



Werkstoffe, Oberflächentechnik und Fertigungsverfahren für die nächste Generation von Flugtriebwerken

Welche Herausforderungen kommen nach 2000 auf uns zu?

Dr. Klaus Steffens / Dr. Hans Wilhelm

1 Einleitung

Moderne Flugtriebwerke müssen höchsten Ansprüchen im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Gewicht, Leistung, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer gerecht werden. Im Lauf der letzten vier Jahrzehnte wurden insbesondere auf dem zivilen Sektor Triebwerke entwickelt, die die an sie gestellten Forderungen voll erfüllen und ein hohes Maß an technischer Perfektion erreicht haben. Gleichzeitig konnten Lärmpegel und Schadstoffemissionen drastisch reduziert werden.

Im Vergleich zu Kraftfahrzeugmotoren ist der Kraftstoffverbrauch moderner Flugtriebwerke (je Passagiermeile) deutlich geringer. Seit der ersten Generation von zivilen Strahltriebwerken konnte die Zuverlässigkeit um den Faktor 10 verbessert werden. So kommt es bei den heutigen Strahltriebwerken der dritten Generation (z. B. PW4000, Trent, GE90) maximal dreimal je Million Flugstunden zu einem Abstellen während des Flugs. Aus diesem Grund sind seit etwa 20 Jahren auch zweistrahlige Flugzeuge für Langstrecken- bzw. Transatlantikflüge zugelassen.

Erhebliche Fortschritte wurden auch bei der Verlängerung der Kontroll- und Wartungsintervalle erzielt. Die TBO (das Überholungsintervall) heutiger Turbofans liegt normalerweise zwischen 10,000 und über 20,000 Flugstunden, je nach den individuellen Einsatzbedingungen.

Wichtige Meilensteine auf diesem Weg waren

- ◆ die Entwicklung von Zweiwellen- und Dreiwellentriebwerken mit einem Nebenstromverhältnis von mehr als 5,
- ◆ die Steigerung des Gesamtdruckverhältnisses auf über 40 und
- ◆ die Erhöhung der Verbrennungstemperaturen auf mehr als 1850 K.

Nach heutigem Kenntnisstand kann man sagen, dass weitere entscheidende Verbesserungen sowohl des thermischen Wirkungsgrads als auch des Vortriebswirkungsgrads nur möglich sind, wenn wesentliche Änderungen an der Auslegung vorgenommen werden, z. B.:

- ◆ Erhöhung des Nebenstromverhältnissen von derzeit 8 auf Werte zwischen 12 und 15. Dies erfordert den Einsatz eines langsam laufenden Fan, der – über ein Untersetzungsgetriebe – von einer schnelllaufenden, transonischen Niederdruckturbine angetrieben wird.
- ◆ Einsatz von rekuperativen Wärmetauschern zur Ausnutzung der Wärmeenergie des Abgases.

Die erste Maßnahme könnte gegen Ende dieses Jahrzehnts bis zur Serienreife gediehen sein, die Entwicklung der rekuperativen Wärmetauscher wird noch länger dauern. Das heißt, dass auch im nächsten Jahrzehnt überwiegend Triebwerke heutiger Auslegung im Einsatz sein werden.

Was heute im Triebwerkbau Stand der Technik ist, ist neben den Verbesserungen der Auslegung sowie der Aero- und Thermodynamik in nicht unerheblichem Maß den Fortschritten auf den Gebieten der **Werkstoff-, Fertigungs- und Oberflächentechnik** zu verdanken.

Die Einführung von Titanlegierungen Anfang der 60er Jahre hat beispielsweise die Grundlage für die Entwicklung großer Fan-Schaufeln und schnelllaufender HDV-Läufer geschaffen. Die extrem hohen Turbineneintrittstemperaturen moderner Triebwerke (die höher sind als die Schmelztemperaturen der Schaufelwerkstoffe) benötigen unabdingbar Einkristall-Schaufelblätter mit komplizierten internen Kühlsystemen und Schutzschichten zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit. Die letzte Innovation auf diesem Gebiet sind Wärmedämmschichten für Laufschaufelblätter.

Wegen des ausgereiften Designs der Triebwerke findet der Wettbewerb zwischen den OEMs hauptsächlich über die Preise statt. Die OEMs suchen ständig nach neuen Wegen zur Senkung der Betriebskosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Triebwerkleistung. Dies kann durch verbesserte Auslegung, bessere Werkstoffe und optimierte Fertigungsverfahren erreicht werden. Bei der Auslegung neuer Triebwerke liegt der Schwerpunkt derzeit auf der Senkung der Herstellkosten, z. B. durch Reduzierung der Anzahl von Bauteilen. Dies stellt sowohl die Werkstofftechnik als auch die Fertigungstechnik vor neue Herausforderungen.

2 Werkstofftechnik

Die im Triebwerkbau verwendeten Werkstoffe zeichnen sich durch eine hohe spezifische Festigkeit und hervorragende Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften aus. Für alle Werkstoffe ist die Zulassung der Luftfahrtbehörden erforderlich. Sowohl die Hersteller des Rohmaterials als auch die Hersteller von Schmiede- und Gußteilen müssen von den Luftfahrtbehörden zugelassen sein und unterliegen einer strengen Überwachung.

2.1 Herkömmliche Werkstoffe im Triebwerkbau

Die wichtigsten, heutzutage verwendeten Werkstoffe sind Titanlegierungen, Nickellegierungen (Superlegierungen) und hochfeste Stähle (siehe Abb. 1). Andere spielen eine untergeordnete Rolle. Stähle werden hauptsächlich für Wellen und Getriebeteile, aber auch für Verdichter- und Turbinengehäuse verwendet. Auf diese Werkstoffe soll hier nicht näher eingegangen werden, da sie identisch oder vergleichbar mit den im Maschinenbau oder im Kraftfahrzeugbau verwendeten Werkstoffen sind.

2.1.1 Titanlegierungen

Titanlegierungen sind typische Werkstoffe für Verdichterteile. Sie bestechen durch ihr geringes spezifisches Gewicht, ihre Temperaturbeständigkeit ist jedoch begrenzt (siehe Tab. 1).

Bei den meisten im Einsatz befindlichen Ti-Legierungen handelt es sich um ($\alpha+\beta$)-Legierungen, die sowohl α -Stabilisatoren, wie z. B. Aluminium, zur Erhöhung der β -Transus-Temperatur, als auch β -Stabilisatoren, wie z. B. Molybdän und Vanadium, zur Senkung der β -Übergangstemperatur enthalten. Das Schmieden, insbesondere das Fertigschmieden, wird bei Temperaturen unterhalb der β -Transus-Temperatur durchgeführt, so dass ein feinkörniges ($\alpha+\beta$)-Mikrogefüge erzielt wird, bei dem die statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften optimal sind.

Auch heute noch ist Ti6Al4V (Ti64) die am meisten verwendete Ti-Legierung im Triebwerk- und im Zellenbau. Ti64 zeichnet sich durch eine optimale Kombination von Werkstoffseigenschaften aus: unkritisch in der Bearbeitung, hohe Festigkeit bei niedrigen Temperaturen, hervorragende Zerspanbarkeit und gute Schweißbarkeit. Ti64 wird in Form von Schmiedeteilen, Blechen und – seit etwa 1975 – auch Feingussteilen für statische Bauteile, wie z. B. Verdichtergehäuse, angeboten.

Ti 6242 und Ti 6246 weisen eine höhere Festigkeit und Temperaturbeständigkeit auf. Die derzeit fortschrittlichste Ti-Legierung für Scheiben (für den Einsatz bis 550 °C) ist IMI 834. Bei Temperaturen über 450 °C ist dieser Werkstoff allen anderen Ti-Legierungen überlegen. Allerdings ist diese Legierung auch doppelt so teuer wie Ti64, da das optimale Mikrogefüge und die hervorragenden Festigkeitseigenschaften nur durch eine aufwändige thermomechanische Behandlung erzielt werden können.

2.1.2 Nickellegierungen (Superlegierungen)

Nickellegierungen (Superlegierungen) sind für die heißen Triebwerkteile geeignet. Dazu gehören auch schon die letzten HDV-Stufen, wo Temperaturen erreicht werden, die für Ti-Legierungen zu hoch sind. Für Brennkammern wurden spezielle Legierungen in Blechform entwickelt (z. B. Hastelloy X, C263), die gekennzeichnet sind durch relativ geringe Festigkeit, hohe Oxidationsbeständigkeit, gute Verformbarkeit und angemessene Schweißbarkeit.

Für Turbinenteile werden im wesentlichen zwei Gruppen von Superlegierungen verwendet: Knetlegierungen für Scheiben und Ringe und Gusslegierungen für Lauf- und Leitschaufeln. Beide verdanken ihre Hochtemperaturfestigkeit zwei verschiedenen Verfestigungsmechanismen:

- ◆ Mischkristall-Verfestigung durch Zusatz von Kobalt, Chrom und hochschmelzende Elemente, wie Wolfram und Molybdän.
- ◆ Ausscheidungshärten über die intermetallische γ -Phase $Ni_3(Al,Ti)$ oder γ' -Phase Ni_3Nb . Daher enthalten die hitzebeständigsten Superlegierungen bis zu 10 Gewichts-% (Al + Ti) oder einige Prozent Niob.

Superlegierungen für Scheiben sind im Hinblick auf ihre hohen statischen und dynamischen Festigkeitswerte optimal für den Temperaturbereich bis 750 °C. Dabei wird besonderer Wert auf optimale LCF-Eigenschaften gelegt, die ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung von Scheiben sind. In Tab. 2 sind die wichtigsten Ni-Legierungen für Scheiben und rotierende Ringe zusammengefasst. Am meisten verwendet wird IN 718, eine Legierung, aus der zahlreiche Teile der hinteren HDV-Stufen und der Turbine hergestellt werden.

Die max. Einsatztemperatur von Waspaloy ist höher als die von IN 718. Waspaloy ist jedoch äußerst kritisch, was die metallurgischen Eigenschaften betrifft. Beim Schmieden ist es sehr schwierig, ein gleichmäßiges, feinkörniges Gefüge zu erzielen. Daher sind sowohl das Zerspanen als auch das Schweißen von Waspaloy schwierig.

