

Hochtemperaturwerkstoffe auf Basis der intermetallischen Phase NiAl

Die Einsatzgebiete von NiAl-Basislegierungen als Strukturwerkstoffe sind thermisch hoch belastete Komponenten in Energiewandlungssystemen. In vom BMBF geförderten Verbundprojekten mit Industriebeteiligung wurden die Herstellung und der Einsatz von NiAl-Komponenten für Motoren, Triebwerke und stationäre Gasturbinen unter Einsatzbedingungen untersucht. Im Folgenden werden am Beispiel des Systems NiAl-Re die Mikrostrukturen und mechanischen Eigenschaften refraktärmetall-verstärkter NiAl-Basislegierungen erläutert.

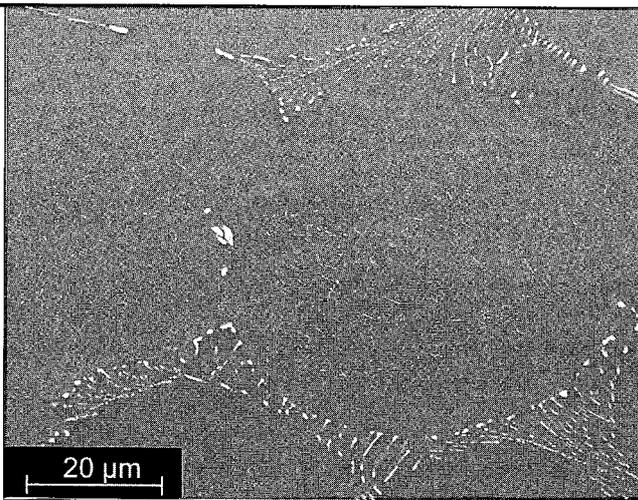


Bild 1

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur der hypoeutektischen NiAl-4,2Gew.%Re-Gusslegierung. NiAl-Primärkristalle mit Re-Ausscheidungen in Netzwerken von NiAl-Re-Eutektikum, NiAl (dunkel), Re (hell).

Eutektische Systeme NiAl mit Refraktärmetallen

NiAl bildet mit den kubisch raumzentrierten Refraktärmetallen V, Cr, Mo und W sowie mit dem hexagonalen Re quasibinäre eutektische Systeme (Tabelle). Die Löslichkeiten der Refraktärmetalle in NiAl unterhalb der eutektischen Temperaturen ist gering, nimmt aber zur eutektischen Temperatur hin zu. Die Mikrostrukturen der hypoeutektischen Gusslegierungen bestehen aus NiAl-Primärkristallen und Eutektikum, dessen Volumenanteil sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Refraktärmetallkonzentration bis zu rein eutektischer Mikrostruktur variieren lässt. Als besonderes Charakteristikum weisen die NiAl-Primärkristalle hypoeutektischer Gusslegierungen fein dispers verteilte Refraktärmetallausscheidungen auf. Die Kombination dieser beiden Gefügeanteile mit unterschiedlichen Morphologien der Refraktärmetallausscheidungen bestimmt wesentlich die mechanischen Eigenschaften der Gusslegierungen. Der Gesamtvolumenanteil der zweiten Phase nimmt in Abhängigkeit vom Refraktärmetall ab, wobei die eutektische Schmelztemperatur und damit die thermische Stabilität der Mikrostrukturen zunimmt.

Gerichtet erstarrte Eutektika NiAl mit V, Cr und Mo wurden hergestellt und in der Literatur charakterisiert. Diese NiAl-Refraktärmetallfaser-Komposite zeichnen sich durch verbesserte Bruchzähigkeiten bei Raumtemperatur aus.

Die raumzentrierte geordnete intermetallische Phase NiAl weist eine hohe kongruente Schmelztemperatur von 1676 °C, eine hohe thermische Leitfähigkeit von 76 W/K·m, eine geringe Dichte von 5,9 g/cm³ [1] und eine hervorragende Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit bis 1400 °C auf [2].

