

Turbinenräder aus TiAl
(rechtsdrehend), hergestellt
durch Schleudergießen.

FOTO: ACCESS

Prozessentwicklung für Near Net Shape-TiAl-Turbinen- räder im Feingießverfahren

VON ALEXANDER GUSSELD UND
HEINER MICHELS, AACHEN

Autobauer und Zulieferer sind stets auf neue Technologien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und zur Steigerung des Wirkungsgrades bestehender Motoren angewiesen. Zu den Gründen zählt ebenso das Bestreben der Politik, die CO₂-Emissionen für neu zugelassene Fahrzeuge zu reduzieren, wie steigende Rohstoffpreise, die häufig durch die Verknappung der Materialien begründet sind.

Zur weiteren Steigerung der Leistung und zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei Verbrennungsmaschinen bietet sich neben dem Downsizing der Abgasturbolader als Stellschraube für Effizienzsteigerungen an [1]. Dabei rückt das thermisch stark belastete Turbinenrad in den technologischen Vordergrund: Be-

dingt durch die hohen Abgastemperaturen – bei Ottomotoren von bis zu 1050 °C – sowie die hohe Fliehkraftspannung, resultierend aus den hohen Drehzahlen von bis zu 300 000 U/min, ist bei dem derzeitigen Stand der Technik meist eine hochwarmfeste Nickelbasis-Legierung wie Inconel 713 [2] erforderlich. Turbinenräder aus diesem Werkstoff besitzen dichtebedingt allerdings eine große Trägheit, die sich als sogenanntes „Turboloch“, also dem verzögerten Eintreten der Leistungssteigerung durch den Turbolader, bemerkbar macht. Dadurch wird die Effizienz des Turboladers vermindert [3].

Eine Möglichkeit, diesen Effizienzverlust zu reduzieren, sind leichtere Werkstoffe. Hierzu zählen Titanaluminide (TiAl). Diese besitzen Potenzial, die bisher verwendeten Werkstoffe zu substituieren und dadurch die Effizienz weiter zu steigern. Durch die im Vergleich zu konventionellen

Nickelbasis-Legierungen nur etwa halb so hohe Dichte und die erforderlichen mechanischen Eigenschaften [4] von TiAl können die Masse der rotierenden Teile im Abgasturbolader und folglich die Trägheit des Systems signifikant reduziert werden. Ein schnelleres Ansprechverhalten sowie eine höhere maximale Drehzahl des Turboladers sind die Folge (Bild 1) [6]. Turbinenräder aus TiAl werden zum Beispiel von Mitsubishi Motors Corp. im Lancer Evolution bereits seit 1999 erfolgreich eingesetzt [7]. Allerdings ist die Verarbeitung im Vergleich zu Turbinenrädern aus Nickelbasis-Legierungen komplexer und die Rohstoffe sind relativ teuer. Zudem ist die Ausbringung der Produktion üblicherweise relativ niedrig. Daher ist es erforderlich, die Produktionsprozesse vor dem Start der Serienproduktion soweit als möglich zu optimieren und so die Realisierung der werkstoffspezifischen Vor-

teile und eine Effizienzsteigerung zu ermöglichen.

Access e.V. mit Sitz in Aachen befasst sich bereits seit Mitte der 1990er-Jahre mit der Entwicklung und Optimierung von Gießverfahren einschließlich der Werkstoffentwicklung für Hochleistungs-komponenten aus TiAl. Bild 2 fasst in einer bauteilbezogenen Darstellung wesentliche Arbeiten im Themenfeld TiAl zusammen. Zu diesen Arbeiten gehören auch die Entwicklung einer Gießtechnologie zur Herstellung von Turbinenrädern/Abgas-turboladern im Feingießverfahren unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte (BMBF-Verbundprojekt „Entwicklung einer TiAl-Gießtechnologie für komplexe Leichtbaukomponenten“, Förderzeitraum 2002 bis 2005) sowie die im aktuellen BMBF-Verbundprojekt „ETurbo – Funken-erosive EDM- und elektrochemische ECM-Hochleistungsendbearbeitung von feingegossenen und generativ hergestellten Turbolader-Turbinenräder aus Gamma-Titanaluminid für den Automobilbau“ durchgeführten Arbeiten. In diesem derzeit in seiner zweiten Hälfte befindlichen Projekt wird bei Access e.V. die Entwicklung eines Fertigungsprozesses zur Produktion von vorserientauglichen Bauteilen vorangetrieben, während gleichzeitig bei den Verbundpartnern aus der Industrie die eigene technologische Entwicklung im Vordergrund steht.

KURZFASSUNG:

Neben dem Downsizing bietet sich bei Verbrennungsmotoren der Abgas-turbolader als Stellschraube für weitere Effizienzsteigerungen an. Turbinenräder aus Hochleistungswerkstoffen wie Titanaluminium (TiAl) bieten für den Einsatz attraktive Eigenschaften, insbesondere ein geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher spezifischer Festigkeit. Aufgrund der hohen Reaktivität von TiAl-Schmelzen gestaltet sich die Verarbeitung des intermetallischen Werkstoffs beim Feingießen jedoch als schwierig. Des Weiteren sind kostenintensive Formmaterialien erforderlich und komplexe Bauteilgeometrien selbstverständlich. Im Rahmen von BMBF-geförderten Forschungsarbeiten wird im Verbund von Partnern aus der Industrie und Access e.V., Aachen eine geeignete Feingieß-technologie für Turbolader-Turbinenräder aus TiAl entwickelt. Mit der Perspektive eines Technologietransfers in die Serienfertigung wurden bislang insgesamt über 2500 spezifikationsgerechte Turbinenräder in einem stabilen Prozessfenster produziert. Grundlage hierfür sind neben dem vorhandenen Know-how eine abgestimmte Anlagen- und Werkzeugtechnologie und die Nutzung simulationsgestützter Optimierung.

