

Höchste Reinheit für Funktionswerkstoffe

Neue Prozesse ermöglichen Superpurity

RWTH THEMEN 1/2011

M

Moderne Gasturbinen gehören zu den High-Tech-Anwendungen, die höchste Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe stellen. So werden in Strahltriebwerken von Flugzeugen Drehzahlen von 10000 min^{-1} bei gleichzeitigen Anwendungstemperaturen von bis zu 2200°C erreicht: die verwendeten Materialien werden sowohl hinsichtlich ihrer mechanischen Hochtemperatureigenschaften als auch bezüglich ihrer Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit massiv beansprucht. Die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe richten sich hierbei nach ihrem Einsatzort, so dass in den unterschiedlichen Stufen des Triebwerks verschiedene Legierungsgruppen verwendet werden: Im Fan und im Verdichter, wo vergleichsweise moderate Temperaturen herrschen, werden vorwiegend Titanlegierungen aufgrund ihrer geringen Dichte, ihrer hohen spezifischen Festigkeit und ihrem hohen Ermüdungswiderstand verbaut. Mit steigenden Temperaturen nimmt im hinteren Bereich des Verdichters der Anteil an warmfesten Sonderstählen zu, bevor in der Brennkammer und der eigentlichen Turbine fast ausschließlich hochtemperaturbeständige Superlegierungen auf Nickel-Basis zum Einsatz kommen, siehe Bild 1.

36

Damit die für moderne Strahltriebwerke typischen Zyklenzahlen von mehreren zehntausend Starts und Landungen reproduzierbar erreicht werden, muss neben der korrekten chemischen Zusammensetzung und einer geeigneten kristallinen Struktur vor allem die Fehlerfreiheit der Werkstoffe garantiert sein. So kann beispielsweise ein kritischer nichtmetallischer Einschluss zum Materialversagen einer Turbinenschaukel führen, was unter Umständen den Ausfall des Triebwerks zur Folge hat. Um dies so weit als möglich auszuschließen, kommen in der industriellen Praxis die qualitativ hochwertigsten Einsatzmaterialien, metallurgische Spezialverfahren im Vakuum und modernste Prüfmethode zur Herstellung

und Charakterisierung von dynamisch stark beanspruchten Bauteilen zum Einsatz. Da im Zuge der Entwicklung von Gasturbinen die Spezifikationen der Werkstoffe stetig anspruchsvoller werden, wird aktuell an innovativen Methoden zur Herstellung und zur Charakterisierung dieser metallischen Hochleistungswerkstoffe geforscht.

So finden am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, kurz IME, Forschungsprojekte zur Synthese und Raffination von Titan-, Eisen- und Nickel-Basis-Legierungen statt. Während die industrielle Praxis vorwiegend sauberste und damit teuerste Einsatzstoffe zur Herstellung von Hochleistungswerkstoffen einsetzt, werden am IME auch die Grenzen der Verwendung von Recyclingmaterial zur Kostensenkung untersucht. Global betrachtet würde der Einsatz von Schrott einen Beitrag zur ressourceneffizienteren Nutzung von Rohstoffen leisten und für Deutschland die Importabhängigkeit reduzieren. Durch Verwendung von kostengünstigem Ausgangsmaterial können zudem neue Anwendungsfelder für diese Hochleistungswerkstoffe, zum Beispiel im Automobilbau, erschlossen werden, die bislang aufgrund zu hoher Materialkosten nicht erreichbar sind.

Unabhängig davon, ob Kreislaufmaterial oder Reinstoffe eingesetzt werden, stellt das Schmelzen und Homogenisieren im Vakuuminduktionsofen den ersten Schritt der Legierungsherstellung dar. Prinzipiell ähnelt dieser Prozess einer im Haushalt gebräuchlichen Induktionskochplatte: Durch das Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes an eine Induktionsspule werden im zu erwärmenden Metall Wirbelströme hervorgerufen. Während dadurch beim Herd der Topf aufgeheizt wird und die Wärme an den Inhalt abgibt, wird im Induktionsofen das Metall in einem keramischen Tiegel zum Schmelzen gebracht und je nach Legierung auf bis zu 1800°C erhitzt. Dementsprechend liegt eine typische Nennleistung industrieller Öfen mit

5 MW etwa 2000-fach über der eines handelsüblichen Kochfeldes. Da ungewünschte Reaktionen mit Bestandteilen der Atmosphäre zur Bildung von Nitriden oder Oxiden führen könnten, findet der gesamte Prozess in einem geschlossenen Kessel unter Vakuum oder Inertgas statt.

Da das Vakuuminduktions-schmelzen nur über begrenzte Raffinationsmöglichkeiten verfügt, finden High-Tech-Raffinationsschritte statt. Um das Metall in hierfür geeignete Ausgangsformate zu bringen, wird die Schmelze zu zylinder- oder quaderförmigen Blöcken vergossen.