Wichtige Zielsetzungen der Entwicklung von NiAl-Basislegierungen als Strukturwerkstoffe sind die Verbesserung der Plastizität unterhalb der Spröd-Duktil-Übergangstemperatur (SDÜT) von 300 °C [1] und die Erhöhung der Warmfestigkeit bei Temperaturen > 800 °C von monolithischem NiAl [1]. Eine Duktilitätssteigerung unterhalb der SDÜT wird durch hohe Volumenanteile duktiler zweiter Phasen erreicht. Eine optimale Verteilung dieser Phasen in der NiAl-Matrix steigert gleichzeitig effektiv die Warmfestigkeiten. Notwendige Voraussetzungen für den potentiellen Einsatz dieser Legierungen auf NiAl-Basis sind die Durchführbarkeit der großtechnischen Legierungsherstellung und die thermische Stabilität der Mikrostruktur.

Autoren

Dipl.-Phys. Ralf Rablbauer, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Werkstofftechnik am MPIFE,
Tel.: 02 11/67 92-388
Fax: 02 11/67 92-295;
E-Mail: rablbauer@mpie.de.
Prof. Dr.-Ing. Georg Frommeyer, Leiter der Abteilung Werkstofftechnik am MPIFE,
Tel.: 02 11/67 92-214
Fax: 02 11/67 92-295;
E-Mail: frommeyer@mpie.de
Max-Planck-Institut für Eisenforschung MPIFE, Max-Planck-Str. 1
40237 Düsseldorf.

Eutektisches System	Konzentrations c_{eut}		Temperatur T_{eut} °C
	At. %	Gew. %	
NiAl-V	40	44,2	1360
NiAl-Cr	34	37,5	1450
NiAl-Mo	9,5	19,0	1580
NiAl-W	0,9	3,8	1620
NiAl-Re	1,25	5,2	1670

Tabelle

Eutektische Konzentrationen und Temperaturen der quasibinären eutektischen Systeme NiAl mit den Refraktärmetallen V, Cr, Mo, W und Re.

peratur aus. Die Systeme NiAl-V und NiAl-Cr weisen K_{IC} -Werte $> 20 \text{ MPa m}^{1/2}$ auf [3], die auf die hohen Volumenanteile der duktilen Refraktärmetalle V und Cr zurückzuführen sind. Allerdings verschlechtern hohe Volumengehalte an V oder Mo die Oxidationsbeständigkeit beträchtlich und Legierungen des Systems NiAl-V weisen zudem eine niedrige Warmfestigkeit auf.

NiAl-Re-Legierungen

Das quasibinäre eutektische System NiAl-Re zeichnet sich durch eine außerordentlich hohe Schmelztemperatur von $T_{eut} = 1670 \text{ °C}$ und eine hohe thermische Stabilität der Mikrostruktur aus. Infolge der hohen Schmelztemperatur von Re ($T^S = 3180 \text{ °C}$) und der im Vergleich zu NiAl höheren Schmelzentropie erstarrt das Eutektikum irregulär. Vollständig eutektische Mikrostrukturen können im Gusszustand wegen der relativ hohen Abkühlgeschwindigkeiten nicht hergestellt werden. Die Mikrostruktur der in Kupferkokillen vergossenen untereutektischen NiAl-4,2Gew.%Re-Legierung besteht aus NiAl-Primärkristallen von $60 \mu\text{m}$ mittlerer Größe in Netzwerken von eutektisch erstarrten Re-Fasern mittleren Durchmessers von 500 nm (**Bild 1**). Neben größeren stabförmigen Re-Ausscheidungen beobachtet man in TEM-Untersuchungen innerhalb der NiAl-Primärkristalle feindispers verteilte Re-Ausscheidungen mit Durchmessern kleiner 10 nm (**Bild 2**).

Ein gerichtet erstarrtes NiAl-5,2Gew.%Re-Eutektikum wurde nach der Bridgmann-Methode bei einer Ziehgeschwindigkeit von 30 mm/h hergestellt. Die Mikrostruktur besteht aus eutektischen Zellen von $1,5 \text{ mm}$ Durchmesser und Re-Fasern leicht plattenförmigen Querschnitts mit Kantenlängen von 200 bis 800 nm (**Bild 3**). Die Re-Fasern weisen eine außerordentlich hohe thermische Stabilität auf; in Glühbehandlungen bei 1300 °C bis 1000 h wurde keine Vergrößerung beobachtet.

Die Re-Fasern sind nach der Orientierungsbeziehung:

$$[101]\text{NiAl} \parallel [0001]\text{Re}, \{11\bar{1}\}\text{NiAl} \parallel \{1\bar{2}10\}\text{Re}$$

in die NiAl-Matrix eingebettet. Bis auf Abweichungen bedingt durch den konkaven Verlauf der Erstarrungsfront innerhalb des gerichtet erstarrten Stabes beobachtet man eine $[110]$ -Orientierung der NiAl-Matrix parallel zur Ziehrichtung.