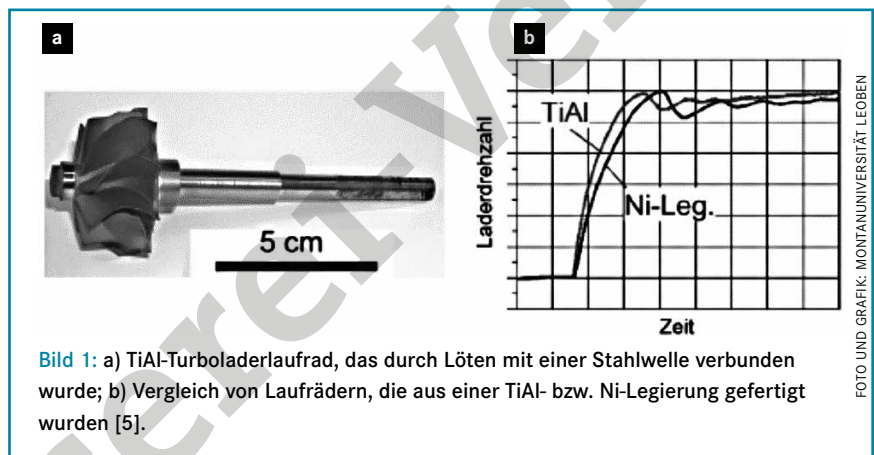


Bild 1: a) TiAl-Turboladerlaufrad, das durch Löten mit einer Stahlwelle verbunden wurde; b) Vergleich von Laufrädern, die aus einer TiAl- bzw. Ni-Legierung gefertigt wurden [5].

FOTO UND GRAFIK: MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

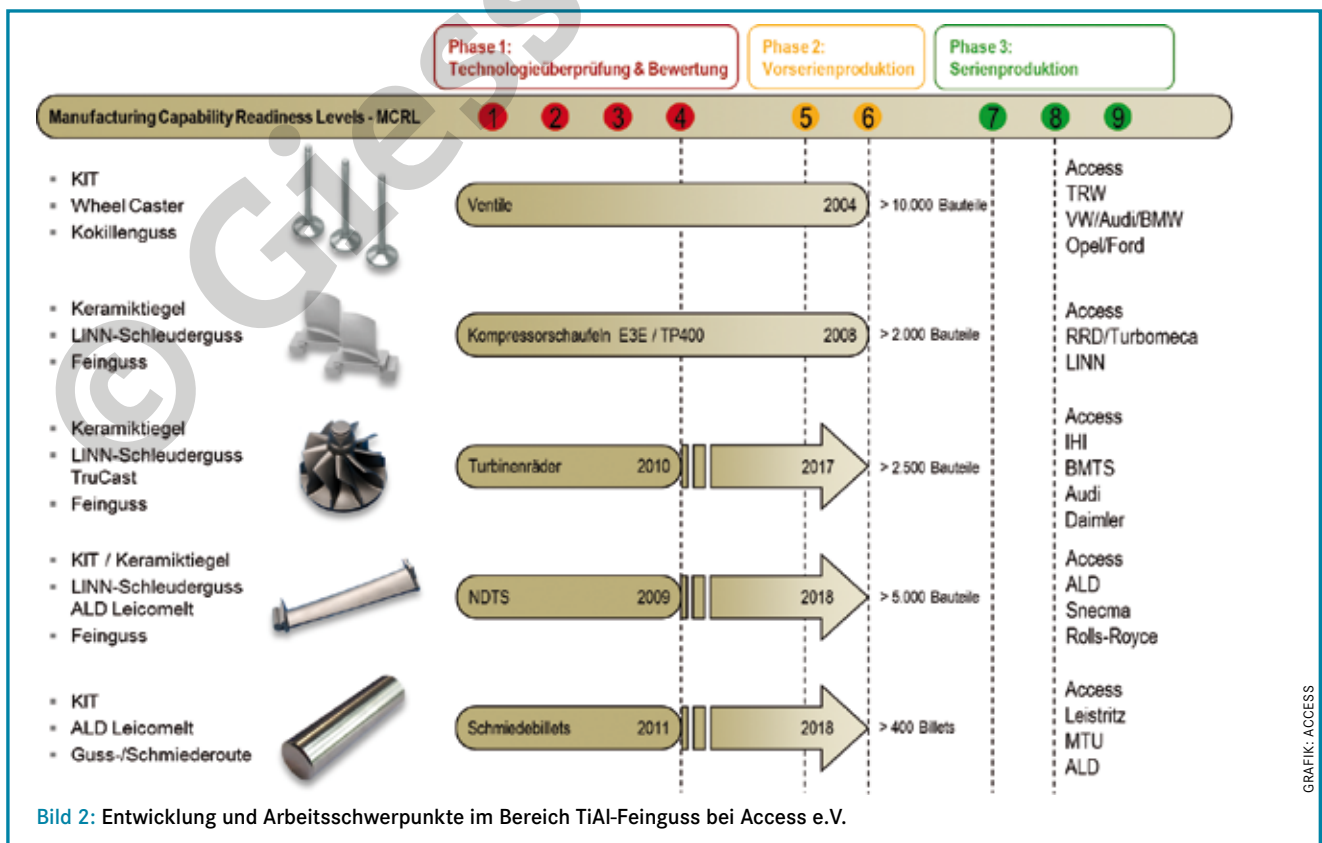
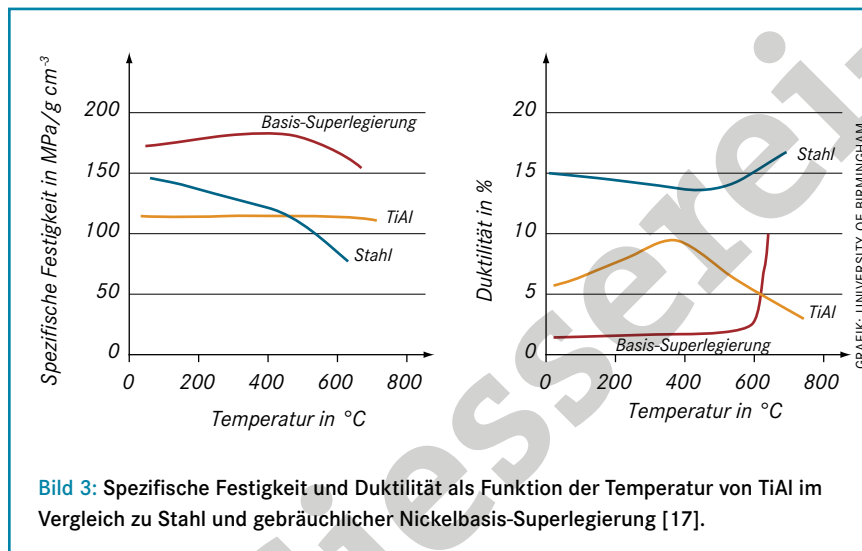