Die gebräuchlichsten Reinigungsverfahren für derartige Funktionswerkstoffe sind das Elektroschlackeschmelzen und das Vakuumlichtbogenschmelzen. Während der Wärmeeintrag beim Elektroschlackeschmelzen über Widerstandserhitzung erfolgt, bewirkt im Vakuumlichtbogenschmelzen ein Lichtbogen das Aufschmelzen des umzuschmelzenden Metalls. Beide Prozesse arbeiten in Kupfertiegeln, die so intensiv wassergekühlt sind, dass selbst sehr reaktive oder hochschmelzende Metalle wie Niob oder Tantal problemlos darin umgeschmolzen werden können, obwohl ihr Schmelzpunkt 1500 bis 2000°C über dem des Kupfers liegt. Da Kupfer über eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit verfügt, wird die Wärme abgeführt bevor der Tiegel von der Schmelze angegriffen werden kann. So entstehen auf wenigen Millimetern Temperaturdifferenzen von mehreren Tausend Grad Celsius. In beiden Umschmelzverfahren werden durch physikalische und chemische Mechanismen schädliche Einschlüsse im Größenspektrum zwischen Nano- und Millimetern entfernt.

Diese Mechanismen befinden sich zurzeit am IME im Fokus der Forschung, da die maximale Raffinationswirkung der Umschmelzprozesse gerade im Hinblick auf den steigenden Anteil stark verunreinigter Einsatzstoffe aber auch aufgrund immer höherer Anforderungen

an die bestehenden Werkstoffe optimiert werden muss. Wie auch in der industriellen Praxis besteht die Möglichkeit der Kombination der einzelnen Verfahren zur so genannten Triple-Melt-Route, welche die Standardprozedur für höchstbeanspruchte, rotierende Bauteile in Luft- und Raumfahrt darstellt. Während die typische Größenordnung industriell hergestellter Blöcke mehrere Tonnen betragen kann, lässt sich die gesamte Route im Technikmaßstab mit Blockgewichten von 200 kg und Durchmesser von 200 Millimetern darstellen. Auf diese Weise raffiniertes Einsatzmaterial stellt ein ideales Ausgangsmaterial für hoch technologisierte Prozesse wie das Bridgman-Verfahren dar, welches am Gießerei-Institut erforscht wird. Dieser Prozess dient zur gerichteten oder einkristallinen Erstarrung, die beispielsweise bei der Herstellung von hochtemperatur- und korrosionsfesten Gasturbinenschaukeln Anwendung findet. Hierzu wird das Metall in eine aufgeheizte Formschale abgegossen, die anschließend langsam aus der Heizzone in die so genannte Kühlzone abgesenkt wird. Hierbei führt der axiale Wärmetransport zur parallelen Ausrichtung der wachsenden Kristalle, während bei der Einkristallzucht eine zusätzliche Selektion der Körner erfolgt, so dass das gesamte Bauteil nur aus einem Kristall besteht. Trotz deutlich erhöhter Kosten gegenüber der allseitig globulitischen Erstarrung ergeben sich durch das Bridgman-Verfahren aufgrund verbesserter Lebensdauer und höheren Anwendungstemperaturen der derart hergestellten Bauteile wirtschaftliche und technische Vorteile. Hauptursache für die verbesserten Eigenschaften ist die Ausrichtung der Kristalle in Richtung der größten Beanspruchung beziehungsweise beim Einkristall das Vorliegen eines einzigen Kristalls ohne Korngrenzen, was dem lebensdauerbestimmenden Hochtemperaturkriechen entgegenwirkt. Zurzeit finden in aktuellen Forschungsprojekten Untersuchun-