Mechanische Eigenschaften von NiAl-Basislegierungen

Hypoeutektische NiAl-Gusslegierungen mit Refraktärmetallzusätzen zeichnen sich

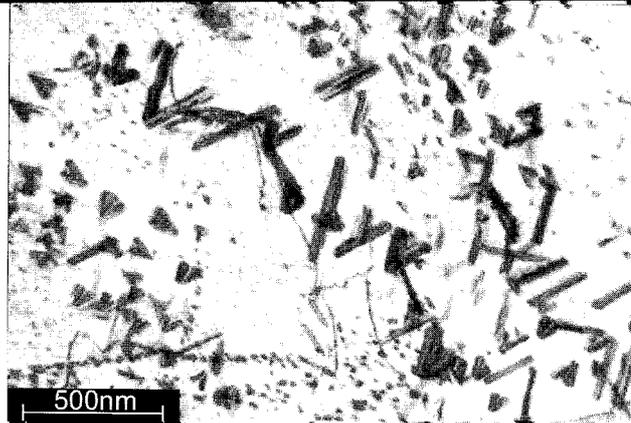


Bild 2

Transelectronenmikroskopische Aufnahme der Re-Ausscheidungen (dunkel) in den NiAl-Primärkristallen der hypoeutektischen NiAl-4,2Gew.%Re-Gusslegierung. NiAl-Matrix (hell).

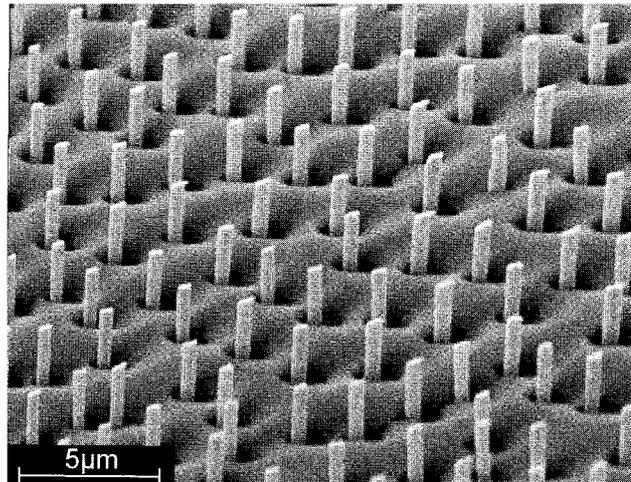


Bild 3

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur des gerichtet erstarrten NiAl-5,2Gew.%Re-Eutektikums. NiAl-Matrix (dunkel) herausgeätzt.

gegenüber reinem NiAl durch verbesserte Plastizität im Druckversuch bei Raumtemperatur aus, die auf eine Kornfeinung der Mikrostruktur und die Behinderung der Rissausbreitung an Phasengrenzen zwischen den NiAl-Primärkristallen und den Eutektika zurückzuführen ist. Die plastische Verformung im Druckversuch ϵ_{dpl} erhöht sich beispielsweise von 3% für polykristallines NiAl im Gusszustand auf 30% für NiAl-31Gew.%Cr, 9% für die NiAl-4,2Gew.%Re-Gusslegierung und 10% für das gerichtet erstarrte NiAl-5,2Gew.%Re-Eutektikum. Nach weiterer Kornfeinung der NiAl-4,2Gew.%Re-Gusslegierung durch Heißstrangpressen erhöht sich ϵ_{dpl} auf 30% .

Die E-Module und die Warmfestigkeiten von einkristallinem NiAl sind infolge der geordneten kubischen Struktur anisotrop. In Einkristallen beobachtet man die geringsten Festigkeiten in $[110]$ -Orientierung. Mit steigender Temperatur wird die Anisotropie der Festigkeiten allerdings geringer und bei Temperaturen $> 800 \text{ °C}$ betragen die Fließspannungen für alle Orientierungen $< 100 \text{ MPa}$ [1]. Polykristallines NiAl weist wegen des Einsetzens weiterer Verformungsmechanismen oberhalb der SDÜT niedrigere Warmfestigkeiten als $[110]$ -orientierte Einkristalle auf (**Bild 4**).