Bild 2: Entwicklung und Arbeitsschwerpunkte im Bereich TiAl-Feinguss bei Access e.V.

GRAFIK: ACCESS

Tabelle 1: Mikrostrukturtypen von γ -TiAl und ihre mechanischen Eigenschaften nach [13].

Mikrostruktur	Gefügebeschreibung	Mechanische Eigenschaften	
		positiv	negativ
Near-Gamma (Globular- γ)	Relativ kleine α_2 -Körner, meist zwischen äquiauxialen γ -TiAl-Körnern	höhere Duktilität bei höheren Temperaturen	geringe Duktilität bei Raumtemperatur
Duplex	Eingelagerte, lamellare Körner (alternierende Lagen von α_2 und γ) sowie äquiauxiale γ -TiAl-Körner annähernd gleicher Größe	hohe Zugfestigkeit und Duktilität	geringe Bruchfestigkeit und Kriechfestigkeit
Near-Lamellar	Große Volumenanteile lamellarer Körner, gemixt mit kleinen γ -TiAl-Körnern	bessere Bruchfestigkeit und Kriech-eigenschaften	niedrige Duktilität
Fully-Lamellar	Besteht komplett aus sehr großen lamellaren Körnern (in der Größenordnung von 100 μm bis mm)	gute Bruchfestigkeit und Kriecheigen-schaften	schwache Zugfestigkeit



Flügel auslauf zu Abbrüchen oder Rissen neigen können. Als Kompromiss werden daher sogenannte Designed-Fully-Lamellar-Gefüge avisiert, von denen man eine gute Ausgewogenheit der mechanischen Eigenschaften erwartet [5]. Dabei handelt es sich um γ -TiAl-Legierungen mit Nearly- oder Fully-Lamellar-Gefügen im Gusszustand [11], die eine ausreichende Menge thermisch stabiler Ausscheidungen besitzen, um ein unkontrolliertes Wachstum oberhalb der α -Transusstemperatur T_α während einer Wärmebehandlung zu unterdrücken. Dadurch kann ein feinkörniges, volllamellares Gefüge eingestellt werden.

Zu den geeigneten Legierungen gehören TiAl-Legierungen der 3. Generation. Diese besitzen einen besonders abgestimmten Gehalt an weiteren Legierungselementen, mit denen Schlüsseleigenschaften gezielt weiter optimiert wurden. Hierzu zählen die in Deutschland entwickelten TNB-Legierungen mit der Zusammensetzung Ti-45Al-(5-10)Nb-(0-1)(C, B), bei denen durch Zulegieren von Niob und Kohlenstoff oder Bor die Oxidationsbeständigkeit sowie die Zug- und Kriechfestigkeit weiter verbessert wurden [5, 9]. Niob verbessert zudem die Gieß- und Gefügeeigenschaften [12] und bei hohen Gehalten auch die Duktilität bei Raumtemperatur [13]. Die Niobatome sind bis zu 10 % löslich [11] und nehmen dabei Plätze von Titanatomen ein. Dies führt zu einer Vergrößerung des α_2 -Volumenverhältnisses [14], was sich positiv auf die Stapelfehlerenergie und Zwillingbildung auswirkt [14]. Allerdings

Von der Legierungsauswahl zum Gussteil

Auswahl und Eigenschaften des Titanaluminids

Titanaluminid-Legierungen zeichnen sich durch attraktive Eigenschaften für den Hochtemperatureinsatz aus: Sie besitzen einen hohen Schmelzpunkt (ca. 1450 °C), eine relativ geringe Dichte (3,9 bis 4,1 g/cm³), eine hohe spezifische (Kriech-) Festigkeit und Steifigkeit bei höheren Temperaturen und eine gute Oxidationsbeständigkeit [8]. Vor allem Legierungen mit der hochschmelzenden γ -Phase haben sich in den letzten 25 Jahren als technisch relevant herausgestellt.

Eine solche γ -TiAl-Legierung soll aufgrund ihrer positiven Eigenschaften für die

Herstellung der Turbinenräder verwendet werden. Insbesondere durch unterschiedliche chemische Zusammensetzungen und Erstarrungs-, Abkühl- und Wärmebehandlungsbedingungen kommt es bei den γ -TiAl-Legierungen nochmals zu unterschiedlichen Gefügeausprägungen und daraus hervorgehenden Eigenschaftsprofilen, nach denen die Werkstoffe ebenso wie bei den niedriglegierten α - und β -Titanlegierungen unterschieden werden [9] (Tabelle 1).