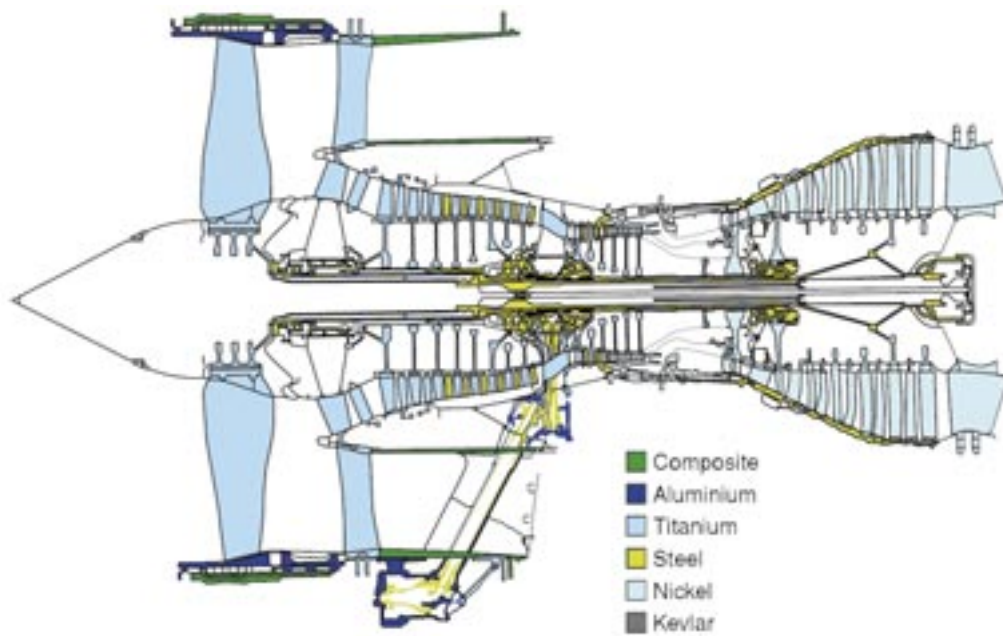


Bild 1: Darstellung der Einsatzbereiche verschiedener Legierungsgruppen im Triebwerk Trent 800, mit freundlicher Genehmigung von Rolls-Royce.

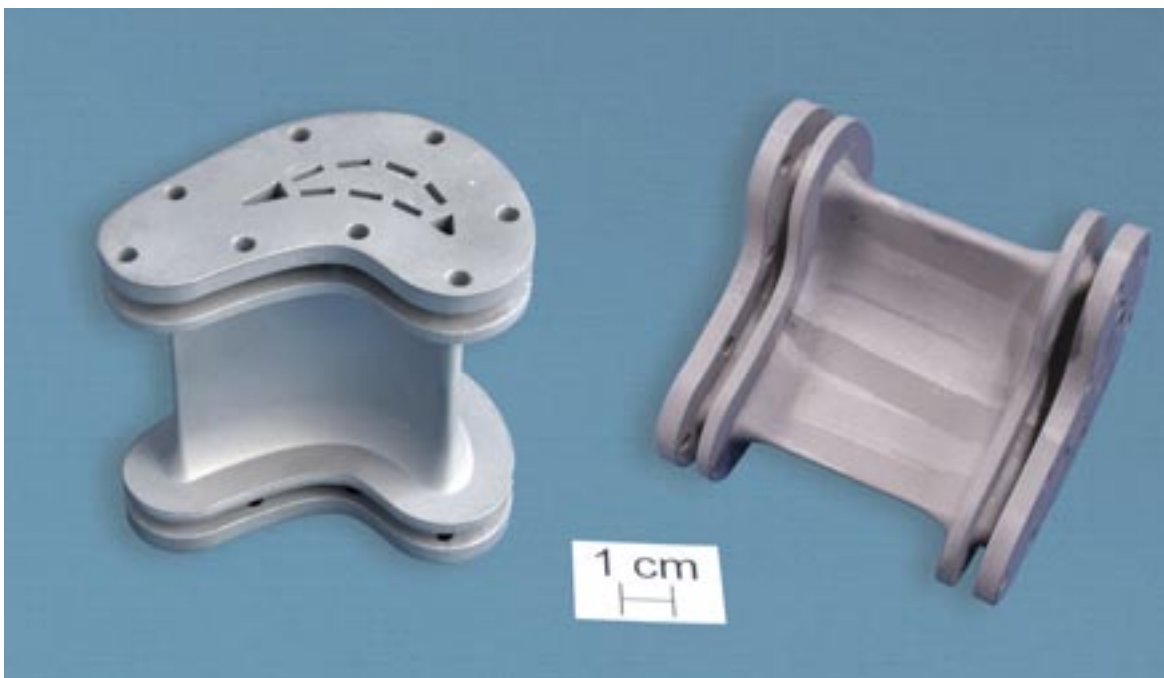


Bild 2: Links: Am Gießerei-Institut gerichtet erstarrte Turbinenschaufel mit innenliegenden Kühlkanälen aus einer Ni-Basis-Legierung; rechts: Nachweis des parallel erstarrten Gefüges durch Ätzen der Oberfläche.

