein:

1. Bilden eines gebrannten Keramikgießformkerns auf eine nahezu Netto-Form und -Dimensionen. Wie voranstehend beschrieben können die gewöhnlichen Techniken für die Bildung von derartigen Kernen stark beschleunigt werden, da die schwierigen Aspekte von Gießform-Kernkörpern in der Erreichung der exakten beabsichtigten Entwurfsform für die Struktur ist. Eine derartige Präzision wird nicht benötigt und die nahezu Netto-Form wird schnell und leicht mit den zulässigen Toleranzen des Betriebs erhalten. Feine Details des Aufbaus können in vielen Fällen bei der Entwicklung des Kernrohteils ignoriert werden und können für eine Entwicklung ausschließlich durch die Ultraschallbearbeitungsoperation belassen werden. In der Tat kann ein erfahrendes Geschäft gut in der Lage sein, einen geeignet gebrannten Kern auf geeignete Toleranzen bei dem ersten Versuch bereitzustellen. Da das Formen des Rohkörpers und der Brennbetrieb die hohen Grade einer Präzision nicht benötigen, die bei einer Feingusstechnologie gewöhnlich sind, wird eine Hauptentwicklungsperiode und eine wesentliche Komponente bei der Werkzeugentwicklungszeit beseitigt und die Operation kann produktiv sein, ohne die zahlreichen Iterationen bei der Entwicklung von jeder Kerniteration. Zusätzlich kann in vielen Fällen die gleiche Kernbank in mehreren Kernentwicklungsiterationen beim abschließenden Bestimmen des Entwurfs verwendet werden, was erlaubt, dass Änderungen in der Kerngießform insgesamt umgangen werden können.

2. Das Ausformen des Keramikerns auf eine Netto-Form und -Dimensionen durch eine Ultraschallbearbeitung. Da die Formungsoperation von den verwendeten Ultraschallwerkzeugen geführt wird, ist es deren Betrieb, der der Schlüssel für die schnelle Entwicklung der abschließenden Kernkonfiguration auf die erforderlichen Toleranzen und Präzision ist. Da die Erzeugung von Prototypkernen während des Entwurfsentwicklungszyklus ausgeführt wird, in der bevorzugten Ausbildung der Erfindung, und zwar durch ein oder mehrere standardisierte Punktwerkzeuge, die auf einem über Mehrachsen numerisch gesteuerten System angebracht sind, können neue Kernfor-

men hergestellt werden, sobald die gewünschten Entwurfsänderungen bei der Programmierung des Bearbeitungswerkzeugsystems entwickelt werden. Die zusätzlichen Schritte einer Herstellung von Produktionsformwerkzeugen wird verschoben, bis die abschließende Konfiguration festgelegt ist, und ist nicht länger der Gegenstand einer iterativen Entwicklung. Wiederum wird eine Hauptkomponente einer potenziellen Verzögerung in dem Entwurfsentwicklungszyklus beseitigt.

Sobald der Entwurf fest ist, werden Produktionsformwerkzeuge durch höchst effiziente und produktive Techniken, wie beispielsweise EDM, auf die benötigte Konfiguration und Toleranzen gebildet und in eine unmittelbare Produktion gebracht.

Ein zusätzlicher Vorteil der vorliegenden Erfindung ist, dass die Toleranzbestimmungsoperationen, d.h. die Ultraschallbearbeitungsoperationen, selbst zu einem numerisch gesteuerten Betrieb und einer Qualitätssteuerung führen. Dies wiederum erlaubt die Entwicklung der Programmierung direkt aus Entwurfsdaten, die elektronisch in das numerische Steuersystem transferiert werden und in die Ultraschallbearbeitungssteuerungsform durch eine Programmierung umgewandelt werden können, oft direkt durch die CAD-Software des Entwicklers. Eine wesentliche Verbesserung in der Zuverlässigkeit des Entwicklungsprozesses ergibt sich aus derartigen Operationen, sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Vermeidung der Gelegenheit für die Einführung von Fehlern bei der Übersetzung des Entwurfs in einen spezifischen Kern oder eine spezifische Gießformstruktur.

3. Das Anbringen des bearbeiteten Keramikerns in einer Wachsverarbeitungsform. Wie voranstehend diskutiert, stellt die Präzision des Kerns, gekoppelt mit Anbringungsstiften, innerhalb der Wachsverarbeitungsgießform oder befestigt auf der Oberfläche des Kerns, eine höchst genaue und präzise Positionierung des Kerns innerhalb der Wachsverarbeitungsform und die wesentliche Beseitigung der Fehler, die normalerweise bei derartigen Operationen angetroffen wird, sicher.

