

Gruppe

**LEBENSDAUERKONZEPTE, THERMOMECHANIK**

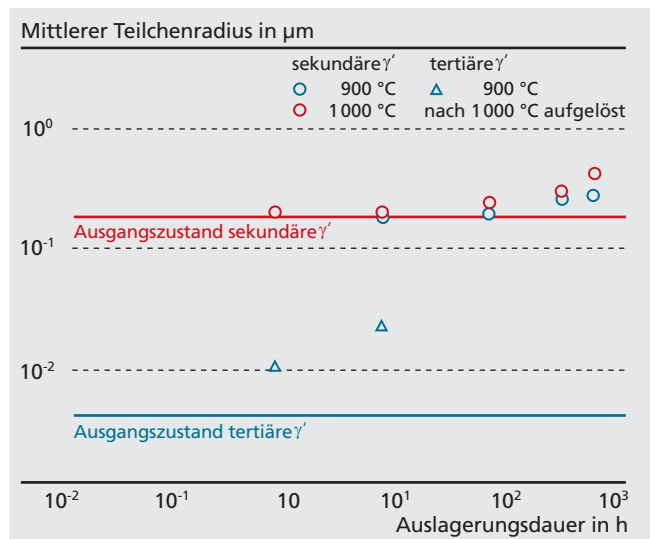
Dr. Christoph Schweizer | Telefon +49 761 5142-382 | christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

## ABGASTURBOLADER: METHODEN FÜR EFFIZIENTEN WERKSTOFFEINSATZ IN TURBINENRÄDERN

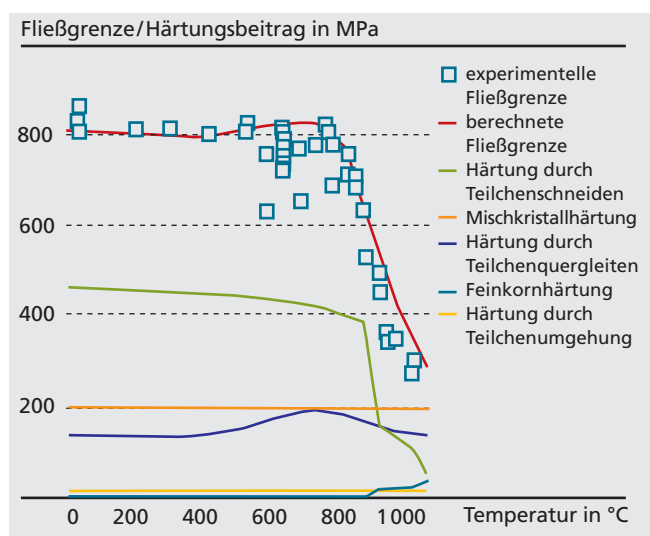
Eine Maßnahme zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen ist die Erhöhung der Abgastemperatur. Für Turbinenräder des Abgasturboladers werden Werkstoffe mit hohen mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit bei Temperaturen zwischen 800 und 1000 °C benötigt. Dies sind teure Nickelbasislegierungen mit Legierungselementen, die selten auf der Erde vorkommen und teilweise nur in politisch instabilen Regionen bezogen werden können. In einem vom baden-württembergischen Landesministerium für Wirtschaft und Wohnungsbau geförderten Vorhaben wird am Fraunhofer IWM ein integrales Verfahren zur systematischen Substitution von Legierungselementen in technischen Hochtemperaturlegierungen am Beispiel des Turbinenrads entwickelt und bewertet. Ziel ist es, den Gehalt kritischer beziehungsweise teurer Legierungen bei gleichbleibender Funktionalität deutlich zu reduzieren.

