

**Gießtechnik der intermetallischen NiAl-Legierung FG 75-Herstellung
komplexer Bauteile**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Christof Dahmen

aus Aachen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser

Tag der mündlichen Prüfung: 15. September 2009

Gießerei-Institut: Forschung, Entwicklung, Ergebnisse

Band 60

Christof Dahmen

**Gießtechnik der intermetallischen NiAl-Legierung
FG 75 – Herstellung komplexer Bauteile**

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2009)

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8833-4

ISSN 1435-6198

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Gießerei-Institut der RWTH Aachen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 561. Dieser wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Herrn Prof. Dr.- Ing. Andreas Bührig-Polaczek danke ich für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Promotionszeit. Besonders die große Gestaltungsfreiheit und die Bereitstellung der für die Durchführung benötigten Anlagen haben in hohem Maße die Erstellung der vorliegenden Arbeit ermöglicht.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser danke ich für das große Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen des Gießerei-Instituts und von Access e.V. bedanken, ohne deren Unterstützung, in Form von fachlichen Diskussionen und Hilfe bei der Versuchsdurchführung, das Anfertigen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ein besonderer Dank gilt meinen Studien- und Diplomarbeitern, sowie meinen studentischen Hilfskräften für ihre tatkräftige Unterstützung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Marcel Rosefort, Manfred Grohn, Reinhard Weiergräber, Uwe Vroomen, Simon Hollad, Katrin Hagemann, Oliver Kättlitz und Nicole Oberröder. Sie standen mir bei allen Problemen stets mit Anregungen und Ideen hilfreich zur Seite.

Für das persönliche Engagement während meiner Zeit als Mitarbeiter des Gießerei-Instituts möchte ich Ingeborg Thouet, Brigitte Vanweersch, Sabine Wolters, Elke Schaberger-Zimmermann, Michael Krufft, Jürgen Nominikat und den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt unter Leitung von Dirk Freudenberg herzlich danken.

Schließlich möchte ich noch meiner Familie danken. Besonders meinen Eltern, die mich stets gefördert und ermutigt haben, gilt mein besonderer Dank. Ohne sie wäre mein Studium und die anschließende Promotion in der Form nicht möglich gewesen. Ein herzliches Dankeschön gilt Kirsten Schneider für ihre Geduld.

Zusammenfassung

Ein gesteigertes Umweltbewusstsein und der Zwang zur Energieeinsparung erfordern eine Wirkungsgradsteigerung bei mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken. Das bedeutet, dass diese Kraftwerke die Umwelt weniger belasten sollen und gleichzeitig sparsamer werden müssen.

Das Heraufsetzen der Prozesstemperaturen stellt eine Möglichkeit zur Wirkungsgradsteigerung dar. Dies erfordert die Entwicklung neuer Hochtemperaturwerkstoffe, da die heutzutage üblicherweise eingesetzten Ni-Basis Legierungen keine weiteren Temperatursteigerungen zulassen. Alternativen zu diesen Werkstoffen sind intermetallische Phasen, wie zum Beispiel NiAl-Basis Legierungen mit Schmelzpunkten oberhalb von 1600°C und Dichten zwischen 5,9 und 6,3 g/cm³. Am Gießerei-Institut der RWTH Aachen wurde die Gießtechnik für die intermetallische NiAl FG 75 Legierung entwickelt. Sehr problematisch bei der gießtechnischen Fertigung von Bauteilen ist ihr legierungstypischer Duktil-Spröd-Übergang. Unterhalb der Übergangstemperatur, etwa zwischen 1000°C und 700°C lässt sich dieser Werkstoffe kaum verformen. Die sehr hohen Temperaturen beim Abguss erfordern ein besonderes Formschalensystem, was bei diesen Temperaturen ausreichende chemische und mechanische Stabilität aufweist. Um Risse in den Bauteilen zu vermeiden darf es gleichzeitig nach der Erstarrung die metallische Schrumpfung nicht verhindern.

Zur Weiterentwicklung dieser Gießtechnik wurde im Rahmen dieser Arbeit ein geeignetes Kernmaterial zur Abbildung von hohlen Geometrien erarbeitet, das Formschalensystem wurde weiter adaptiert und die Prozessparameter, insbesondere Formschalentemperatur, Gießtemperatur und Abkühlgeschwindigkeit, wurden exakt angepasst. Zur Erreichung dieser Ziele wurden an speziell entwickelten Prinzipbauteilen verschiedene Kernmaterialien getestet und gleichzeitig Versuche zur Wandstärkenminimierung durchgeführt. Weiterhin wurde die Gussteilgröße auf bauteilrealistische Dimensionen gesteigert. Unterstützt wurden diesen Arbeiten durch die numerische Simulation, um geeignete Anschnitt- und Speisersysteme zu finden sowie Aussagen über Formfüllungs- und Erstarrungsverhalten bei unterschiedlichen Versuchsparametern zu erhalten.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit, die Entwicklung der Gießtechnik für hohle, geometrisch anspruchsvolle Bauteile aus FG 75 ist erreicht worden. Durch die Weiterentwicklung des Kernmaterials, die Optimierung des numerischen Datensatzes und der Prozessparameter konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, dünnwandige Hohlbauteile aus FG 75 fehlerfrei und reproduzierbar herzustellen.