Dementsprechend sollen die Turbinenräder aus γ -TiAl aufgrund der Forderung nach hoher Bruchzähigkeit und Kriechfestigkeit lamellare Gefüge aufweisen. Diese bringen jedoch typischerweise eine geringe Bruchdehnung mit sich, sodass die Gussteile insbesondere am dünnen

stehen der positiven Änderung der Eigenschaften deutlich höhere Materialkosten gegenüber. Durch Zugabe von 8 at.-% Niob steigen die Legierungskosten um bis zu 50 % [15]. Bor, Kohlenstoff und Silizium wirken sich ähnlich wie Niob, Tantal, Wolfram, und Molybdän positiv auf die Hochtemperatureigenschaften aus [9]. Kleine Zugaben von Bor führen zur direkten Kornfeinung, sodass Gussteile ohne anschließende Wärmebehandlung genutzt werden können [13]. Der kornfeinende Effekt steigert die Festigkeit von Duplex-Gefügen, wohingegen Fully-Lamellar-Gefüge Festigkeit verlieren [15]. Kohlenstoff verbessert bei Gehalten von 0,2 bis 0,4 at.-% die Kriechbeständigkeit und beeinflusst die Dehngrenze [14, 19]. Das namensgebende Aluminium beeinflusst Zugfestigkeit und Dehnung und führt außerdem ab Gehalten von 6 Gew.-% zur Bildung intermetallischer Phasen [16]. Eine Reduzierung des Al-Gehaltes bewirkt bei γ -Titanaluminiden zwar eine Erhöhung der Festigkeit, dies geschieht allerdings auf Kosten der Oxidationsbeständigkeit und Duktilität [9].

Aus dieser Bandbreite von γ -Titanaluminiden wurde für das Abgießen eines Muster-Turbinenrades eine TNB V5 (Ti-44,5Al-6Nb-0,2C-0,2B)-Legierung ausgewählt. Im Vergleich zu anderen Turbolader-Werkstoffen aus dem Stahl- und Nickelbasisbereich zeichnet sich diese als Mitglied der TiAl-Legierungsgruppe durch eine deutlich höhere spezifische Festigkeit aus (Bild 3). Dadurch lassen sich dünnere Bauteilgeometrien bei gleicher Festigkeit realisieren, womit neue Möglichkeiten hinsichtlich Design und Gestaltung des Turbinenrades einhergehen. Zwar beträgt die Dehnungsfähigkeit bei Temperaturen unter 600 °C nur knapp 1 %, dies ist aber im Rahmen der Spezifikationen für Turbolader-Turbinenräder [5] (Tabelle 2).

Das Makrogefüge eines bei Access e.V. abgegossenen Turbinenrades zeigt Bild 4. In Bild 4c sind bei 200-facher Vergrößerung in den Bereichen Nabe, Schaufelansatz und Schaufelmitte volllamellare Gefüge zu erkennen. Bedingt durch die relativ kurzen Erstarrungs- und Abkühlzeiten liegt in der Schaufelmitte ein sehr feines Gefüge vor. In den Bereichen der Nabe und des Schaufelansatzes bildet sich derselbe Gefügetypus gröber aus, da die Körner durch das größere Volumen langsamer abkühlen und erstarren und damit länger wachsen können. Gemäß Tabelle 1 besitzt das Turbinenrad dem Gefüge entsprechend eine gute Bruchfestigkeit und gute Kriecheigenschaften, wobei eine relativ niedrige Zugfestigkeit angenommen werden muss.

Tabelle 2: Materialanforderungen an Turbolader-Turbinenräder nach [5].

Eigenschaft	Anforderung
Max. Einsatztemperatur in °C	850 (Dieselmotor)
Bruchdehnung bei Raumtemperatur in %	>1
Hochzyklische Ermüdungsfestigkeit in MPa, $>10^7$ Zyklen	>250
Niederzyklische Ermüdungsfestigkeit in MPa, $>10^4$ Zyklen	>300
Kriechfestigkeit in MPa für 1 % plastische Verformung/1000 h	>200