In dem Entwurfsentwicklungszyklus hat der Entwickler eine beträchtliche Sicherheit, dass das Ergebnis der Gießoperation mit dem beabsichtigten Entwurf übereinstimmt, und dass die Daten, die bei dem Testen erzeugt werden, gültige Darstellungen des Entwurfs ohne eine unzulässige Veränderung als Inzident der Gießformtechniken und deren Beschränkungen sind.

Eine nachfolgende Herstellung zieht Nutzen aus der weitaus größeren Zuverlässigkeit und eine Qualitätssteuerung wird stark vereinfacht. Das Auftreten von Teilen, die außerhalb der Spezifikation liegen, wird stark verringert, was signifikant die Kosten und die Produktivität des Betriebs verbessern.

4. Das Bilden einer Wachsform innerhalb der Wachsverarbeitungsform einschließlich des Keramikerns. Weil die Präzision des Kerns und dessen Ausrichtung

innerhalb der Gießform hinsichtlich der Toleranzen mit der Struktur der Gießform selbst vergleichbar sind, wird die Wachsfülloperation in ihrer Gleichförmigkeit und Zuverlässigkeit stark vereinfacht. Die Dicke der Wandbildungsabschnitte des Wachsmusters sind nicht länger das höchst veränderbare Merkmal, so wie dies traditionell gewesen ist.

5. Das Entfernen der Wachsförmigkeit von dem Wachs in der Gießform. Diese Operationen bleiben bei der vorliegenden Erfindung unverändert, obwohl es beobachtet worden ist, dass die größere Gleichförmigkeit des Wachsmusters die Betriebsvorgänge besser vorhersagbar und zuverlässiger macht.

6. Das Beschichten der Wachsförmigkeit mit einem Keramikgießform-formenden Streifen (Slip) schreitet normal fort.

7. Das Trocknen des Streifens zieht Nutzen, im Hinblick auf die vorliegende Erfindung, aus dem verringerten Auftreten von Sprüngen des formenden Rohkörpers durch In-Kontakt-Kommen mit einem verzerrten oder fehlausgerichteten Kernaufbau, wenn die Keramikformulierung schrumpft. Bei gewöhnlichen Betriebsvorgängen werden eine signifikante Anzahl von Gießformen zerstört oder in dem Trocknungsbetrieb beschädigt, ein Phänomen, was größtenteils in der vorliegenden Erfindung beseitigt wird.

8. Ein Erwärmen des Rohkörpers zum Entfernen des Wachses und zum Verdichten und Brennen der Keramik zum Bilden einer Feingießform einschließlich des Keramikerns. Das Schrumpfen der Gießform, das während des Brennens auftritt, ist eine andere traditionelle Quelle eines Verlusts der Gießformen für den Fall von fehlausgestalteten und fehlausgerichteten Kernen, und ist in der vorliegenden Erfindung nicht mehr ein Problem.

9. Ein Gießen von geschmolzenem Metall in die Gießform. Die größere Gleichförmigkeit der Gießform, mit dem Kerneinschluss, stellt ein konsistentes Füllen und einen Fluss des geschmolzenen Materials innerhalb der Gießform bereit, was die Produktivität des Betriebsvorgangs signifikant verbessert. Der Gießbetrieb selbst bleibt unverändert.

10. Ein Kühlen des geschmolzenen Metalls auf einen Festkörper ist vorhersagbarer und steuerbarer, da das Teil gleichförmigere Dimensionen aufweist. Infolgedessen sind die Techniken zum Bestimmen der Mikrostruktur des Metalls durch Steuern der Bedingungen des Kühlbetriebs zuverlässiger und produktiver.

11. Ein Entfernen der Keramikgießform und des Keramikerns von dem Festkörpermetall. Weil weniger Veränderungen in den Wanddicken des Metallteils vorhanden sind, gibt es ein verringertes Auftreten einer Beschädigung an dem Teil im Verlauf einer Entfernung der Keramikmaterialien von dem fertig gestellten Gießteil. Andere Operationen auf dem Gussstück, einschließlich eines Zusammenbaus mit anderen Teilen, Endbearbeitungsoperationen und dgl., neigen weitaus weniger dazu, eine dünne Wand mit einer Unterspezifikation oder eine andere Abweichung von dem entworfenen Bindholz des Teils zu beschädigen.