Abstract

An increasing environmental awareness and the need to save energy require an increase of efficiency. This means that these powerplants should pollute the environment less and coexistantly get more economical.

An increase of the process temperature is an opportunity to increase the coefficient factor. This requires the investigation of new high temperature materials, since the nowadays used Ni Base alloys do not allow any further temperature increase. An alternative to these materials are the intermetallic phases such as NiAl base alloys with a melting point above 1600°C and a density between 5.9 and 6.3 g/cm³. At the Foundry Institute of RWTH Aachen University the casting technology of the NiAl FG75 alloy was investigated years ago. The typical ductile-brittle transition between app. 1000°C and 700°C is very critical during the component fabrication. Below this transition temperature the material is very hard to form. The high process temperatures require a special shell mould system with a sufficient chemical and mechanical stability at the befor mentioned temperatures. In order to avoid craps in the final component the shell mould system must allow metallic shrinking after solidification.

The aim of the her presented thesis was the investigation of core material which is capable to map hollow geometries. Further more the shell mould system was adapted and the process parameters, especially the mould temperature, the casting temperature and the cooling velocity were customized, In order to achieve the mentioned objectives the different core materials were tested at special principle components and simultaneously experiments to minimize the wall thickness. Furthermore the size of the casting was increased to realistic dimensions. These investigations were supported by numerical simulations in order to find adequate gating and feeding systems. Further informations were the prediction of the mould filling and solidification behaviour at the different test parameters.

The main objective of this thesis which was the investigation of the casting technology for hollow, geometrical-challenging components made of FG75 is achieved. The advancement of core material, the optimization of the simulation parameters and the process parameters made it possible to produce thin walled hollow components repeatable and without defects.

Gießtechnik der intermetallischen NiAl-Legierung FG 75

-Herstellung komplexer Bauteile

Kurzfassung	I
0.1 Motivation und Zielsetzung	I
0.2 Stand der Technik	I
0.3 Kernmaterialentwicklung	VII
0.4 Simulation	XV
0.5 Praktische Gießversuche und Parameterstudien	XVII
0.6 Diskussion und Ausblick	XXIV
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Stand der Technik und Grundlagen	3
2.1 Die intermetallische Phase NiAl	3
2.1.1 Kristallstruktur	3
2.1.2 Physikalische und chemische Eigenschaften von NiAl	8
2.1.3 Mechanische Eigenschaften	11
2.2 Entwicklung von NiAl-Basis Legierungen	14
2.2.1 NiAl-Ta-X-Legierungen	15
2.2.2 Der Werkstoff FG 75	17
2.2.3 Einsatz von NiAl-Legierungen	18
2.3 Verfahren zur Herstellung von NiAl-Basis Legierungen	18
2.3.1 Das Feingussverfahren	19
2.3.2 Hochtemperaturwerkstoffe im Feinguss	26
2.4 Formschalensystem für NiAl-Legierungen	29
2.5 Kernmaterial für NiAl	30
2.6 Probengeometrien	30
2.6.1 Konische massive Probengeometrie	30
2.6.2 Konische Hohlgeometrie	31
2.7 Numerische Simulation	32
3 Kernmaterialentwicklung	33
3.1 Herstellung der Prüfkörper	33
3.1.1 Kernmaterialien	33
3.1.2 Kernherstellung	35
3.2 Druckversuche	36
3.2.1 Versuchsdurchführung	37
3.2.2 Ergebnisse	39
3.3 Härteuntersuchungen	42
3.3.1 Versuchsdurchführung	43
3.3.2 Ergebnisse	45
3.4 Herstellung von realen Kernen	48
3.4.1 Kernherstellung	48
4 Simulation	54
4.1 Numerisch unterstützte Entwicklung der Gießtechnologie	54
4.2 Verbesserung des Datensatzes	55

5	Praktische Gießversuche und Parameterstudien	62
5.1	Die Versuchsanlage	62
5.2	Hohlgeometrien mit variablen Wandstärken	64
5.2.1	Wachsmodellherstellung und Kernintegration	64
5.2.2	Bauteilentwicklung mittels numerischen Werkzeugen	66
5.2.3	Formschalenherstellung	67
5.2.4	Versuchsdurchführung	68
5.2.5	Auswertung der Abgussversuche	71
	5.2.5.1 Gussstücke mit unbehandelten 1801-ULC-SF-Kernen	71
	5.2.5.2 Gussstücke mit gebrannten 1801-ULC-SF-Kernen	73
	5.2.5.3 Gussstücke mit geschichteten und gebrannten 1801-ULC-SF-Kernen	75
	5.2.5.4 Gussstücke mit geschichteten und gebrannten 1804-ULC-Kernen	76
	5.2.6 Ergebnisse	78
5.3	Steigerung der Bauteilgröße	81
	5.3.1 Plattengeometrien	81
	5.3.2 Geometrievierungen	85
5.4	Herstellungsdemonstrator	87
	5.4.1 Entwicklung des Bauteildesigns	87
	5.4.2 Herstellung des Bauteils	88
	5.4.2.1 Die Wachsmatrize	88
	5.4.2.2 Simulation	89
	5.4.2.3 Probenherstellung	94
	5.4.2.4 Ergebnisse	95
6	Diskussion und Ausblick	100
7	Literaturverzeichnis	104