Jahrelang konnten Legierungen mit höherer Temperaturbeständigkeit als Waspaloy, z. B. Udimet 700, René 95 oder IN 100, nur mit pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt werden. Einige dieser Werkstoffe sind zwar hochwarmfest, jedoch sind ihre bruchmechanischen Eigenschaften kritisch. Seit etwa 10 Jahren ist es nun möglich, ähnliche Werkstoffe, z. B. gatorized Waspaloy oder Udimet 720 LI nach dem herkömmlichen Ablauf "Gießen plus Schmieden" herzustellen, und zwar mit einer für die Scheibenfertigung geeigneten Qualität. Dieser Fortschritt war möglich durch Verwendung von reinem und homogenerem Vormaterial mit weniger Seigerungen sowie durch optimierte Schmelzparameter und eine thermomechanische Behandlung. Aus heutiger Sicht ist Udimet 720 LI die fortschrittlichste Legierung für Scheiben, die auf konventionellem Weg hergestellt werden kann. Ihre maximale Einsatztemperatur liegt bei 730 °C und ist damit um 80 °C höher als die von IN 718. Jedoch ist auch der Preis höher. Zur Zeit ist keine warmfestere Legierung als U720LI zu einem akzeptablen Preis auf dem Markt.

Heutzutage werden alle Lauf- und Leitschaufeln für die **Turbine gegossen** und **nicht geschmiedet**. Nur so lassen sich optimale Kriech- und Zeitstandfestigkeiten für den Einsatz der Schaufelblätter bei hohen Gastemperaturen erzielen. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden Legierungen für spezielle Einsatztemperaturen entwickelt (siehe Tab.3). IN 713 wird seit langem verwendet, hauptsächlich für die Lauf- und Leitschaufeln der hinteren NDT-Stufen, wo die Temperaturen nicht mehr so hoch sind. Gussteile aus IN 713 weisen polykristallines Gefüge auf.

IN 100 kann bei höheren Temperaturen eingesetzt werden (+ 30 °C im Vergleich zu IN 713) und zeichnet sich durch eine geringe Dichte ($\rho = 7,75 \text{ g/cm}^3$) aus. Diese Legierung war als eine der ersten nicht nur mit polykristallinen Gefüge, sondern auch in der gerichtet erstarrten (DS) und einkristallinen (SX) Version verfügbar.

Zweck des gerichteten Erstarrens ist die Vermeidung von Korngrenzen, die senkrecht zur Wirkrichtung der Zentrifugalkraft verlaufen, da diese das Kriechverhalten nachteilig beeinflussen. Einkristallgefüge weisen überhaupt keine Korngrenzen auf, deshalb sind ihre Kriecheigenschaften optimal. Beide Gefüge (DS und SX) werden durch spezielle Erstarrungstechniken erzeugt. Die am höchsten entwickelten SX-Legierungen, die heute verwendet werden, sind PWA 1484 und CMSX 10. Ihre Einsatztemperatur ist um etwa 100 °C höher als die von IN 100. Nachteile sind jedoch die hohe Dichte ($\rho \approx 9,0 \text{ g/cm}^3$) und die hohen Kosten.

Die klassischen Werkstoffe für Triebwerkbauteile, Ti-Legierungen und Ni-Legierungen, haben im Laufe der letzten Jahrzehnte ein hohes Maß an technischer Perfektion erreicht. Ihr Verbesserungspotential ist jedoch begrenzt. Jede weitere Verbesserung ist mit hohen Kosten verbunden. Daher ist es nun an der Zeit, neue Werkstoffe und Bauweisen zu entwickeln, die eine Leistungsverbesserung bei vertretbaren Kosten ermöglichen.

In Bild 2 ist die spezifische Festigkeit (Zugfestigkeit/Dichte) von herkömmlichen und neuartigen Werkstoffen (hauptsächlich Verbundwerkstoffen und intermetallischen Phasen) über der Temperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die neuen Werkstoffe im Hinblick auf Temperaturbeständigkeit und Festigkeit attraktiv sind. Abbildung 3 zeigt mögliche Anwendungen für diese Werkstoffe.

2.2 Neuartige Werkstoffe und Bauweisen

Zwei vielversprechende Gruppen neuer Werkstoffe für künftige Triebwerkgenerationen sind faserverstärkte Verbundwerkstoffe und monolithische, intermetallische Werkstoffe. Moderne Verbundwerkstoffe haben entweder eine Polymer-, eine Metall- oder eine Keramikmatrix. Bei den intermetallischen Werkstoffen sind es vor allem TiAl-intermetallische Phasen attraktiv. ODS-Superlegierungen (oxiddispersionsverstärkte Legierungen) werden keine größere Rolle spielen.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass das Potenzial dieser neuen Werkstoffe von den Triebwerkherstellern (und sogar innerhalb der einzelnen Unternehmen) unterschiedlich beurteilt wird. Derzeit lässt sich nicht sagen, ab wann diese Werkstoffe serienreif sein werden und in welchem Umfang sie die herkömmlichen Werkstoffe ersetzen können. Klar ist jedoch, dass auch künftig die konventionellen Guss- oder Knetlegierungen auf Ti- oder Ni-Basis eine dominierende Rolle spielen werden.

2.2.1 Polymermatrix-Verbundwerkstoffe (PMC)

PMCs kommen wegen ihres geringen Gewichts, ihrer hohen Festigkeit und der niedrigen Kosten als Werkstoffe für Bauteile mit komplexer Geometrie in Frage (siehe Abb. 4). Ihre Einsatztemperatur darf jedoch 150 °C bzw. bei moderneren Typen 200 °C nicht überschreiten.

Die Verstärkungsfasern bestehen normalerweise Kohlenstoff, Glas oder Aramid ($\varnothing \approx 8 - 15 \mu\text{m}$) verwendet, die Matrix besteht aus Epoxidharz. PMC-Teile werden traditionell wie folgt hergestellt: Mehrere Lagen eines vorimprägnierten Gewebes (sog. Prepregs) werden in eine Form eingelegt, dann wird die Form abgedichtet und der Werkstoff im Autoklaven ausgehärtet. Dieser Prozess ist zeitaufwändig und arbeitsintensiv, d. h. relativ teuer.

Seit etwa 1975 sind PMC-Teile in Strahltriebwerken im Einsatz. Zunächst waren es nur einfache Teile für Fan- und Mantelstromgehäuse, in den 80er Jahren wurden allmählich immer mehr Teile aus PMC-Werkstoffen hergestellt, z. B. Abstandsringe, schalldämmende Verkleidungen, Innenbänder für den Niederdruckverdichter und Nasenkappen (Spinner). Heute werden auch die Fan-Austrittsschaufeln der Triebwerke CF6-80 und CFM56 aus PMC-Material gefertigt. Wegen ihrer Erosionsanfälligkeit werden die Eintrittskanten der Schaufeln mit Blechstreifen oder auf andere Weise geschützt.

Da inzwischen Fasern in besserer Qualität zur Verfügung stehen, können heute auch dreidimensionale, mehrlagige Gewebe-Vorformen (**nicht** vorimprägniert, billig) durch Stitch-Bonding (spez. Nähtechnik) hergestellt werden. Ein neues Verfahren für die Fertigung qualitativ hochwertiger PMC-Teile ist das RTM-Verfahren (RTM = resin transfer moulding), das folgende Arbeitsschritte umfasst: Zuschneiden des Fasermaterials, Herstellung der Vorformlinge durch Stitch Bonding, Schließen der Form, Einbringen der Harz-/Härter-Mischung und Aushärten.

Einen Meilenstein in der PMC-Technologie stellt die Serienfertigung der Fanschaufeln für das Triebwerk GE90 dar, dessen Schaufelblätter eine Länge von etwa 1000 mm aufweisen.

Es ist davon auszugehen, dass künftig wegen der niedrigeren Kosten und des geringeren Gewichts mehr Bauteile aus PMC-Werkstoffen eingesetzt werden. Ein Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung dieser Werkstoffe liegt auf der Steigerung der Temperaturfestigkeit.

2.2.2 Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (MMC)

Mit hochfesten MMC-Werkstoffen auf Titanbasis kann das Gewicht von Bauteilen um bis zu 50 % gegenüber herkömmlichen Titanlegierungen reduziert werden. Als Verstärkung werden Fasern mit hoher Festigkeit und hohem Elastizitätsmodul verwendet. Der Herstellprozess für Scheiben oder Ringe aus Ti-MMC umfasst die folgenden Schritte:

- ◆ Beschichtung der Fasern (normalerweise SiC, $\varnothing \approx 0,1 \text{ mm}$) mit Kohlenstoff, um Reaktionen zwischen Faser- und Matrixmaterial bei der Verarbeitung zu vermeiden
- ◆ Beschichtung der Fasern mit einer Ti-Legierung, üblicherweise durch Plasma- oder PVD-Verfahren
- ◆ Aufwickeln der beschichteten Fasern auf einen Formkörper
- ◆ Kompaktieren des Faser-Ringes durch heißisostatisches Pressen
- ◆ Einsetzen des faserverstärkten Rings in eine Scheibe oder einen Ring mit anschließendem Fügen durch heißisostatisches Pressen.

Dieses Verfahren ist geeignet für die Herstellung sog. Blings (Bling = blades ring, beschauelter Ring), die gegenüber konventionellen Scheiben und sogar den heute verwendeten Blisks (beschauelten Scheiben) deutliche Vorteile im Hinblick auf Gewicht und Rotordynamik bieten (siehe Abb. 5).

In den USA wurden Blings ($\varnothing \approx 400$ mm) und andere MMC-Teile, wie z. B. Wellen, Fanlaufschaufeln und -leitschaufeln bereits erfolgreich im Triebwerk erprobt. Ein Stellhebel für die Austrittsklappen des Triebwerks F414 wird seit kurzem in Serie gefertigt.

Bei MTU laufen derzeit vielversprechende zyklische Schleuderversuche mit Ringen aus Ti-MMC.

Die Ti-MMC-Technik ist sehr anspruchsvoll. Da die Möglichkeiten der Feststellung von inneren Fehlern in Verbundstoffen durch zerstörungsfreie Prüfverfahren begrenzt sind, muß die Qualität der Bauteile über stabile Fertigungsprozesse mit strenger Prozesskontrolle sichergestellt werden. Da die Fertigung solcher Teile aufwändig ist, können sie nicht billig sein. Eine Kostenschätzung zeigt, dass der Serienpreis eines in Serie gefertigten Ti-MMC-Bling etwa doppelt so hoch ist wie der einer konventionell durch Spanen eines Schmiederohlings hergestellten "Blink".

Aus diesem Grund wird diese Technik in absehbarer Zukunft hauptsächlich im militärischen Bereich Anwendung finden.