12. Ein Testen, eine Verwendung und ein erneuter Entwurf des Teils kann wiederholt werden, wie während der Entwurfsentwicklungsstufe benötigt. Da der Entwurf verbessert und ausgefeilt ist, können zusätzliche Iterationen mit einer minimalen Vorlaufzeit erzeugt werden, oft mit nicht mehr als einer Änderung bei der Programmierung des numerischen Steuerungssystems des Ultraschallbearbeitungsbetriebs. Zum ersten Mal in vielen Jahren kann der Herstellungsbetrieb und die Prototypenherstellungsbetriebe mit dem Entwurfs- und Entwicklungsprozess Schritt halten und in einigen Aspekten diesem Prozess vorangehen. Diese Entwicklungen werden Turbinenmaschinenentwicklern erlauben ihr technisches Gebiet weiter voranzutreiben, was bislang durch die Produktionsbeschränkungen und die Notwendigkeit eines Entwurfs mit Spielräumen und Fehlermargen, die durch die hohe Veränderbarkeit und den Präzisionsmangel in Gussteilen vorgegeben wurde, behindert worden ist. Die Sicherstellung eines Feingusses von komplexen Teilen, wie Turbinenflügel, auf die engen und höchst gleichförmigen und reproduzierbaren Toleranzen, die bei der vorliegenden Erfindung erreicht werden, ist ein signifikanter Fortschritt in dem technischen Gebiet. Die verringerte Entwicklungszykluszeit wird ebenfalls zu der schnellen Entwicklung von besseren Entwürfen bei Sicherstellung von ihrer effektiven Produktion, wenn der Entwurf vollständig entwickelt ist, beitragen.

[0155] Die voranstehende Beschreibung und spezifische Beispiele sind dafür vorgesehen, um die vorliegende Erfindung zu illustrieren und durchschnittsfachleute zu führen und sie in die Lage zu versetzen die Erfindung umzusetzen; in Kombination mit den gewöhnlichen Praktiken, die in dem technischen Gebiet gebräuchlich und gewöhnlich sind, und es ist nicht beabsichtigt, dass sie beschränkend für den Umfang der Erfindung ist. Der Umfang der Erfindung ist mit spezifischen Einzelheiten in den folgenden angehängten Ansprüchen aufgeführt, die die Grenzen der Erfindung definieren.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen von Feingussartikeln durch einen Feinguss mit einer Keramikgießform (110), wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- A. Bilden einer Keramikgießform (110) aus einer gesinterten Keramik;
- B. Verarbeiten wenigstens eines gewählten Teils (50, 100) der gesinterten Keramikgießform (110) durch eine Ultraschallbearbeitung;
- C. Gießen von geschmolzenem Metall in die Gießform (110) hinein;
- D. Kühlen des geschmolzenen Metalls auf einen Festguss; und
- E. Entfernen der Gießform (110) von dem Guss.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei wenigstens der gewählte Abschnitt (50, **100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von $\pm 0,2$ mm bearbeitet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei wenigstens der gewählte Abschnitt (50, **100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von minus Null, $+0,05$ mm bearbeitet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei wenigstens der gewählte Abschnitt (50, **100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von minus Null, plus $0,02$ mm bearbeitet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei wenigstens der gewählte Abschnitt (50, **100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung durch wenigstens eine Form-Bearbeitungs-sonotrode mit einer Fläche von ungefähr 5 bis ungefähr 100 cm^2 bearbeitet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der gewählte Teil der gesinterten Keramikgießform (**110**) einen Keramikern (**100**) umfasst.