Durch hohe Volumengehalte an Refraktärmetallen, wie beispielsweise in der hypoeutektischen NiAl-31Gew.%Cr-Gusslegierung werden die Warmfestigkeiten im Vergleich zu polykristallinem und einkristallinem NiAl, insbesondere unterhalb 800 °C erheblich gesteigert [4]. Das gerichtet erstarrte NiAl-5,2Gew.%Re-Eutektikum weist oberhalb 800 °C mit der NiAl-31Gew.%Cr-Gusslegierung vergleichbare Warmfestigkeiten auf. Der Volumengehalt an Re-Fasern beträgt $1,6 \text{ Vol.}\%$ und man berechnet nach der Mischungsregel durch volumenanteilige Addition der Fließspannungen beider Phasen vergleichsweise geringe Festigkeitssteigerungen $< 10 \text{ MPa}$ bei 1000 °C . Der dominierende Festigkeitsmechanismus ist die Dispersionsverstärkung durch die Re-Fasern.

Die fein dispers verteilten Re-Ausscheidungen in den NiAl-Primärkristallen der NiAl-4,2Gew.%Re-Gusslegierung (**Bild 2**) bewirken eine noch effektivere Dispersionsverstärkung. Die Warmfestigkeiten dieser Gusslegierung sind höher als die des gerichtet erstarrten Eutektikums und im Vergleich zu monolithischem NiAl im Gusszustand werden die Warmfestigkeiten insbesondere oberhalb 800 °C deutlich erhöht.

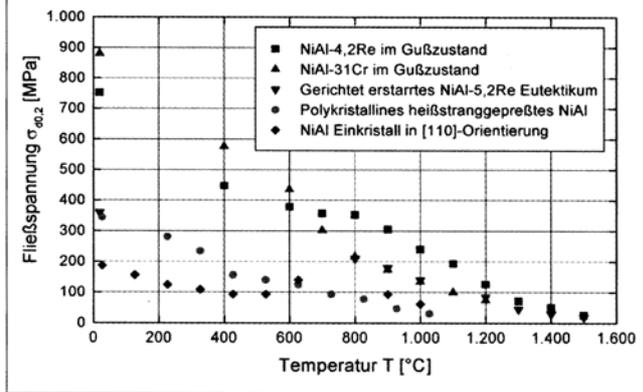


Bild 4

Fließspannungen im Druckversuch: $\sigma_{0,2}$ in Abhängigkeit von der Temperatur verschiedener Ni-Al-Legierungen im Vergleich zu polykristallinem heißstranggepresstem und einkristallinem NiAl in [110]-Orientierung [1].

und Beschichtungen von Ni-Basis-Superlegierungen.

Literatur

- [1] Noebe, R. D.; Bowman, R. R.; Nathal, M. V.: *The Physical and Mechanical Metallurgy of NiAl*. In: *Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds*. Stoloff, N. S., and Sikka, V. K. (Ed.), New York, Chapman & Hall, (1996), S.212–296.
- [2] Grabke, H. J.: *Oxidation of NiAl and FeAl*. *Intermetallics* 7 (1999), S.1153–1158.
- [3] Ramasundaram, P.; Bowman, R. R.; Soboyejo, W. O.: *An investigation of fatigue and fracture in NiAl-Mo composites*. *Mat.Sci.Eng.A.* 248 (1998), S.132–146.
- [4] Schäfer, H.-J.: *Entwicklung und Eigenschaftscharakterisierung hochwärmfester Werkstoffe mit intermetallischer NiAl-Matrix*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1997.
- [5] BMBF-Verbundprojekte 03M3019, 03M3034, 03M3059, 03N2009.

Einsatzgebiete von NiAl-Basislegierungen

Die Einsatzgebiete von NiAl-Basislegierungen als Strukturwerkstoffe sind thermisch hoch belastete Komponenten in Energiewandlungssystemen. In vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ge-

förderten Verbundprojekten mit Industriebeteiligung wurden die Herstellung und der Einsatz von NiAl-Komponenten für Motoren, Triebwerke und stationäre Gasturbinen unter Einsatzbedingungen untersucht [5]. Potentielle weitere Anwendungsbeispiele sind Heizleiter in Öfen, Wärmeaustauschrohre, Reaktionsrohre für die chemische Industrie