2.2.3 Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe (CMC)

Aufgrund der hohen Temperaturfestigkeit und der geringen Dichte ($\rho \approx 1,5 - 3,0$ g/cm³) ist Keramik ein attraktiver Werkstoff für den Triebwerkbau. Die geringe Verformbarkeit von monolithischen Keramikwerkstoffen vom Typ SiC, Al₂O₃ und Si₃N₄ schränkt ihren Anwendungsbereich jedoch erheblich ein. Daher konzentriert man sich heute auf faserverstärkte Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe, bei denen SiC, Kohlenstoff und Al₂O₃ als Fasern und SiC, Al₂O₃ oder Gemische (Al₂O₃ + SiO₂) als Matrix verwendet werden.

Setzt man heutige CMCs mehrere Hundert Stunden lang Temperaturen von über 1000 °C aus, können je nach Belastung und Faserwerkstoff, die nachstehenden Probleme auftreten:

Oxidfasern, wie z. B. Al₂O₃, sind thermodynamisch stabil, jedoch sind ihre Kriecheigenschaften nicht optimal. Andererseits können bei Nichtoxidfasern, wie z. B. SiC, deren Kriechverhalten einwandfrei ist, chemische Reaktionen zwischen Faser und Matrix auftreten (trotz der Schutzschicht auf den Fasern), die dann die Eigenschaften beeinträchtigen. Daher ist zu bezweifeln, ob die CMCs auf Dauer für Temperaturen über 1000 °C geeignet sind. Bei monolithischen Keramikwerkstoffen treten diese Probleme nicht auf, ihr Handicap ist jedoch die unzureichende Verformbarkeit und Risszähigkeit.

In der nahen Zukunft wird es nur wenige Anwendungen für CMCs geben. So ist z. B. die Verwendung für statische NDT-Bauteile (z. B. Austrittskegel, Austrittsklappen usw.) denkbar, nicht aber für den HDT-Bereich. Derzeit ist nur eine einzige Serienanwendung für CMC bekannt, nämlich die Austrittsklappen des Snecma-Triebwerks M88.

Wegen ihrer hervorragenden Temperaturfestigkeit im Kurzzeitbetrieb sind CMCs jedoch gut als Werkstoffe für Raketentriebwerke geeignet.

2.2.4 Intermetallische Werkstoffe (TiAl)

Seit einigen Jahren wächst das Interesse an intermetallischen Werkstoffen vom Typ TiAl oder Ti₃Al, da sie eine geringe Dichte aufweisen und bezüglich Temperaturfestigkeit herkömmlichen Ti-Legierungen überlegen sind. Ihr Schwachpunkt ist jedoch die Sprödigkeit, insbesondere bei niedrigen Temperaturen.

Durch geringfügige Änderungen der chemischen Zusammensetzung und durch Optimierung der Verfahrensparameter gelang es, die Duktilität von TiAl in etwa auf das Niveau der "normalen" im Triebwerkbau verwendeten Werkstoffe zu verbessern (Bruchdehnung bei Raumtemperatur 1,5 – 2 % und bei 750 °C etwa 3,5 %). TiAl-Teile sind normalerweise Feingussteile. Als typische Serienanwendungen kommen Schaufelblätter für die hinteren NDT-Stufen (siehe Abb. 6) oder HDV-Gehäuse in Frage, also Teile, die wegen der hohen Betriebstemperaturen nicht aus herkömmlichen Titanwerkstoffen gefertigt werden können. Die Gewichtseinsparung (im Vergleich zu gegossenen Nickellegierungen) ist beträchtlich, und die (gewichtsbezogenen) Festigkeitswerte sind nicht schlecht.

In den USA wurden TiAl-Laufschaufeln und -leitschaufeln bereits erfolgreich im Triebwerk erprobt. Trotz der positiven Testergebnisse müssen noch mehr Erfahrungen gesammelt werden, bevor eine endgültige Entscheidung über die Serienanwendung fällt.

Ti₃Al bietet keinerlei Vorteile gegenüber TiAl. Seine Dichte ist höher ($\rho \approx 4,5$ g/cm³) und die Bearbeitung kompliziert. Daher ist das Interesse an TiAl gering.

Die Entwicklung intermetallischer Nickelwerkstoffe wird nicht weiter verfolgt, da sie keinerlei Vorteile in Bezug auf Leistung oder Gewicht bieten.

2.2.5 Metallform-Spritzen (MIM = Metal Injection Moulding)

Das MIM-Verfahren hat sich in der Fertigung kleiner Präzisionsteile aus keramischen und metallischen Pulvern bewährt. Es ist mit dem Sintern verwandt.

Typische Anwendungsgebiete sind Befestigungselemente, Hebel, Stellglieder usw. für Kameras, Uhren und elektronische Geräte. Das Bauteilgewicht liegt zwischen 0,1 g und 100 g. Der Verfahrensablauf und einige Kenndaten sind in Abbildung 7 zusammengestellt. Die Verwendung feinkörniger Pulver ermöglicht die Herstellung komplexer endformnaher Teile mit engen Toleranzen und guter Oberflächenqualität ($R_t \approx 1 \mu\text{m}$).

Mit optimierten Parametern können sowohl fast volle Dichte ($p_{\text{rel.}} \approx 99,9 \%$) und mehr als 95 % der Festigkeit von Schmiedeteilen erreicht werden. Die fehlenden 5 % Festigkeit können durch entsprechende Werkstoffauswahl kompensiert werden.

Die Festigkeit eines Schmiedeteils aus IN 718 kann beispielsweise dadurch erzielt werden, dass man das Teil nach dem Pulverspritzgussverfahren aus Udimet 720 LI herstellt.

Aufgrund dieser Eigenschaften und des erheblichen Einsparpotentials nimmt das Interesse an diesen Werkstoffen für Triebwerkteile zu.

Bei MTU wurden die in Abbildung 7 dargestellten Teile bereits erfolgreich auf dem Prüfstand oder im Triebwerk getestet. Einige davon sind für die EJ200-Serienfertigung vorgesehen.

2.2.6 Spraycasting (Ringe und Gehäuse)

In Abbildung 8 ist das Verfahren schematisch dargestellt: Eine Legierung wird in einem Keramikschmelztiegel nach dem Vakuum-Induktionsverfahren erschmolzen und über einen Trichter einer Dosierblende zugeführt. Danach wird die Schmelze mit Hilfe von hochreinem Argon verdüst. Damit wird ein vorgewärmter Formkörper aus Stahl, der die Innenkontur des Bauteils einschl. des erforderlichen Aufmaßes für die Fertigbearbeitung aufweist, beschichtet.

Aufgrund der raschen Erstarrung ist der aufgespritzte Werkstoff feinkörnig (ASTM 5 – 7) und sehr homogen. Der Spritzkörper wird dann heißisostatisch gepresst und schließlich geschmiedet oder gewalzt.

Der Hauptvorteil des Verfahrens, das sich in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befindet, besteht darin, dass sowohl weniger Vormaterial als auch weniger Verfahrensschritte benötigt werden, was zum einen die Kosten senkt und zum anderen die Durchlaufzeit verkürzt. Nach Angaben von STI (Spray-form Technologies International), einer Tochterfirma von Howmet, sind die mechanischen Eigenschaften derart hergestellter Ringe aus IN 718 denen herkömmlicher geschmiedeter und gewalzter Ringe ebenbürtig. Dank des feinkörnigen Gefüges ist außerdem die Zerspanbarkeit verbessert (um über 25 % höhere Schnittgeschwindigkeit).

Triebwerkversuche mit einem HDT-Gehäuse für PW4000 (IN718, Spray Cast, heißisostatisch gepresst und gewalzt) über etwa 1000 Dauerlaufzyklen waren sehr erfolgreich.

Es ist davon auszugehen, dass derartige Bauteile, vor allem Turbinengehäuse, schon in wenigen Jahren in zivilen Serientriebwerken zum Einsatz kommen werden.

3 Fertigung

3.1 Allgemeine Forderungen / Trends

Der andauernde Konkurrenzkampf setzt die Triebwerkhersteller zunehmend unter Druck, Kosten zu senken und Lieferzeiten zu verkürzen, dabei aber gleichzeitig Leistung und Zuverlässigkeit der Triebwerke zu verbessern.

GE hat vor kurzem angekündigt, die Montagezeit für das CFM56-Triebwerk von derzeit 11 auf nur 7 Tage zu reduzieren. Im Fertigungsbereich wird es zu ähnlichen Verkürzungen der Durchlaufzeiten kommen müssen.

Dieses Ziel kann nur durch optimale Organisation der Abläufe im Fertigungsbereich und stabile Fertigungsprozesse erreicht werden. Eine weitere wichtige Voraussetzung sind motivierte und engagierte Mitarbeiter. Schlüsselbegriffe in diesem Zusammenhang sind **Fertigungszellen, optimierter Teiledurchlauf, Teamarbeit und Teammotivation**. Dies wird im Folgenden anhand einiger Beispiele erläutert.

Bei neuen Triebwerkprogrammen kommt noch dazu, dass die Basistechnologie bereits beim Programmstart vorhanden ist und nicht erst im Laufe des Programms entwickelt werden muss.

3.2 Schmieden und Feingießen / Halbfertigteile

Alle hochbeanspruchten Scheiben und Ringe sowie alle Schaufelblätter im Verdichterbereich sind Schmiedeteile, während alle Laufschaufeln und Leitschaufeln der Turbine Feingussteile sind. Obwohl einige Triebwerkhersteller noch eigene Schmieden und Gießereien betreiben, geht der Trend doch dahin, dass die "fortschrittlichsten" Bauteile von wenigen spezialisierten und weltweit tätigen Betrieben gefertigt werden.

Schmieden:

Kosteneinsparungen sind derzeit möglich durch Reduzierung des Rohteilgewichts (siehe Abb. 9). Dies kann durch Prozesssimulation erreicht werden (Systeme sind z. B. ALPID oder DEFORM). Die Simulation ist ein bewährtes Instrument für die Analyse und Optimierung von Werkstoff-Fluß, der Spannungen, Dehnungen, Temperaturen usw. Die heute verfügbaren Tools wurden soweit verbessert, dass auch metallurgische und physikalische Phänomene, wie z. B. die Rekristallisation und die Korngrößenverteilung simuliert werden können. Bei fortschrittlichen Scheibenwerkstoffen aus Ti- und Ni-Legierungen ist dies sehr wichtig, da das Parameterfenster sehr klein ist.