7. Verfahren zum Herstellen von Feingussartikeln durch einen Feinguss mit einer Keramikgießform (**110**) wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- A. Bilden eines gebrannten Keramikgießkerns (**100**) auf nahezu eine Nettoform und -abmessungen;
- B. Formen des Keramikerns (**100**) auf eine Nettoform und -abmessungen durch eine Ultraschallbearbeitung;
- C. Anbringen des bearbeiteten Keramikerns (**100**) in einer Wachsverarbeitungsgießform;
- D. Bilden einer Wachsform innerhalb der Wachsverarbeitungsgießform einschließlich des Keramikerns (**100**);
- E. Entfernen der Wachsform von der Wachsverarbeitungsgießform;
- F. Beschichten der Wachsform mit einem Keramikgießform-bildenden Streifen;
- G. Trocknen des Streifens;
- H. Erwärmen des Streifens, um das Wachs zu entfernen und den Keramikstreifen zu verdichten und zu brennen, um eine Feingussform (**110**) einschließlich des Keramikerns (**100**) zu bilden;
- I. Gießen des geschmolzenen Metalls in die Gießform (**110**) hinein;
- J. Kühlen des geschmolzenen Metalls auf einen Festkörper; und
- K. Entfernen der Keramikgießform (**110**) und des Keramikerns (**100**) von dem festen Metall.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei wenigstens der Kern (**100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von $\pm 0,2$ mm bearbeitet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 7, wobei wenigstens der Kern (**100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von minus Null, $+0,05$ mm bearbeitet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 7, wobei wenigstens der Kern (**100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung auf eine Toleranz von minus Null, plus $0,02$ mm bearbeitet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 7, wobei wenigstens der Kern (**100**) der Gießform (**110**) durch eine Ultraschallbearbeitung durch wenigstens eine Form-Bearbeitungs-sonotrode mit einer Fläche von ungefähr 5 bis ungefähr 100 cm^2 bearbeitet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1 oder 6, wobei die Keramikgießform (**110**) oder der Keramikgießkern (**100**) aus einer Bestandsform aus einer gesinterten Keramik gebildet wird und wenigstens ein Teil davon durch eine Ultraschallbearbeitung verarbeitet wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