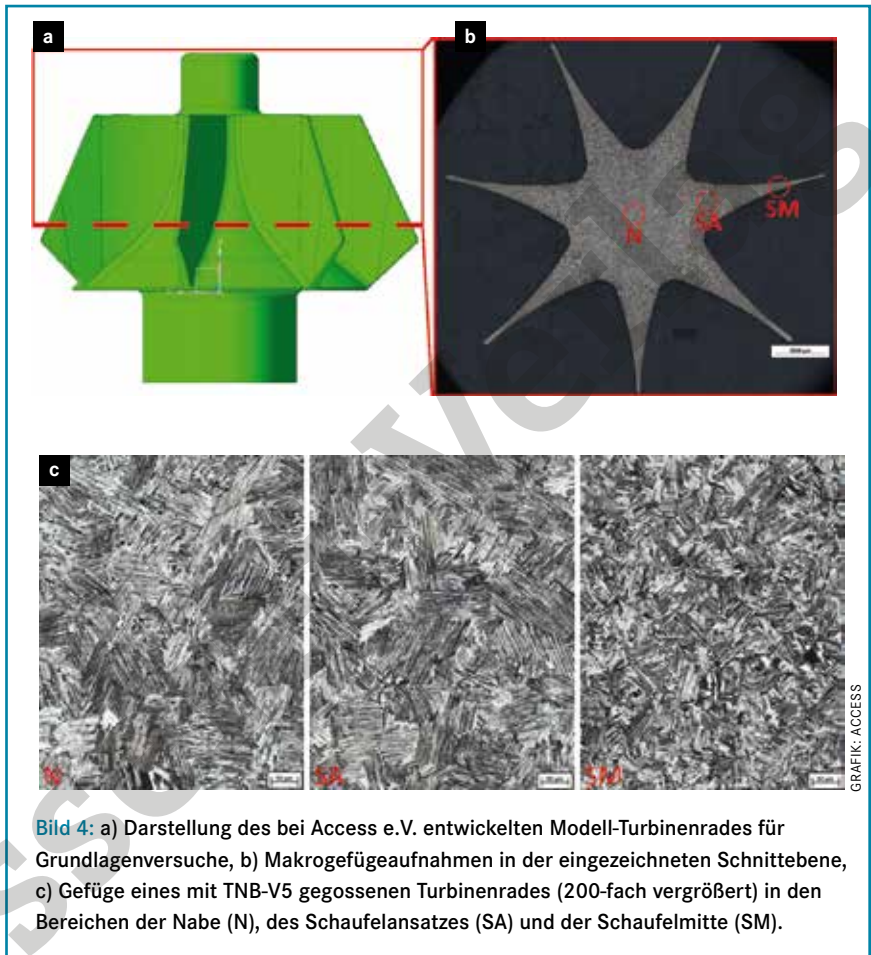


Bild 4: a) Darstellung des bei Access e.V. entwickelten Modell-Turbinenrades für Grundlagenversuche, b) Makrogefügeaufnahmen in der eingekreisten Schnittebene, c) Gefüge eines mit TNB-V5 gegossenen Turbinenrades (200-fach vergrößert) in den Bereichen der Nabe (N), des Schaufelansatzes (SA) und der Schaufelmitte (SM).

Die Simulation: Werkzeug zur kostengünstigen Prozessentwicklung

Die Simulation hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als Werkzeug bewährt, um Prozessentwicklungen zu beschleunigen und Produktanläufe erfolgreich zu gestalten.

Durch frühzeitige Betrachtung der Fertigungsprozesse und Optimierung der Produktionsparameter hinsichtlich vorgegebener Ziele wird durch Front-Loading ein frühzeitiger Erkenntnisgewinn ermöglicht, wodurch Einsparpotenziale an Kosten und Zeit adressiert werden können.

Für die Prozessentwicklung des TiAl-Turbinenrades wurde bei Access e.V. die Softwarelösung STAR-Cast verwendet. STAR-Cast wurde in den letzten Jahren gemeinsam von Access e.V. und dem Softwarehaus CD-adapco hinsichtlich der speziellen Anforderungen des Fein- und ins-

besondere Schleudergießens von Hochtemperaturwerkstoffen weiterentwickelt. Aktuell kann damit ein vorgegebener Parameterraum auf die beste mögliche Lösung hin untersucht werden, wodurch der Aufwand an ressourcenintensiven praktischen Versuchen minimiert wird.

In Bild 5 ist beispielhaft der Erstarrungsverlauf eines Turbinenrades als Ergebnis der Optimierung während der Prozessentwicklung dargestellt.

Die farbgrafischen Ergebnisse zeigen, dass die Form vollständig gefüllt wird. Die Fließfähigkeit der Legierung ist ausreichend hoch, um auch die dünnen Flügel mit einer Austrittskantendicke von 0,5 mm auszufüllen.

Der Erstarrungsverlauf in Richtung Speiser lässt darauf schließen, dass keine Lunker gebildet werden. Dies gilt auch für Kaltläufe.

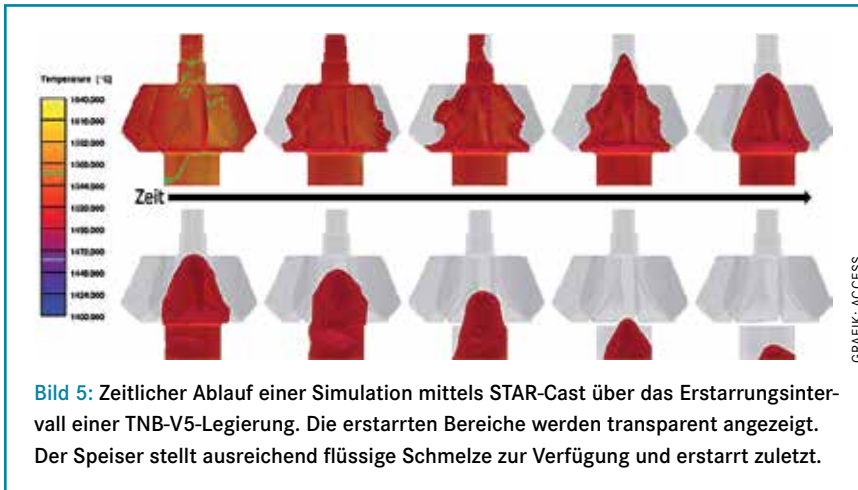


Bild 5: Zeitlicher Ablauf einer Simulation mittels STAR-Cast über das Erstarrungsintervall einer TNB-V5-Legierung. Die erstarrten Bereiche werden transparent angezeigt. Der Speiser stellt ausreichend flüssige Schmelze zur Verfügung und erstarrt zuletzt.

GRAFIK: ACCESS

Die Herstellung einer geeigneten Formkeramik

Die Formkeramik wurde, wie für das Feingießverfahren typisch, mittels Tauchen und Besanden auf Basis verlorener Wachsmodele hergestellt. Mehrere Wachsmodele werden zusammen mit dem Gießsystem zu sogenannten Clustern zusammengesetzt. Diese Clusteraufbauten werden in keramische Schlicker, also Suspensionen aus Bindemitteln, Additiven und Feuerfestmaterialien mit einem hohen Feststoffanteil, getaucht und noch feucht mit Feuerfestmaterial besetzt. Die so entstehende Formschicht aus Schlicker und anhaftendem Feuerfestmaterial wird für eine definierte Zeit zum Trocknen aufgehängt und dadurch verfestigt.