Auch künftig wird das Schmieden zu den wichtigsten Fertigungsverfahren gehören. Aufgrund der Kosten wird die Anwendung des isothermen Schmiedens auf hochfeste PM-Superlegierungen beschränkt bleiben.

Feingießen:

Bauteile mit komplizierter Geometrie, wie z. B. Leitkränze für Turbinen, werden integral gegossen und weisen ein polykristallines Gefüge auf. Optimale Werkstoffeigenschaften werden dagegen mit der Einkristalltechnologie erzielt. Der heutige Stand der Technik und die künftig zu erwartenden Entwicklungen sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Bei Einkristall-Schaufelblättern für die Hochdruckturbine liegt der Schwerpunkt derzeit auf der Verbesserung der Maßhaltigkeit und des Kühlwirkungsgrads durch eine komplexere Kühlkonfiguration im Inneren. Leitkränze werden bald schon mit gerichtet erstarrten oder Einkristall-Schaufelblättern hergestellt werden.

Die Gießereien stellen inzwischen Leitschaufeln und Laufschaufeln mit angegossenen Flanschen, Plattformen, Deckbändern usw. her, so dass der Aufwand in der Fertigung reduziert wird. Einige Betriebe bieten sogar fertige Laufschaufeln mit fortschrittlichen Beschichtungen an.

3.3 Fertigungstechnologie / Fertigteile

3.3.1 Werkstattorganisation

Die wichtigsten Aufgaben für die Zukunft sind die Verkürzung der Durchlaufzeiten und die Senkung der Kosten bei gleichzeitiger Verbesserung von Qualität und Flexibilität. Hierfür müssen die Abläufe sowohl in der Werkstatt als auch in den Bürobereichen der Fertigungsabteilungen neu organisiert werden. Schritte in die richtige Richtung sind die Optimierung des Bauteilflusses und die Minimierung von Schnittstellen.

Abbildung 11 zeigt den Ablauf der Scheibenfertigung vor und nach der Reorganisation. Die wichtigsten Unterschiede von **neuartigen Fertigungszellen** zur früheren Struktur sind der lineare Materialfluß, die Integration von (ehemals externen) Funktionen, wie z. B. Qualitätssicherung, Kugelstrahlen und ähnliche Verfahren, in die Fertigungszelle und der Aufbau einer Teamstruktur, die dem Team zum einen die Verantwortung überträgt, zum anderen aber die Freiheit lässt, ihre Abläufe selbst zu gestalten.

Unmittelbar nach der Schulung der Teams, bei der u. a. Qualitätsbewusstsein, Sicherheit und Sauberkeit in der Werkstatt und persönliche Identifikation mit dem Produkt behandelt wurden, waren ein deutlicher Anstieg der Qualität (um 55 % weniger Fehler) und eine Verkürzung der Durchlaufzeit um 25 % zu verzeichnen. Weitere Verbesserungen sind von Kaizen-Schulungen und verbesserten Wartungskonzepten für die Maschinen zu erwarten.

3.3.2 Spanen und Fügen

Allgemeines:

Seit vielen Jahren sinken die Kosten für die spanende Bearbeitung (nahezu) kontinuierlich. Dies ist zurückzuführen auf bessere Schneidwerkstoffe, Verfahrensverbesserungen bzw. Einsatz effizienterer Verfahren. Dieser Trend wird sich fortsetzen.

Mit der kommenden Generation von Schneidplatten aus ultrafeinkörnigem Hartmetall werden die Schnittgeschwindigkeiten beim Fräsen von Ti- und Ni-Legierungen deutlich erhöht werden. Für Ti-Legierungen gibt es noch keinen Schneidwerkstoff für das Hochgeschwindigkeitsdrehen. Dies hängt mit Problemen mit tribologischen Besonderheiten des Titans zusammen. Whisker-verstärkte Aluminiumoxid-Schneidplatten werden bald teilweise durch Si_3N_4 -Inserts ersetzt, die dieselbe Leistung bei niedrigeren Kosten bringen. Spanen ohne oder mit wenig Kühlschmierstoff ist sowohl bei Ti-Legierungen als auch bei Ni-Legierungen äußerst kritisch, da es nahezu unmöglich ist, stabile Prozesse sicherzustellen.

Der Stand der Technik und die zu erwartenden Trends in der Fertigung von High-Tech-Bauteilen für Flugtriebwerke lassen sich anhand der nachstehenden Beispiele verdeutlichen:

Blisk-Technologie:

Blisks (= bladed disks) mit einfacher Geometrie sind seit vielen Jahren bei Kleintriebwerken im Einsatz. In jüngster Zeit findet man Blisks in zunehmendem Maße auch in großen militärischen und zivilen Triebwerken. Das Triebwerk EJ200 (Eurofighter) hat sechs Blisk-Stufen, einschl. einer Fan-Stufe. Auch die Serienversion des BRR700 weist mehrere Blisk-Stufen auf.

Blisks können nach drei verschiedenen Verfahren hergestellt werden:

- Fräsen aus dem Vollen
- elektrochemisches Senken (ECM)
- Anfügen (durch lineares Reibschweißen) von fertigen Schaufelblättern an die Nabe

Fräsen:

Dies ist das herkömmliche Fertigungsverfahren und auf alle Fälle das schnellste für die Herstellung von Prototypen und Erprobungsteilen.

In der Serienfertigung kann das Fräsen bei relativ kleinen Titan-Schaukelblättern sehr wirtschaftlich sein, insbesondere wenn das Profil für „Flank Milling“ geeignet ist.

Bei der in Abbildung 12 dargestellten Blisk (Ti-Legierung, \varnothing 500 mm, 85 Schaufelblätter mit einer Sehnenlänge von 33 mm) dauert das Hochgeschwindigkeitsfräsen eines Schaufelblatts etwa 15 Minuten. Die Schnittgeschwindigkeit beim Vorfräsen beträgt ca. 100 m/min und beim Fertigfräsen annähernd 350 m/min. Gegenüber dem konventionellen Fräsen konnte mit den neuen Verfahren die Bearbeitungszeit auf unter die Hälfte reduziert werden.

Aufgrund des optimierten Fräsverfahrens kann geforderte Oberflächengüte von $R_z = 1,2 \mu\text{m}$ durch Gleitschleifen ohne manuelles Verrunden der Profilkanten erzielt werden.

In manchen Fällen kann es wirtschaftlich sein, zuerst durch Wasserstrahlschneiden Schlitze zwischen den Schaufelblättern herzustellen, um das nachfolgende Fräsen zu erleichtern. Nach diesem Verfahren können Werkstoffe bis zu einer Dicke von 100 mm geschnitten werden, auch die Herstellung bestimmter 3D-Konturen ist möglich.

Das Fräsen von Blisks aus Ni-Legierungen (für HDV-Stufen) ist wegen der schlechten Zerspanbarkeit des Werkstoffstoffs und wegen der sehr dünnen, kleinen Schaufelblätter im HDV-Bereich problematisch. Für die Herstellung dieser Bauteile ist die elektrochemische Bearbeitung besser geeignet.

Elektrochemische Bearbeitung (ECM):

ECM ist ein geeignetes, wirtschaftliches Verfahren für die Serienfertigung von Schaufelblättern mittlerer Größe an Blisks aus Titan bzw. Ni-Blisk mit kleinen Schaufeln.

Die Reproduzierbarkeit des ECM-Verfahrens ist hervorragend. Die Elektroden, mit denen die Kontur hergestellt wird, unterliegen keiner Abnutzung. Jedoch müssen die Verfahrensparameter, insbesondere die Konzentration, Temperatur und Leitfähigkeit des Elektrolyten, genau überwacht werden. Die Elektrodenform wird normalerweise in mehreren Schritten optimiert.

Sind die ECM-Parameter einmal festgelegt, ist das Verfahren sehr produktiv. Aus der (durch ECM, Fräsen oder Wasserstrahlschneiden) vorbereiteten Form kann innerhalb von nur 5 Minuten ein fertiges Schaufelblatt, einschl. der Ein- und Austrittskantenradien hergestellt werden. Die Größe des Schaufelblatts spielt dabei keine Rolle (sofern die elektrische Leistung ausreichend ist), ebenso wenig die Festigkeit des Werkstoffs.

Bei der MTU ist die Serienfertigung eines Ti-Blisks EJ200 (\varnothing 650 mm, 40 Schaufelblätter) auf einer 5-Achsen-ECM-Anlage (20.000 A) im Anlauf.

Abbildung 13 zeigt eine Blisk im Arbeitsbehälter (flowbox) der ECM-Anlage

Lineares Reibschweißen (LFW):

Das lineare Reibschweißen war ursprünglich als Verfahren zum Auswechseln schwer beschädigter Schaufelblätter, entwickelt worden.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass das Verfahren nicht nur für die Instandsetzung geeignet ist, sondern auch wirtschaftlich in der Neuteilfertigung eingesetzt werden kann.

Das Grundprinzip von LFW ist einfach: Eines der zu fügenden Teile ist fest eingespannt, das andere oszilliert linear. Durch Zusammenpressen der beiden Teile entsteht Reibungswärme, wodurch der Bereich der Schweißfuge auf Schmiedetemperatur erwärmt wird. Gleichzeitig werden die Teile gestaucht, und es entsteht ein Schweißwulst im Fügebereich. Dann wird die Oszillierbewegung innerhalb von 0,2 Sekunden an einer vorher bestimmten Position gestoppt. Der Schweißbereich zeichnet sich durch ein sehr feinkörniges Mikrogefüge mit ausgezeichneter Festigkeit aus.

Abbildung 14 zeigt MTUs LFW-Maschine und einen Ausschnitt einer nach diesem Verfahren hergestellten Blisk. Die anzuschweißenden Schaufelblätter sind fertig geschmiedet (bis auf einen Ansatz zum Einspannen). Nach dem Schweißen werden dann dieser Ansatz und der Schweißwulst durch adaptives Fräsen abgearbeitet. Adaptives Fräsen ist wegen der engen Toleranzen der Schaufelblätter erforderlich.

Bei großen Schaufelblättern ist das LFW für die Neuteilfertigung kostengünstiger als das Fräsen aus dem Vollen.

Bei MTU wurde die Serienfertigung von Blisks für das EJ200 nach diesem Verfahren aufgenommen, nachdem alle Versuche, u. a. Vogelschlagversuche, sowie eine Flugerprobung von über 400 Stunden erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

Bis heute wurden ca. 200 dieser Blisks problemlos gefertigt.