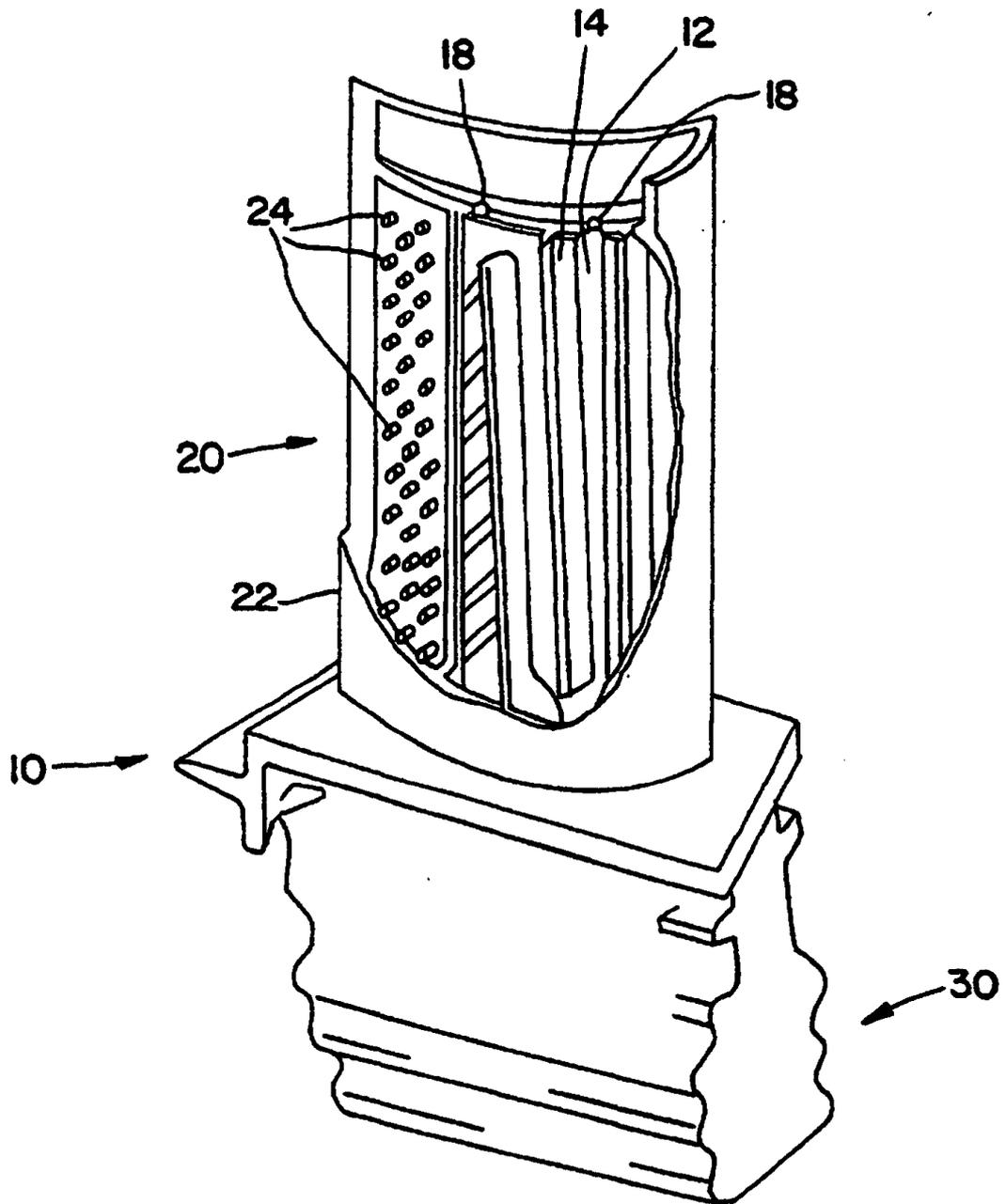


FIG. 1

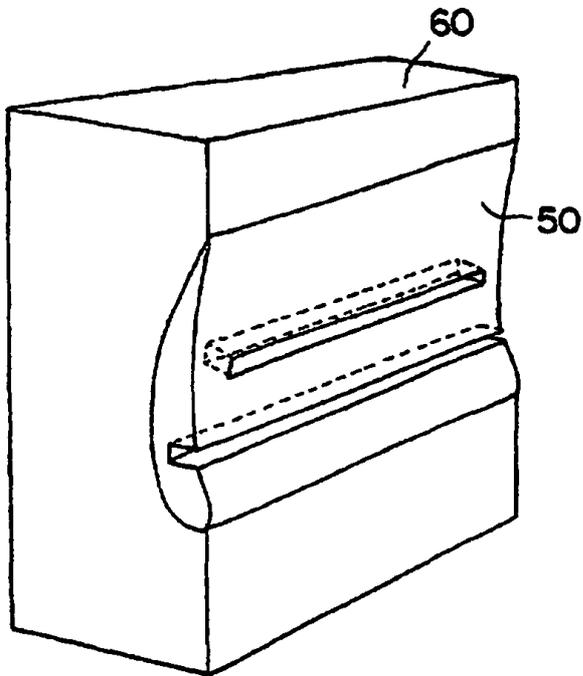


FIG. 2a

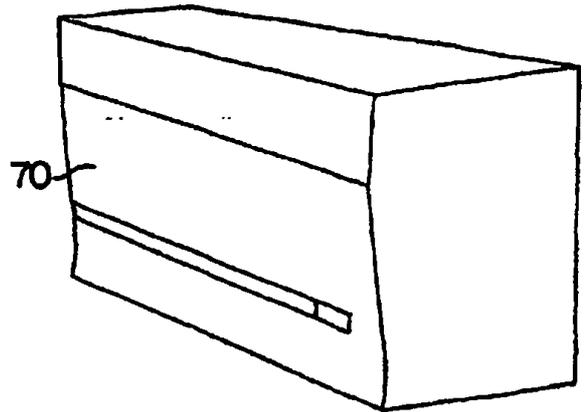


FIG. 2b

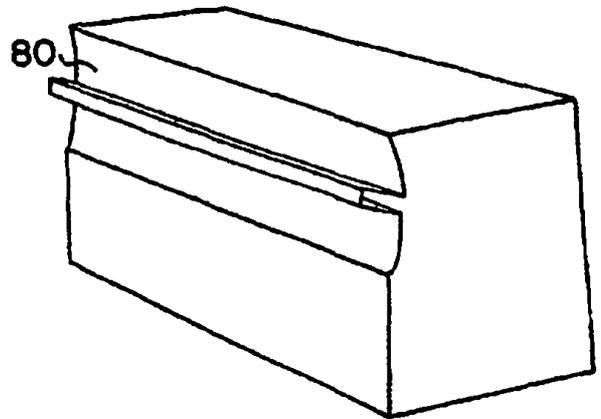


FIG. 2c

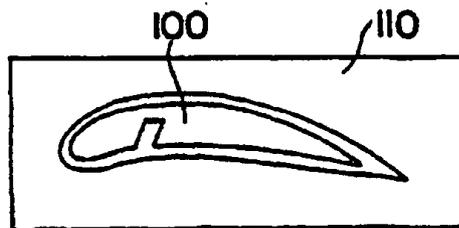


FIG. 3a

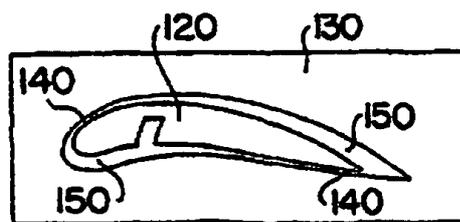


FIG. 3b