Der Prozess des Tauchens und Besandens wird mehrfach wiederholt, um eine gießgerechte Formkeramik aufzubauen. Für die ersten Schichten, die sogenannten Frontschichten, werden im Falle der TiAl-Turbinenräder bei Access e.V. Schlicker und Feuerfestmaterialien auf Basis von Yttriumoxid verwendet. Dies ist gegenüber der reaktionsfreudigen TiAl-Schmelze ausreichend reaktionsträge. Zudem wird durch die feine Körnung des Besandungsmaterials eine ausgezeichnete Oberflä-

chengüte und Abbildungsgenauigkeit erzielt. Für nachfolgende Stüttschichten (Back-up-Schichten) wird kostengünstigeres und grobkörnigeres Material auf Aluminiumoxidbasis genutzt. Abschließend wird die letzte Schicht mit einem speziellen Schlicker versiegelt.

Für die seriennahe Herstellung der Formkeramiken wird bei Access e.V. eine 2015 in Betrieb genommene automatisierte Anlage der Fa. VA Technology Ltd UK genutzt (Bild 6). Die Reproduzierbarkeit und die Möglichkeiten zur Dokumentierung und Optimierung des Tauchens, Besandens und Trocknens wurden damit im Vergleich zum händischen Vorgang signifikant gesteigert. Im Rahmen der bis zum Jahresende erwarteten Zertifizierung nach DIN 9100 und der Ausrichtung der Prozess- und Produktentwicklung auf Technology Readiness Level 6 (TRL6) ist diese Anlage damit eine sehr wichtige Komponente. Nach dem Trocknen werden die Formschalen in einem Dampfautoklaven ausgewachst. Ein nachgeschalteter Entbinderungsbrand entfernt verbliebene Wachsreste und Bindemittel in der grünsten Formschale vollständig. Die Endfestigkeit der Formkeramik wird mit einem Sinterbrand erreicht.

Da die Qualität der Formkeramik direkt über die Qualität des Gussteils mit entscheidet, werden entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt. Dazu gehört die optische Kontrolle der Formen. Spannungs- und Kontraktionsrisse entstehen bei der Abkühlung der Form nach dem Sinterbrand und sind bis zu einer gewissen Größe unkritisch, da sie sich bei einer Vorwärmung der Keramik vor dem Abgießen durch die Ausdehnung der Keramik wieder schließen. Fehler im Bereich des Vielkants und der Flügelwurzeln in Form von feinen Luftblasen (Bild 7) entstehen bereits beim Tauchen. Sie erscheinen auf dem Gussteil als kugelförmige Oberflächenfehler. Seltener ist die Bildung feiner Grate auf der Nabe oder den Flügelwurzelflächen. Diese entstehen im Besandungsschatten der Flügelkrümmung. Das Besandungsmaterial trifft hier mit einem geringen Impuls auf die mit Schlicker benetzte Oberfläche, und die Kontraktion während der anschließenden Trocknung reicht aus, um die dünne Schicht aufzureißen. Die nachfolgende Formschalenschicht kann den Riss nicht gänzlich auffüllen und als Abbild des Risses entsteht auf dem Gussteil ein Grat. Des Weiteren kann es auf der Nabe und an den Flügelwurzelradien zu Anhäufungen von Schlicker- und dadurch zum Versutschen von Schlicker-/Besandungsschichten kommen. Dadurch entsteht am Gussteil Versatz, der optisch den Graten ähnelt, jedoch einen anderen Ursprung hat.

Je nach Ausprägung führen diese Fehler nicht unbedingt zu Ausschuss des produzierten Gussteils, da sie durch Nachbearbeitung entfernt werden können. Allerdings stören sie die Wertschöpfung und sollten so früh wie möglich vermieden werden, um in der Serienfertigung keine Mehrkosten entstehen zu lassen. Dazu ist der Einsatz von Simulationen wünschenswert, allerdings sind die Grundla-



Bild 6: Anlage zur vollautomatisierten Formschalenherstellung der Fa. VA Tech bei Access e.V.

GRAFIK: ACCESS



FOTOS: ACCESS

Bild 7: Typische Fehler im Bereich der Keramikherstellung bei Turbinenrädern.

gen hierfür noch zu erarbeiten. Derzeit wird bei Access e.V. daher ein Konzept für ein IGF-Forschungsvorhaben erarbeitet, um das Entstehen von Tauch- und Besandung Fehlern besser verstehen, numerisch beschreiben und geeignete Vermeidungsmaßnahmen identifizieren zu können.

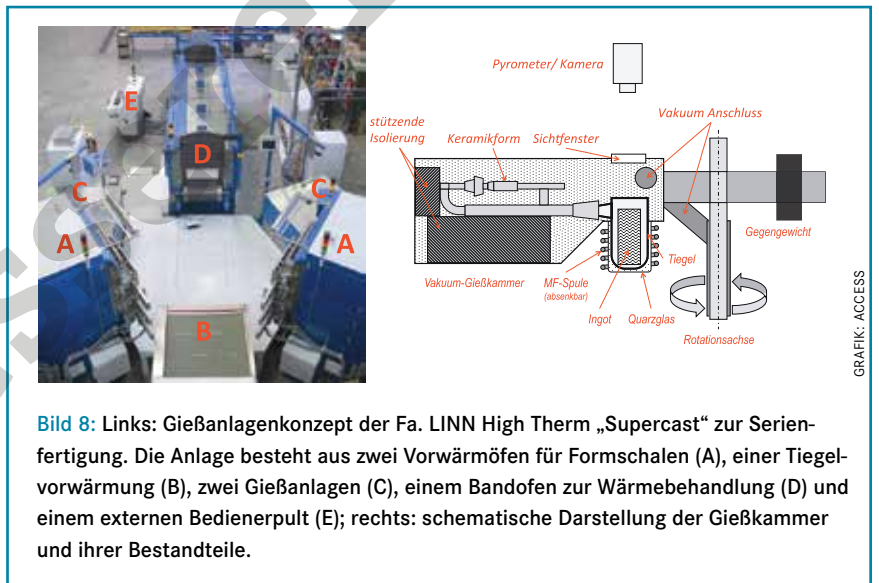
Das Schleudergießen

Das Abgießen der Räder erfolgt serienhaft auf der Gießanlage High Therm „Supercast“ der LINN High Therm GmbH, Eschenfelden (**Bild 8**).