Die Anwendung des LFW-Verfahrens für das Auswechseln beschädigter Schaufeln ist komplizierter als in der Neuteilfertigung, da die instand zu setzenden Blisks fertig bearbeitet, dünnwandig und verformungsanfällig sind. Diese Instandsetzung (Heraustrennen des beschädigten Schaufelblatts und Einschweißen eines neuen) kann zweimal je Schaufelblatt durchgeführt werden. Die formelle Zulassung des LFW als Instandsetzungsverfahren läuft derzeit.

Herstellung von lebensdauerkritischen Bohrungen:

Flanschbohrungen an Scheiben und rotierenden Ringen sind kritische Bereiche. Falsche Fertigungsparameter können im Triebwerksbetrieb fatale Folgen haben. Daher ist beim Herstellen dieser Bohrungen genau nach Vorschrift zu arbeiten.

Das Verfahren unterliegt einer strengen Kontrolle, ferner ist ein Monitoring System vorgeschrieben, das folgende Parameter kontrolliert:

- Stromverbrauch des Spindelantriebs
- Schnittkräfte
- Kühlmitteldurchsatz

Das System löst einen Alarm aus, bevor die Toleranzgrenze erreicht wird ("gelber" Grenzwert). Dann müssen ggf. die Werkzeuge ausgewechselt werden. Außerdem ist das gerade gebohrte Loch einer Sichtprüfung zu unterziehen. Bei Überschreitung der Toleranz ("roter" Grenzwert), müssen spezielle Kontrollen durchgeführt werden. Je nach deren Ergebnissen muss die Bohrung nachgearbeitet oder das Bauteil verschrottet werden.

Die Herstellung von kritischen Bohrungen ist teuer. Trotzdem oder gerade deshalb ist es notwendig, die Kosten zu reduzieren. Ein eindrucksvolles Beispiel ist in Abbildung 15 dargestellt. Durch Änderung des Arbeitsablaufs und durch Optimierung der Parameter konnten sowohl Qualität als auch Prozessstabilität bei gleichzeitiger erheblicher Verkürzung der Bearbeitungsdauer verbessert werden.

Drehfräsen:

Drehfräsen ist ein neues Verfahren zur Herstellung rotationssymmetrischer Bauteile (Scheiben). Die Anlage ist vergleichbar mit einer Drehmaschine, jedoch werden anstelle von Drehmeißeln rotierende Fräser verwendet (siehe Abb. 16). Durch den unterbrochene Schnitt entstehen kurze Späne und die Schneidwerkzeuge können wirksam gekühlt werden. Dies ist besonders vorteilhaft bei Ti-Werkstoffen: Wegen tribologischen Problemen können für Titan keine Schneidplatten aus Keramik oder CBN verwendet werden. Daher ist die Schnittgeschwindigkeit beim Drehen mit Hartmetallschneiden bei der Vorbearbeitung auf 50 m/min begrenzt. Beim Fräsen dagegen können wegen der verbesserten Kühlmöglichkeiten wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten gewählt werden.

Beim Drehfräsen von Titan kann die Schnittgeschwindigkeit im Vergleich zum normalen Drehen wesentlich erhöht werden. Dadurch verdoppelt sich das Zeitspannvolumen, Zeit und Kosten werden eingespart.

Da die meisten Drehfräsmaschinen 5- oder sogar 6-Achsen-Maschinen sind und große Werkzeugmagazine haben, können mehrere Arbeitsgänge, einschl. Bohren von Löchern und Fräsen, in einer Aufspannung. Dies wirkt sich vorteilhaft auf Qualität, Durchlaufzeit und Kosten aus.

MTU hat das Drehfräsen in der Serienfertigung von EJ200-Bauteilen eingeführt.

Schleifen von Turbinenlauf- und -leitschaufeln:

Das Schleifen wird herkömmlicherweise auf Einzelmaschinen oder – bei großen Losgrößen – in automatischen Schleifanlagen mit integrierten Messsystemen zur Maßkontrolle durchgeführt.

Solche Schleifanlagen sind teuer (5 bis 10 Mio. US-\$) und nicht sehr flexibel. Daher müssen neue Konzepte entwickelt werden. Abbildung 17 zeigt eine Fertigungszelle (sog. SmP-Linie) für NDT-Laufschaukeln, die für maximale Flexibilität, niedrige Kosten und kurze Durchlaufzeiten ausgelegt ist. Eine solche Zelle ist bei MTU seit Herbst 1999 in Betrieb.

Die gezeigte Fertigungszelle besteht aus fünf kleinen, kostengünstigen Schleifmaschinen plus Messseinrichtungen und dem Zubehör für das Entgraten usw. Die Bauteile durchlaufen diese Zelle in einer Richtung. Bedient wird die Anlage von einem Team von nur 3 Facharbeitern. Jede Schleifmaschine ist mit zwei Vorrichtungen für das manuelle Einspannen der Laufschaukeln ausgestattet. So können in einer Zelle bis zu 10 Schleifarbeitsgänge durchgeführt werden. Geschliffen wird mit Aluminiumoxid-Schleifscheiben, die zwischen den einzelnen Schleiffolgen jeweils abgerichtet werden. Alle Arbeitsgänge in der Zelle, einschl. DV-gestützte Maßkontrolle, Kennzeichnen, Entgraten und Reinigen der Schaufeln werden vom Team durchgeführt.

Die Durchlaufzeit konnte von 10 Tagen in der herkömmlichen Werkstatt auf nur einen Tag verkürzt werden. Den motivierten Teams und der Tatsache, dass weniger Transportschäden auftreten, ist es zu verdanken, dass auch die Qualität gesteigert werden konnte.

Die Kosten der Bearbeitung konnten im Vergleich zum früheren Ablauf um 50 % gesenkt werden. Aufgrund dieser positiven Erfahrungen werden weitere solcher Zellen installiert.

4 Oberflächentechnik

4.1 Allgemeines

Die Leistung moderner Flugtriebwerke hängt in hohem Maße von der Qualität der Bauteiloberflächen ab. Die meisten **Grundwerkstoffe** sind für bestimmte Eigenschaften ausgelegt, z. B. Festigkeit, Temperaturbeständigkeit usw. Sind für bestimmte Bauteile **spezielle Oberflächeneigenschaften** gefordert, müssen Verfahren wie **Beschichtungen, Kugelstrahlen usw.** angewandt werden.

Die Bedeutung der Oberflächenbehandlung wird noch zunehmen, und zwar aus folgenden Gründen: Zum einen ist das Verbesserungspotential der klassischen im Triebwerksbau verwendeten Werkstoffe begrenzt, und zum anderen werden Wirkungsgrad, Leistung und Lebensdauer der Triebwerke durch verbesserte Aerodynamik, höhere Verbrennungstemperaturen und höhere mechanische Beanspruchung der Bauteile gesteigert werden. Dies erfordert eine bessere Qualität der Bauteiloberflächen (vor allem Schaufeln bei Verdichtern, verbesserte Luftdichtungen, Wärmedämmschichten auf rotierenden Bauteilen, wirksamere Verschleißschutzschichten usw. Die Zukunft wird also die Oberflächentechnik vor viele neue Herausforderungen stellen.

4.2 Mechanische Feinbearbeitung

Für viele Bauteile, z. B. Blisk-Schaufelblätter, sind optimale HCF-Eigenschaften und eine geringe Oberflächenrauheit gefordert. Nach der Fertigbearbeitung werden solche Bauteile daher häufig kugelgestrahlt und anschließend einer maschinellen Feinbearbeitung unterzogen, um Bearbeitungsspuren zu entfernen und die durch das Spanen oder Strahlen aufgerauhten Flächen zu glätten. Polieren oder Verrunden von Hand ist normalerweise nicht zulässig. In Abbildung 18 ist die Feinbearbeitung großer Blisk-Schaufelblätter durch Druckfließläppen (AFM – Abrasive Flow Machining) dargestellt. Bei diesem Verfahren wird eine viskose Paste mit Schleifpartikeln über die Oberflächen geführt. Dabei werden Rauheitsspitzen abgetragen und die Ein- und Austrittskanten verrundet. Da die Abtragsrate an den Kanten nicht gleich der Abtragsrate an den konvexen und konkaven Flächen ist, muss das Spanen vor dem AFM so optimiert werden, dass das Bauteil nach dem AFM die Zeichnungsforderungen erfüllt. In dem dargestellten Beispiel beträgt die Läppdauer 15 Minuten pro Schaufelblatt. Bei kleineren Schaufelblättern ist es üblich, alle Schaufelblätter gleichzeitig zu bearbeiten.

Andere Verfahren der Feinbearbeitung sind Trommelpolieren oder Gleitschleifen, teils unterstützt durch chemische Prozesse. Diese Bearbeitungsverfahren arbeiten relativ langsam, die Anlagen und Vorrichtungen sind jedoch nicht teuer, und die ständige Anwesenheit eines Werkers ist nicht erforderlich. Daher werden solche Verfahren künftig wahrscheinlich verstärkt zum Einsatz kommen.

4.3 Beschichtungen

Die allgemeinen Forderungen nach Kostenminimierung und Durchlaufzeitverkürzung und nach Verbesserung der Prozessstabilität und Qualitätssteigerung haben in der Beschichtungstechnik hohe Priorität, da viele Schichten teuer sind und die Stabilität einiger Verfahren nicht optimal ist. Kosteneinsparungen und/oder Qualitätsverbesserungen lassen sich bisweilen durch Einsatz alternativer Verfahren erzielen.

Beispiele:

Das Niederdruck-Plasmaspritzen von MCrAlY-Schichten kann teilweise durch die "billigen" Verfahren Alitieren plus atmosphärisches Plasmaspritzen von MCrAlY ersetzt werden.

Das atmosphärische Plasmaspritzen von MCrAlY-Schichten kann in Zukunft teilweise durch Schlicker-Verfahren ersetzt werden.

Dass auch die Optimierung der Fertigungsfolgen zur Kostensenkung beiträgt, zeigt dieses Beispiel: HDT-Laufschauflern werden normalerweise erst geschliffen und dann diffusionsbeschichtet. Vor dem Beschichten müssen zum Teil fertig bearbeitete Flächen abgedeckt werden, was Kosten verursacht. Durch Änderung des Ablaufs, d. h. erst das Beschichten und dann das Schleifen, kann das Abdecken entfallen.

Thermisches Spritzen:

Das thermische Spritzen ist im Triebwerksbau von großer Bedeutung. Thermisch gespritzt werden u. a. Luftdichtungen, Wärmedämmschichten, Korrosions- und Oxidationsschutzschichten, Verschleißschutzschichten usw.