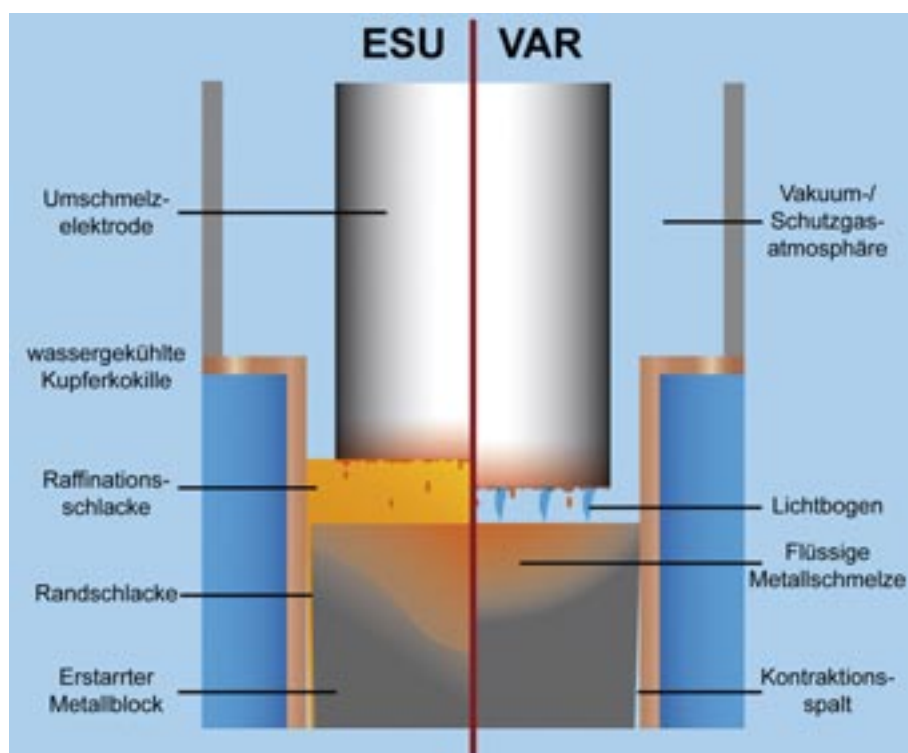


Bild 3: Schematische Gegenüberstellung der Verfahrensprinzipien von VAR-(rechts) und ESU-Prozess (links).

gen statt, inwiefern sich die Anwesenheit von nichtmetallischen Einschlüssen auf die gerichtete Erstarrung von Nickel-Basislegierungen bemerkbar macht. So werden verschiedene Legierungen mit gestuften Reinheitsgraden in Formschalen vergossen und anschließend ihre Erstarrungsverhalten und ihre Erstarrungsmorphologien untersucht, so dass gezielt der Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse dargestellt werden kann.

Der Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung am Institut für Eisenhüttenkunde, wo das grundsätzliche Wirkprinzip eines einzelnen Einschlusses in einer metallischen Matrix untersucht wird. Hierzu werden unter Zuhilfenahme der zerstörungsfreien Ultraschalltauchtechnikprüfung und der 3D-Röntgentomographie Kleinstproben mit einzelnen Einschlüssen angefer-

tigt und anschließend mittels Zugversuchen auf ihre statischen mechanischen Eigenschaften geprüft. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für eine numerische Simulation mithilfe der so genannten Finite-Elemente-Methode, mittels derer Experimente zukünftig direkt nachgebildet beziehungsweise am Computer ersetzt werden können. So kann durch den Vergleich von fehlerfreien Proben und Proben mit geometrisch definierten Einschlüssen die Wirkungsweise von Einschlüssen experimentell und numerisch genauer untersucht werden.

Bei weiterer Verfeinerung des Modells können die aus der numerischen Simulation gewonnenen Ergebnisse einerseits Zielvorgaben für die prozesstechnischen Institute liefern, indem für bestimmte Anwendungen kritische Einschlussgrößen und -formen identifiziert wer-

den, die bei der Herstellung der entsprechenden Bauteile vermieden werden müssen. Umgekehrt kann dann für einen bekannten Einschlussgehalt mithilfe der Simulation eine Vorhersage über das Verhalten des Werkstoffes bei mechanischer Belastung getroffen werden, wodurch Material für bestimmte Anwendungen gezielt freigegeben oder gesperrt werden kann. Auf diese Weise könnten zum Beispiel optimale Einsatzmöglichkeiten für Titan- oder Superlegierungen aus Recyclingmaterial bestimmt werden, die möglicherweise nicht dem Standard der Luftfahrtindustrie entsprechen, aber dennoch über hervorragende Werkstoffeigenschaften verfügen. Somit könnte aus jedem Material der optimale wirtschaftliche Nutzen gezogen werden, getreu der Devise: so günstig wie möglich, so rein wie nötig. ■

Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck ist Inhaber des Lehrstuhls für Eisenhüttenkunde und leitet das Institut für Eisenhüttenkunde. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polacek hat den Lehrstuhl für Gießereiwesen inne und ist Leiter des Gießerei-Instituts. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Bernhard Friedrich ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling sowie Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie. Dipl.-Ing. Johannes Morscheiser ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.

Bild 4: Entnahme einer keramischen Fertigungsformschale aus dem Sinterofen.

Foto: Peter Winandy