Die isolierten Formschalen werden in zwei Öfen vorgewärmt und dann in die Gießkammer eingelegt und ausgerichtet. Der Prozessraum wird geschlossen und evakuiert, um die Reaktion der Schmelze mit Luftsauerstoff zu vermeiden.

Das Einsatzmaterial wird induktiv aufgeschmolzen und gezielt überhitzt, um ein besseres Formfüllen zu erzielen. Durch das Absenken der Heizspule und das Einsetzen der Drehbewegung des Gießarms wird die Schmelze durch die Fliehkraft in die Form gepresst und erstarrt dort. Zur besseren Nachspeisung wird die Drehbewegung auch nach dem Formfüllen für eine definierte Zeit aufrechterhalten. Ein anschließendes kontrolliertes Abkühlen in einem Bandofen dient der Minimierung der Erstarrungsspannungen.

Mit dieser Gießanlage können pro Stunde 12 Abgüsse durchgeführt werden. Maßgeblich ist hier das maximale Einsatz-



GRAFIK: ACCESS

Bild 8: Links: Gießanlagenkonzept der Fa. LINN High Therm „Supercast“ zur Serienfertigung. Die Anlage besteht aus zwei Vorwärmöfen für Formschalen (A), einer Tiegelvorgewärmung (B), zwei Gießanlagen (C), einem Bandofen zur Wärmebehandlung (D) und einem externen Bedienerpult (E); rechts: schematische Darstellung der Gießkammer und ihrer Bestandteile.

gewicht von 1,8 kg Schmelzmaterial, welches den Aufbau des Gießclusters mitbestimmt.

An einem 1,8 kg Cluster werden bis zu acht Bauteile platziert. Pro Stunde können auf dieser Anlage damit knapp 100 Räder abgegossen werden.

Nach dem Abgießen werden Gussteile und Formmaterial durch mechanische Einwirkung und Sandstrahlen voneinander getrennt. Trotz der geringen Duktilität von TiAl ist dies schadlos möglich, allerdings sollte die direkte Aufbringung von mechanischer Kraft auf die Bauteile vermieden werden.

Bewertung des Gussteils und der Prozesskette

Fehleranalyse und -vermeidung

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurden die Gussteile auf Gussfehler wie Poren, Einschlüsse und Grate sowie insbesondere auch Warmrisse und Kaltläufe hin untersucht (**Bild 9**) und entsprechende Vermeidungsmaßnahmen eingeleitet. Im Fall von Poren und Kaltläufen wurden Anpassungen des Gießsystems vorgenommen und die Fließwege der Schmelze optimiert. Geeignete Verbesserungsmaßnahmen wurden durch Einsatz der



Simulation ermittelt. Die Vermeidung von Graten war einerseits, wie bereits beschrieben, formseitig möglich. Der Bildung von Graten, die durch das Füllen von thermisch induzierten Rissen in der Formkeramik entstanden, konnte durch Formvorwärmung begegnet werden. Wechselwirkungen hinsichtlich der Ausbildung von Kaltläufen und der zuvor benannten Formstoffpenetration wurden dabei ebenfalls berücksichtigt.

Die Entstehung von Warmrissen in den Flügeln ließ sich auf zwei mögliche Ursachen zurückführen: Spannungen im Gussteil während der Erstarrung oder als Folge einer Versprödung durch Fremdmaterialien, die durch den Prozess in die Form eingetragen wurden und mit der TiAl-Schmelze reagierten. Die Erstarrungsspannungen konnten durch eine Modifizierung des Formschalenaufbaus reduziert werden. Als Ursache für das Fremdmaterial wurde die Formschalenisolierung identifiziert – eine anfängliche Rissproblematik konnte durch eine Änderung des Isolationsmaterials zu 100 % vermieden werden.

Zu den kritischen Fehlern zählt auch die Bildung von massiven Graten im Bereich zwischen den Flügeln (Bild 9e). Dieser Fehler wurde bei unzureichender Vorwärmung der Formkeramik in Kombination mit den hohen mechanischen und thermischen Kräften während des Abgießens beobachtet. Die betroffenen Gussteile waren dem Ausschuss zuzuordnen. Der Fehler konnte jedoch grundsätzlich erfahrungsbasiert prozessseitig vermieden werden.

Aktuell wird bei Access e.V. ein Heizkassettenkonzept zum Einsatz auf der LINN High Therm „Supercast“ entwickelt. Diese Heizkassette soll die Isolation vollständig ersetzen, wodurch weitere Ressourcen in Form von Material und Arbeitsschritten zur Applikation des Isoliermaterials eingespart werden können.

Fazit und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Herstellung der Turbinenräder stellt wie beschrieben eine nennenswerte gießtechnologische Herausforderung dar. Durch die Kombination von erfahrungsbasiertem Wissen und simulationsgestützter Optimierung konnte die Ausbildung von Fehlern wie beschreiben vermieden und in den Spezifikationsbereich hinein reduziert werden. Grundlage hierfür ist neben dem vorhandenen Know-how die verfügbare Anlagen- und Werkzeugtechnologie. Das schmale Prozessfenster zur Herstellung von komplexen TiAl-Gussteilen wie dem gezeigten Turbinenrad ist damit durch diese Kombination beherrschbar. Bis dato konnten über 2500 spezifikationsgerechte Turbinenräder hergestellt werden. Bild 10 und das Bild auf S. 38 zeigen zwei Beispiele von Turbinenrädern in unterschiedlicher Ausführung (links- und rechtsdrehend).