Die Stabilität der Verfahren entspricht jedoch nicht den heutigen Erwartungen. Außerdem sind bis heute die sehr komplexen Vorgänge in der Spritzpistole bei der Zuführung und beim Schmelzen des Pulvers sowie beim Abscheiden der Schicht auf der Oberfläche noch nicht vollständig erforscht. Ein erster Schritt zur Verbesserung ist die Einführung eines Online-Überwachungssystems sowohl für den Plasmastrahl als auch für die Schicht.

Bei der Überwachung des Plasmastrahls liegt der Schwerpunkt auf der Messung der Geschwindigkeit und Temperatur der Partikel, der optischen Analyse des Strahls (durch digitale Bildverarbeitung) und der spektroskopischen Analyse des Plasma und des Pulvers. Am Bauteil werden Temperatur und Dicke bzw. Dickenzuwachs der Schicht kontinuierlich gemessen.

- Der unmittelbare Vorteil der Online-Überwachung ist, dass Unregelmäßigkeiten sofort erkannt und die betroffenen Bauteile unverzüglich auf Fehler kontrolliert werden können. Außerdem können dann die Parameter so geregelt werden, dass sie wieder im Toleranzbereich liegen.
- Mittelfristig sollen die Korrelationen zwischen Parameterabweichungen und den daraus resultierenden Abweichungen der Schichteigenschaften ermittelt werden. Sind diese Korrelationen bekannt, können spezielle Abhilfemaßnahmen entwickelt werden.

Es wird erwartet, dass dadurch die Verfahrensstabilität und die Schichtqualität verbessert werden können, was wiederum die Kosten senkt, den Nacharbeitsaufwand reduziert und die Durchlaufzeiten verkürzt.

Wenn der Prozess stabil ist, kann die Anzahl von Proben (für die Härteprüfung, die Prüfung der Haftfestigkeit usw.) wesentlich reduziert werden. Heute müssen noch vor und nach jedem Los solche Proben gespritzt und geprüft werden, was mit hohen Kosten verbunden ist.

Die beschriebene Überwachung könnte das Verständnis der komplexen physikalischen Phänomene beim Plasmaspritzen verbessern und die Grundlagen für eine Verfahrenssimulation als Tool für die Optimierung schaffen.

Schaufelspitzenpanzerung:

Luftdichtungen (Einlaufbeläge in Gehäusen und harte Beläge auf Schaufelspitzen) sind wichtig für den Wirkungsgrad von Verdichter und Turbine. Sie sollen Spaltverluste an der Schaufelspitze und Verschleiß im Fall des Anstreichens minimieren. Bei Turbinenschauflern ist das galvanische Aufbringen von Schleifpartikeln durch Galvanisieren übliche Praxis, bei Verdichterschauflern sind Spitzenbeläge relativ neu und noch nicht so weit verbreitet.

Einlaufbeläge in Verdichtergehäusen werden normalerweise durch thermisches Spritzen aufgebracht. Zur Verbesserung der Beständigkeit gegen Erosion (durch Partikel im Luftstrom) sind bei den neuesten Triebwerken höhere Härte und geringere Porosität vorgeschrieben. Dementsprechend müssen auch die Schaufelspitzen gegen Verschleiß (oder auch Titanfeuer) im Falle des Anstreichens geschützt werden. Wenn es zum Kontakt kommt, sollte die Schaufelspitze in den Einlaufbelag einschneiden und nicht anstreifen. Dies wird dadurch erreicht, dass man die Schaufelspitzen mit Schleifpartikeln beschichtet (siehe Abb. 19). Bei diesem Verfahren werden CBN-Partikel mit einem Durchmesser von

etwa 100 – 150 µm entlang der Sehne des sehr dünnen Profils aufgelötet. Die einzelnen Schritte des Verfahrens sind aus Abbildung 19 ersichtlich. Angesichts der kleinen Abmessungen ist klar, dass hier jeder Arbeitsgang mit größter Sorgfalt ausgeführt werden muss. Dies gilt insbesondere für den robotergestützten Auftrag der CBN-Partikel und das Induktionslöten, das nur wenige Sekunden dauert. Die Temperatur wird mit Hilfe einer Thermografie-Kamera überwacht; sie muss einerseits über der Liquidus-Temperatur des TiCuNi-Lots liegen, andererseits aber unter der β -Transus des Schaufelwerkstoffs (Ti-Legierung), um eine drastische Verschlechterung der dynamischen Festigkeitseigenschaften zu vermeiden. Nach dem erfolgreichen Abschluss aller Triebwerktests laufen nun die Vorbereitungen für das Serienbeschichten von HDV-Laufschaukeln für das EJ200.

Der Schwerpunkt der künftigen Arbeiten in diesem Bereich liegt auf der Verbesserung der Prozessstabilität und der Senkung der Kosten.

Alternativ wurden spezielle Lote für diesen Anwendungsbereich getestet, die die Schleifpartikel bereits enthalten. Die Ergebnisse sind vielversprechend. Die neuen Lote sind einfach zu handhaben und das vorherige Aufbringen der Partikel auf die Schaufelspitze entfällt.

Auch Schlicker-Verfahren werden auf ihre Eignung für diesen Zweck untersucht.

Wärmedämmschichten (TBC – Thermal Barrier Coatings):

Seit etwa zwei Jahrzehnten werden Wärmedämmschichten durch Plasmaspritzen auf nicht rotierende Triebwerkteile aufgebracht, z. B. auf Brennkammern und Plattformen/Schaukelblätter von HDT-Leitschaukeln.

Abbildung 20 (oben) zeigt eine atmosphärisch plasmagespritzte Wärmedämmschicht aus yttriumstabilisiertem Zirkonoxid. Die Haftschiicht besteht aus MCrAlY, aufgebracht durch Niederdruck-Plasmaspritzen. Das Gefüge der Wärmedämmschicht ist gekennzeichnet durch horizontale Lagen mit homogener Porosität. TBCs mit einem derartigen Gefüge können im Einsatz aufgrund von Makrorissen, verursacht durch Thermoermüdung der Zirkonoxidschicht, abplatzen. Auf die komplexen Schadensmechanismen soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Das Plasmaspritzen ist nicht für das Aufbringen von Wärmedämmschichten auf rotierende Teile geeignet.

Abbildung 20 (unten) zeigt eine nach dem EB-PVD-Verfahren (Electron Beam Physical Vapor Deposition) aufgebrachte Wärmedämmschicht. Sie weist ein zur Oberfläche senkrecht, nadeliges Gefüge ohne sichtbare Fehler auf. Solche Schichten werden seit einigen Jahren mit Erfolg auf die Schaufelblätter von HDT-Laufschaukeln und auch auf Leitschaukeln aufgebracht. Ihre Beständigkeit gegen thermische Ermüdung hat sich als sehr gut erwiesen.

Kommt es zu Schäden an der Schicht, sind diese normalerweise auf Oxidation an der Trennfläche zwischen Haftschiicht und Deckschiicht zurückzuführen.

Ein Nachteil der EB-PVD-Schichten sind jedoch die hohen Kosten. In eine Anlage für die Serienfertigung müssen immerhin mindestens 10 Mio. US-\$ investiert werden.

Angesichts der steigenden Verbrennungstemperaturen werden solche Wärmedämmschichten bei neuen Triebwerken auf die HDT-Schaukelblätter und sogar auf die Schaufeln der ersten NDT-Stufe aufgebracht werden.

SNECMA und MTU haben 1999 ein Joint Venture gegründet (Fa CCC, Chatellerault) Dort werden HDT-Lauf- und Leitschaukeln eigener Triebwerke sowie Triebwerkschaukeln für Kunden nach dem EB-PVD-Verfahren beschichtet.

5 Schlussbemerkungen

Obwohl in nächster Zukunft keine Änderungen im Grunddesign von Flugtriebwerken zu erwarten sind, wird es doch zu einer Leistungssteigerung kommen, und zwar durch Verbesserungen in der konstruktiven Auslegung und bei Werkstoffe sowie Fortschritte in der Fertigungs- und Oberflächentechnik.

Der Wettbewerb auf dem Triebwerkmarkt zwingt alle Hersteller, die Kosten zu senken, die Durchlaufzeiten verkürzen und gleichzeitig die Qualität zu verbessern. Dies bedeutet eine große Herausforderung für die Fertigungstechnik.

Obwohl das Verbesserungspotential der traditionell verwendeten, monolithischen Ti- und Ni-Legierungen begrenzt ist, werden diese Werkstoffe nach wie vor eine wichtige Rolle spielen.

Werkstoffe mit besserem Verhältnis Festigkeit/Gewicht sind entweder intermetallische Werkstoffe oder faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit Polymer-, Metall- oder Keramikmatrix. Von diesen konnten sich bisher nur die Polymermatrix-Verbundwerkstoffe etablieren. Trotz erfolgreicher Triebwerkversuche muss für die anderen "Kandidaten" erst noch nachgewiesen werden, dass sie mit stabilen, genau kontrollierten Prozessen und zu vertretbaren Kosten hergestellt werden können. Eine strenge Verfahrenskontrolle ist unabdingbar, zumal es kaum ZfP-Verfahren gibt, mit denen Fehler in Verbundwerkstoffen, Ti-MMCs und anderen neuartigen Werkstoffen festgestellt werden können.

Sowohl in der Fertigungstechnik als auch in der Oberflächentechnik liegt der Schwerpunkt auf Kostensenkung, Durchlaufzeitverkürzung und Qualitätssteigerung. Diese Ziele können nur mit stabilen Prozessen erreicht werden. Die Verbesserung der Prozessstabilität hat daher höchste Priorität. Die Stabilität kritischer Verfahren ist durch kontinuierliche Überwachung aller wichtigen Parameter nachzuweisen.

Im Werkstattbereich wurden (bauteilbezogene Fertigungszellen installiert, bedient durch effiziente Teams). Besonderes Augenmerk liegt dabei auf einem optimierten Materialfluss und der Integration der Qualitätssicherung und anderer "Hilfsfunktionen" in die Zelle. Damit konnten erhebliche Kosteneinsparungen und Durchlaufzeitverkürzungen erzielt werden.

Die Blist-Fertigung ist ausgereift. Als Verfahren kommen Hochgeschwindigkeitsfräsen, ECM und lineares Reibschweißen zur Anwendung.

Die Effizienz von spanabhebenden Verfahren wird weiter verbessert werden, und zwar durch bessere Schneidwerkstoffe und neue Maschinen (Drehfräsmaschinen, kostengünstige Schleifmaschinen usw.).

Noch nicht klar ist, ob Werkzeugmaschinen mit Stabkinematik (z.B. Hexapod) bereits soweit ausgereift sind, dass sie in der Serienfertigung von Triebwerkteilen verwendet werden können.

Lasergestütztes Zerspanen und Zerspanen ohne Kühlschmiermittel sind nicht für den Triebwerkbau geeignet.

Viele Triebwerkteile werden durch thermisches Spritzen beschichtet. Die Stabilität dieses Verfahrens muss aber noch erheblich verbessert werden. Die Arbeiten in diesem Zusammenhang, u. a. Entwicklung von Methoden der Verfahrensüberwachung, Spritzstrahlidiagnose und Thermographie, gehen gut voran.

Das Aufbringen von Wärmedämmschichten auf rotierende Schaufelblätter wird an Bedeutung gewinnen, ebenso wie das Aufbringen von verschleißfesten Belägen auf Laufschaufelspitzen zur Verbesserung der Luftdichtungen in modernen Triebwerken.

Wie man sieht, werden die nächsten Jahre eine Reihe interessanter Aufgaben und Herausforderungen für die Triebwerkindustrie bringen.

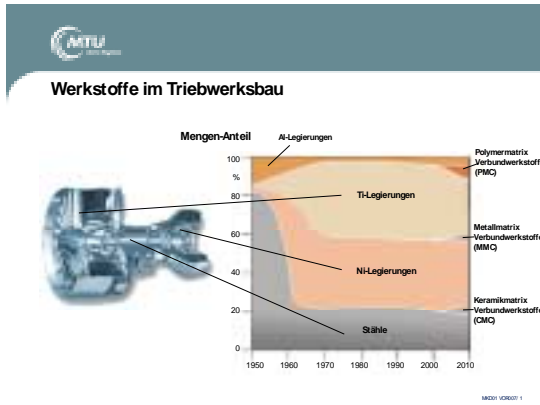


Abbildung 1

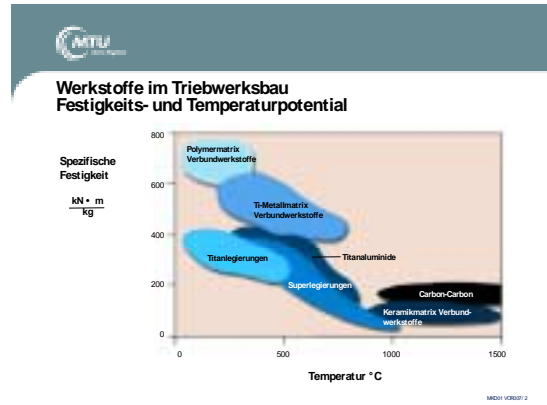


Abbildung 2

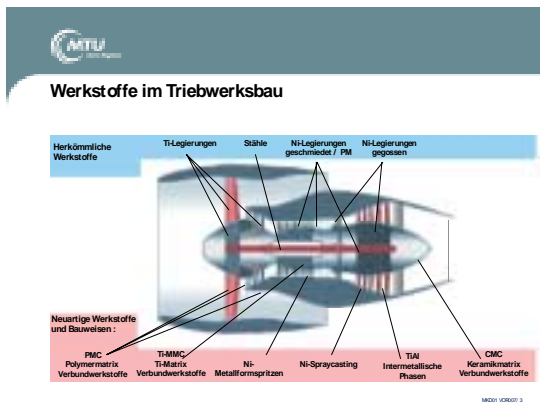


Abbildung 3

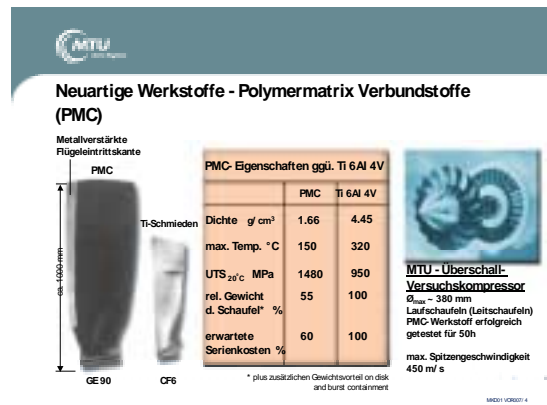


Abbildung 4

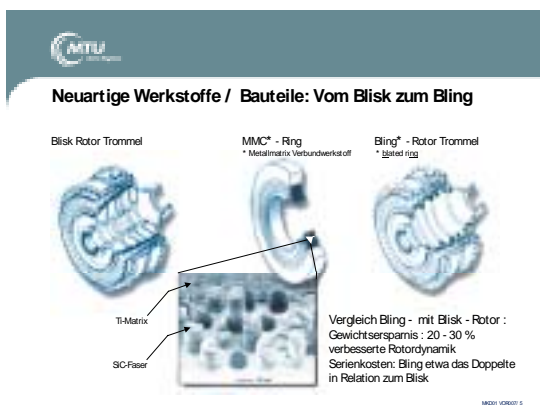


Abbildung 5

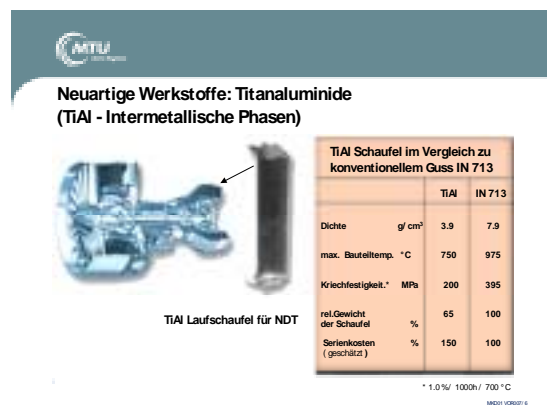


Abbildung 6

Neuartige Werkstoffe/ Bauweisen: Metal-Form-Spritzen (MIM)

Hauptprozesse:
 Pulver Zerkleinern > Mischen > Metal-Form-Spritzen > Ausformen > Sintern (Endkontur / volle Dichte)

Fertiggeformte Präzisionsteile
 Gewicht 0.1 -100g
 HDV Lauf- & Leitschaukeln, Hebel, Verschlüsse

	MIM	konvent. geschmiedet
Werkstoff	U720 LI**	IN 718
Verfahren	vorgeformt	Schmieden + ECM
rel. Dichte %	99.95	100
HCF-Stärke %	95	100
Serienkosten %	- 40-50	100

Anmerkung: sogar „schwierige“ Legierungen können mit MIM einfach hergestellt werden

** LI = Low Interstitial
IN718

Abbildung 7

Neuartige Werkstoffe/ Bauweisen: Spraycasting (Ringe und Gehäuse)

Verfahren: Metall wird auf rotierende Spindel gesprüht. Rasche Erstarrung ergibt homogenen, feinkörnigen Werkstoff (ASTM 5-7)

Vorteile: anschließendes Hippen und Walzen ergibt gleiche oder bessere mechan. Eigenschaften als konventionell geschmiedet bei verbesserter Zerspanbarkeit. Potential für Legierungen mit höherer Temperaturfestigkeit als derzeit bei geschmiedeten oder PM-Superlegierungen zu erreichen ist

Verkürzte Durchlaufzeiten/ geeignet für Rapid Prototyping
 20-40 % Kosteneinsparung ggü. konvent. Fertigung

Potential für rotierende Teile, z.B. Dichtungen
(STI: Sprayform Technologies International)

Abbildung 8

Schmieden von Superlegierungen Gewichtsreduzierung durch verbesserten Schmiedeprozess/ Prozess-Simulation

Werkstoff IN 718

US-Kontur
 Endkontur
 Integraler Testring

9 630 mm

(alt) 91kg / Jahr 1986 (neu) 76kg / Jahr 1996

Schmiedetemperatur für Superlegierungen

1400
 1200
 1000
 800
 600

Risse aufgrund von lokalem Anschmelzen oder Kornvergrößerungen
 Zulässiger Temperaturbereich beim Schmieden
 Risse durch Kaltverfestigung

IN718 Waspalloy U720 PM Li

Abbildung 9

Feingießen

SX Schaufelblatt

Ein-kristall (SX)
 gerichtet erstarrt (DS)
 polykristallin

Heutiger Stand der Technik
 Leitschaukel-Segment
 Integraler Leitkranz

Geometrische Komplexität

Die Hauptaufgabe besteht in der Optimierung der Werkstoffeigenschaften und der geometrischen Komplexität.

Trends:

- Einkristallschaufelblätter: Verbesserung der Toleranzen und Komplexität des inneren Kühlsystems
- Leitschaukelringe: Verbesserung der Werkstoffeigenschaften des Schaufelblatts bzgl. DS oder SX
- im allgemeinen: Abzug endkonturnah, um den Fertigungsaufwand zu reduzieren

Abbildung 10

Teilefluss bei zivilen Scheiben

Bisherige Werkstattstruktur: ungeordneter Bauteilfluss

chem. Reinigen/Ätzen
 Packen
 EDM / Kugelstrahlen
 Schleifen
 Drehen
 Fräsen
 Entgraten
 Verrunden
 Tiefschleifen
 Polieren
 Schneiden
 SMAP
 Drehen
 Drehen
 Bohren/ Fräsen
 chem. Reinigen/Ätzen

Neuartige Fertigungszellen: linearer Bauteildurchlauf

chem. Reinigen/Ätzen
 Packen
 EDM / Kugelstrahlen
 Schleifen
 Drehen
 Drehen
 Drehen
 NC Verrunden
 Bohren/ Fräsen
 Fräsen
 Tiefschleifen
 Polieren
 Schneiden
 Drehen
 Drehen
 chem. Reinigen/Ätzen

Abbildung 11

Hochgeschwindigkeitsfräsen von Ti-Legierungen

Bei der MTU ist Hochgeschwindigkeitsfräsen ein Standardprozess zur Herstellung dünnwandiger Präzisionskomponenten aus Ti-Legierungen

Anwendungen:

- Fräsen von Blisk-Schaufelblättern
- adaptives Fräsen von Schaufelblättern des LPW*- Blisks
- kreisförmiges Fräsen von geformten Löchern

Charakteristika:

- Fräsgeschwindigkeit bis zu $v_f = 350$ m / min (Fertigräsen)
 100 m / min (Vorfräsen)
- reduzierte Fräskräfte ggü. konventionellen fräsen
- verbesserte Genauigkeit
- verbesserte Oberflächenqualität (vorfräsen / restliche Belastungen)