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist zunächst der Legierungspreis zu betrachten. Gegenwärtig wird ein Kilogramm der TiAl-Legierung TNB-V5 je nach Format und Herstellungsmethode mit einem Preis zwischen 100 und 180 Euro gehandelt. Hinzu kommt die

Ausbringung des Prozesses. Diese liegt bei einem Cluster mit acht Bauteilen bei etwa 30 % und ist damit relativ niedrig. Zu einer nennenswerten Steigerung der Ausbringung kann vor allem eine Änderung des Clusterausbaus beitragen. Die Möglichkeiten sind in diese Richtung jedoch durch die Abmessungen der Gießkammer limitiert. Auch andere prozess- und materialbedingte Optimierungsmöglichkeiten zur Steigerung der Ausbringung sind vorhanden, müssen realistisch jedoch als gering eingestuft werden.

Weiteres Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist dem Recycling des Kreislaufmaterials zuzuordnen. Allerdings sind hier noch nennenswerte Anstrengungen erforderlich, um anfallende Gießreste nicht als Schrott, sondern als Wertstoff betrachten zu können.

Je nach Lage des Weltmarktes kann auch das für den Aufbau der Frontschichten erforderliche Yttriumoxid die Wirtschaftlichkeit mehr oder weniger stark negativ beeinflussen. Auch hier ist ein Recycling, ähnlich den TiAl-Schrotten, bisher nicht genauer untersucht worden.

Zusammenfassung

Die Herstellung von Turbinenrädern aus Titanaluminiden ist in der Vorserienreife gelungen. Die Kombination aus gewählten TiAl-Legierungen und entwickelter Produktionsroute liefert entsprechend der bisher durchgeführten Analysen Bauteile mit den geforderten Merkmalen. Einsatzbezogene Tests sind in Planung. Grundlage für dieses Ergebnis ist die durch pro-

Bild 10: Turbinenrad aus TiAl, hergestellt durch Schleudergießen.



FOTO: ACCESS

jektbezogene Förderung ermöglichte Kombination von langjähriger Erfahrung im Umgang mit Titanaluminiden, einer geeigneten Infrastruktur und der Kooperation mit Partnern aus der Industrie.

Gleichzeitig stellt die erforderliche Gießtechnik weiterhin eine große Herausforderung dar. Hohe Herstellungskosten, insbesondere bedingt durch die geringe Ausbringung, das noch unerschlossene Recyclingpotenzial und die hohen Kosten des Formschalensystems, richten den Produktionsfokus auf äußerst wertschöpfungsintensive und qualitativ anspruchsvolle Produkte.

Dipl.-Ing. Alexander Gußfeld und Dipl.-Ing. Heiner Michels, Access e.V., Aachen

Literatur:

- [1] *Intermetallics 15 (2007), S. 468-474.*
- [2] Pucher, H.; Zinner, K.: *Aufladung von Verbrennungsmotoren. Springer Vieweg, 4. Aufl., 2012. Kapitel 14, S. 287-318. ISBN 978-3-642-28989-7.*
- [3] Pander, J.: *Wo ist das Turboloch? 2012, Online Publikation URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/die-technischen-innovationen-die-das-turboloch-verschwinden-liessen-a-855876.html> (Stand: 27.07.2016).*
- [4] *Intermetallics 7 (1999), S. 689-697.*
- [5] *Berg- und hüttenmännische Monatshefte 156 (2011), Nr. 7, S. 255-260.*
- [6] *Intermetallics 6 (1998), S. 709-713.*
- [7] *Adv. Eng. Mat. 5 (2001), Nr. 3, S. 307-310.*
- [8] *Berg- und hüttenmännische Monatshefte 153 (2008), Nr. 9, S. 337-341.*
- [9] Wortberg, D. B.: *Feinguss von Turbinenrädern aus TiAl. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2003.*
- [10] Brookes, S. P.: *Thermo-mechanical fatigue behaviour of the near- γ -titanium aluminide alloy TNB-V5 under uniaxial and multiaxial loading. Dissertation, BAM Dissertationsreihe Band 49, Berlin, 2009. ISBN 978-3-9812910-5-6.*
- [11] *Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 37 (2006), [Nr. 9], S. 724-730.*
- [12] *Prakti. Metallogr. 37 (2000), S. 194-217.*
- [13] *Adv. Mat. Research 278 (2011), S. 563-568.*
- [14] *Intermetallics 8 (2000), S. 1283-1312.*
- [15] *Intermetallics 7 (1999), S. 89-99.*
- [16] Peters, M.; Hemptenmacher, J., u. a.: *Titan und Titanlegierungen: Struktur, Gefüge, Eigenschaften – in Titan und Titanlegierungen. Peters, M.; Leyens, C. (Hrsg.). Wiley-VCH, 1. Aufl., 2002. Kapitel 1, S. 1-37. ISBN 978-3-527-30539-1.*
- [17] *Intermetallics 14 (2006), S. 1114-1122.*

EXTRUSION + DIECASTING + FOUNDRY + ROLLING
FINISHING + MACHINING + ENGINEERING & SIMULATION

FOCUS ON: AUTOMOTIVE AND RECYCLING

metef

21/ 24 JUNE 2017 VERONA | ITALY

EXPO OF CUSTOMIZED TECHNOLOGY
FOR THE ALUMINIUM, FOUNDRY CASTINGS
& INNOVATIVE METALS INDUSTRY

HOME OF CUSTOMIZED



Diamond sponsor:



HYDRO

www.metef.com