Blisk- fräsen durch HSC*
* Hochgeschwindigkeitsfräsen

Reduzierung der Bearbeitungszeit um etwa 60%
* Lineares Peilschaufelblat


Abbildung 12

ECM Blisk (ECM = electro-chemical machining / elektrochemisches Senken)

- Ø 650 mm / 40 Schaufelblätter / Profillänge 72 mm / Schaufellänge 100 mm
- Werkstoff: Ti 6Al 4V
- Ausgangszustand: vorgefräst, ca. 2 mm Aufmaß
- Electrolyt: NaCl
- Stromdichte: ca. 0.5 A / mm²
- Vorschubgeschw.: ca. 1 mm / min

ECM erzeugt fertige Schaufelblätter
fertige Kanten
fertige ausgeformte Übergangsradien

Oberflächenrauigkeit $R_a = 5 - 10 \mu\text{m}$
Bearbeitungszeit ECM: 5 Min pro Schaufelblatt



ECM-Elektroden
Flowbox

Flowbox mit ECM - Blisk

IMECH | IOR027 | 13

Abbildung 13

LFW Blisk E200 (LFW = Lineares Reibschweißen)

LFW-Maschine: mechanischer Antrieb

- max. Frequenz 50 Hz
- max. Amplitude 3 mm
- max. Blisk Durchmesser 1100 mm

Alle Tests inklusive Vogelschlag wurden erfolgreich abgeschlossen
Ersetzen von beschädigten Schaufeln wird gezeigt

Mehr als 400 h Flugerfahrung (Stand April 2000)

Mehr als 100 Blisks LPC1 / 2 angefertigt



MTU's LFW-Maschine



Adaptives Präsen nach LFW

IMECH | IOR027 | 14

Abbildung 14

Bearbeitung von lebenskritischen Löchern

Prozess Überwachung beim Rohrbohren **Prozess Optimierung**

Ti-Scheibe; Ø 500 mm / 24 Löcher; Ø 6.7 mm; Tiefe 14 mm

Vor der Optimierung Nach der Optimierung

2 Maschineneinstellzeiten	1 Maschineneinstellzeit
Operationssequenz: Seite 1: • vorbohren • zweite Bohrung • vor nachbohren • finales nachbohren • kreisfräsen Randradius Seite 1	• vorbohren • zweite Bohrung (einzelne Drehbohrung, Oberflächen schneiden, 1 flute) • kreisfräsen Randradius auf Seite 1 • kreisfräsen Randradius Seite 2
Wechsel zu Seite 2: • kreisfräsen Randradius	
6 Bearbeitungsschritte	4 Bearbeitungsschritte
gesamt: Prozessstabilität: mittlere Bearbeitungszeit: 520 min	sehr gut 180 min

Kontrollfeld für
• Energie für Spindeltrieb
• Zerspankräfte
• Kühlströmung

IMECH | IOR027 | 15

Abbildung 15

Drehfräsen von Triebwerksbauteilen

Drehfräsen: Neue Methode zur Bearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen, Scheiben, usw.
Fräser und Bestandteil rotieren unterbrochenes Schneiden → kurze Späne

5- und 6-Achsen-Maschinen mit Werkzeugmagazinen ermöglichen mehrere Arbeitsgänge in einer Aufspannung z.B. Bohren von Löchern in Flansch, fräsen von Zacken usw., begünstigen: reduzierte Vorlaufzeiten, verbesserte Genauigkeit.

Besonders vorteilhaft bei Ti-Legierungen:
• Metallabtragsrate ist höher als beim herkömmlichen Drehen
• Reduktion der Bearbeitungskosten bis zu 50%



IMECH | IOR027 | 16

Abbildung 16

Schleifen von Turbinenschaufeln

Ziel: Reduzierung von Kosten und Durchlaufzeiten
Verbesserung von Qualität und Flexibilität

- geringe Investition: 5 Schleifmaschinen (3-achsrig, robust) + Equipment kosten weniger als 0.8 Mio.€
- Hart-Spannen der Schaufeln
- Team: nur 3 Facharbeiter, vielseitig einsetzbar
- Durchlaufzeit: 1 Tag (vorher 10 Tage)
- Qualität: verbessert
- Bearbeitungskosten: - 60% ggü. konventionell
- 30% ggü. Schleifzellen



Messung
Anspannen
Schleifen
Entgraten
Nachspannen
Messen
Teile aus
Teile an
Qualitäts Station 1

IMECH | IOR027 | 17

Abbildung 17

Mechanische Feinbearbeitung von Blisks

Die Oberfläche jedes Blisk Schaufelblattes wird nach dem Fräsen geglättet, elektrochemisch bearbeitet oder kugeligestrahlt.
Typisch: $R_a = 0.5 \mu\text{m}$ für fertige LPC- Schaufelblätter
 $R_a = 1.5 \mu\text{m}$ für gefertigte HPC- Schaufelblätter

Entsprechende Prozesse:
• Druckfließlappen (AFM)
• Trommel- / Vibropolieren
• chemische Verfahren

Der optimale Prozess ist abhängig von:
• Größe und Komplexität des Schaufelblattes
• Material
• Rauheit vor dem Feinbearbeitungsprozess
• Zeichnungsforderungen



AFM eines Blisks (Ø 700mm)
AFM eines einzelnen Schaufelblattes
für kleinere Teile
integrates AFM eines gesamten Blisks

IMECH | IOR027 | 18

Abbildung 18

Verschleißfeste Schaufelspitzenbeläge mit CBN

Induktionslöten in Argon-Kammer
Struktur eines hartgelöteten CBN-Partikels
Schaufelspitzenbeläge nach dem Test

Das Ziel: Verhütung von Spitzen *clearance* verluste und Verschleiß

Prozess Schritte:

- Laserschneiden von *filler foils*
- tack-weld foils* auf Schaufelspitzen
- anbringen von CBN-Partikeln auf den Spitzen (von Robotern)
- Induktionslöten in Argon Atmosphäre

Alle Tests wurden erfolgreich abgeschlossen
Anwendung für die Serienproduktion des E200

IME01-VR0017-19

Abbildung 19

Wärmedämmschichten (TBC - Thermal Barrier Coatings)

Plasmaspritzten TBC auf nicht rotierenden Triebwerksteilen

- Haftschicht: Mg/AlY (durch Niederdruck-Plasmaspritzten)
- TBC: ZrO₂ / Y₂O₃ (atmosphärisch plasmaspritzten)
- Struktur: horizontale Schichten mit homogener Porosität
- Beständigkeit gegen thermische Ermüdung ist nicht optimal
- nicht für rotierende Teile geeignet

EB-PVD TBC auf rotierenden Schaufelblättern

- Haftschicht: Pt Al (Elektrobelag + Al-Diffusion)
- TBC: ZrO₂ / Y₂O₃ (nach dem EB-PVD-Verfahren)
- Niederschlagsrate 3 - 10 µm / min
- Struktur: stängelig, senkrecht zu Oberfläche
- kein *plugging* of abkühlenden Löchern!
- gute Beständigkeit gegen thermische Ermüdung
- Prozess ist hauptsächlich für rotierende Teile geeignet
- hohe Investitionen notwendig (10 - 15 Mio. €)

IME01-VR0017-20

Abbildung 20

Ti-Legierungen für Scheiben

	Ti 64 ¹⁾	Ti 6242 ²⁾	Ti 6246 ³⁾	IMI 834 ⁴⁾
Im Programm seit:	1960	1968	1972	1992
max. Temperatur (°C):	300	480	400	550
Dichte (g / cm ³):	4.43	4.54	4.65	4.56
mech. Eigenschaften:				
20°C R _{0,2} (MPa):	880	880	1020	930
R _m (MPa):	950	1000	1120	1030
450°C R _{0,2} (MPa):	470	510	700	580 (520 / 600°C)
R _m (MPa):	580	670	880	730 (650 / 600°C)
Preis pro kg geschm. Vormaterial (€):	30	35	45	60
Bemerkungen:	1) 6Al-4V Standard legierung	2) 6Al-2Sn-4Zr-2Nb Legierung	3) 6Al-2Sn-4Zr-6Nb hohe Festigkeit mied./mitt. Temp.	4) 5.5Al-4Sn-1.5Zr-0.7Nb-0.35Si höchste Einsatztemp. aller Ti-Legierungen

IME01-VR0017-21

Tabelle 1

Ni - Legierungen für Scheiben

	IN 718	Waspaloy	Gat. Wasp.	Udimet 720 LI
Programmstart:	1970	1955	1993	1985 (PM) 1995 (C+W)
max. Temp. (°C):	650	700	705	730
Dichte (g/ cm ³):	8.2	8.23	8.15	8.08
20°C R _{0,2} (MPa):	1150	1120	1100-1250 *	1100-1250 *
R _m (MPa):	1350	1330	1550-1650 *	1550-1650 *
650°C R _{0,2} (MPa):	930	860	1050	1080
R _m (MPa):	1060	1180	1320	1360
Preis (€/ kg):	22	31	43	75
(geschmiedet 12" Bleis)				
Bemerkungen:	gute LCF Festigkeit	besserer Kriech- geringere LCF-Festigkeit als IN718	*abhängig von Schiedbedingung/ Wärmebehandlung PM : Pulver Mat. C+W : Guss + Schmieden Kombination guter LCF-Festigkeit von IN718 und hoher Kriechfestigkeit von Waspaloy	

IME01-VR0017-22

Tabelle 2

Superlegierungen für Feinguß Lauf- und Leitschaufeln

	IN 713	IN 100	M 247	PWA1484	CMSX 10
	polykrist.	polykrist.	DS*	SX**	SX 3.gen.
Programmstart:	1955	1959	1975	1990	1997
max.Temp. (°C):	970	1000	1035	1095	1125
Dichte (g/ cm ³):	7.91	7.75	8.54	8.95	9.05
max. Temp. (°C): für 100 Iv 140 MPa Zeitstandfestigkeit	970	1000	1035	1093	1125
Preis (€/ kg): (Vormaterial)	13	19	30 ¹⁾ 20 ²⁾	115 ¹⁾ 70 ²⁾	180 ¹⁾ 105 ²⁾
Bemerkungen:	-	-	* gerichtet erstarrt	** Einkristall	1) 100 %/kg+14 Mt. 2) 50 %/kg+14 Mt +10 %/Rücklauf

IME01-VR0017-23

Tabelle 3