### Mechanismen der Hochtemperaturfestigkeit

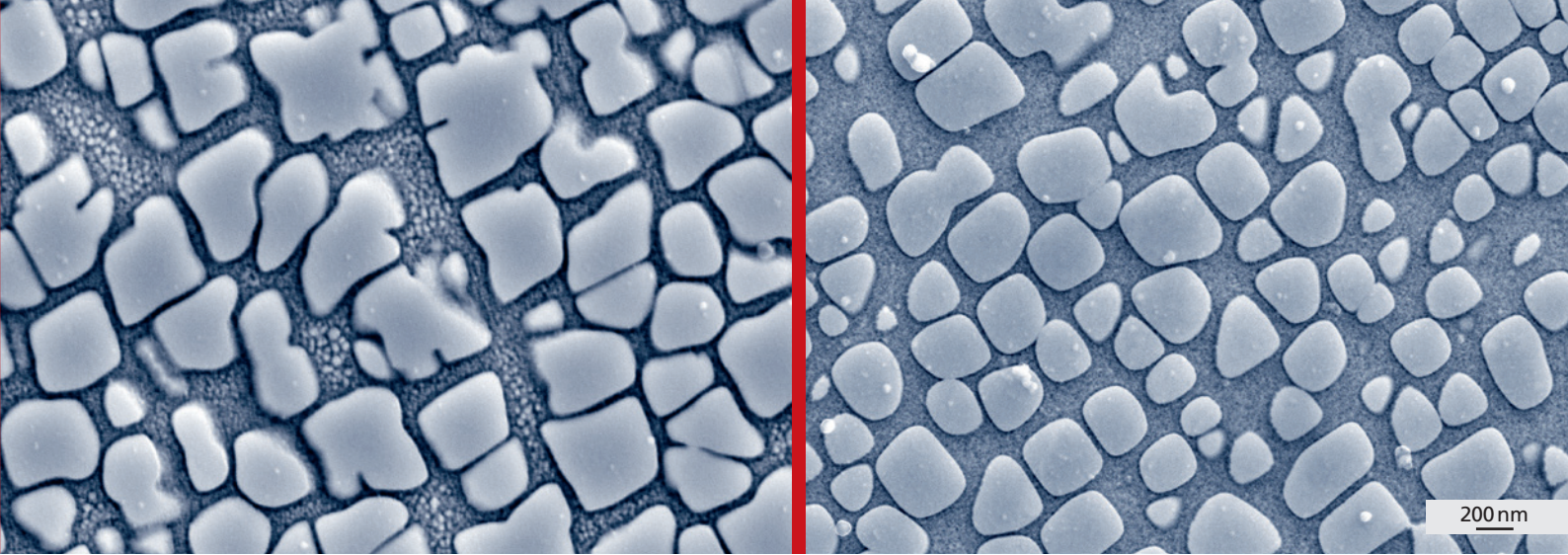
Intermetallische Phasen, genannt  $\gamma'$ -Teilchen, tragen maßgeblich zur Festigkeit von Nickelbasislegierungen bei hohen Temperaturen bei. Sie härten die Nickelmatrix, indem sie die Versetzungsbewegungen behindern. Der Härtingsbeitrag zur statischen Fließgrenze hängt von der Größe und Morphologie der  $\gamma'$ -Teilchen ab. Die Versetzungen schneiden kleinere  $\gamma'$ -Teilchen und umgehen sie, wenn sie eine kritische Größe erreicht haben. Bei Temperaturen zwischen 600 und 800 °C steigt die Fließgrenze etwas an, weil Versetzungen quer durch größere  $\gamma'$ -Teilchen gleiten. Der Herstellungsprozess ist darauf optimiert, verschiedene  $\gamma'$ -Teilchenpopulationen gezielt auszuscheiden. Bei hohen Temperaturen setzen Diffusionsprozesse ein, die zur Vergrößerung, zum Zusammenwachsen und schließlich zur Auflösung der  $\gamma'$ -Teilchen führen können. Die chemische Zusammensetzung der Nickelbasislegierung und die Morphologie der  $\gamma'$ -Teilchen tragen maßgeblich dazu bei, bei welcher Temperatur und welchen Zeiten die Diffusions-



1 Mittlerer Teilchenradius der  $\gamma'$ -Teilchen als Funktion der Auslagerungszeit und der Auslagerungstemperatur in MAR-M247.



2 Experimentelle und modellierte Fließgrenze der Nickelbasislegierung MAR-M247 in Abhängigkeit von der Temperatur.



3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der  $\gamma'$ -Teilchen in MAR-M247 im Ausgangszustand (links) und nach zehnstündiger Auslagerung bei 1 000 °C (rechts), Bild eingefärbt.

prozesse einsetzen und mit welcher Geschwindigkeit sie bei einer gegebenen Temperatur erfolgen. Diese Mikrostrukturveränderungen führen zur Verschlechterung der Hochtemperaturfestigkeit. Ein weiterer bedeutender Mechanismus ist die Härtung des Mischkristalls durch Fremdatome, die ebenfalls als Hindernisse für mobile Versetzungen wirken.

#### Mikrostrukturentwicklung bei hohen Temperaturen

Die temperatur- und zeitabhängige Mikrostrukturentwicklung mehrerer Nickelbasislegierungen mit unterschiedlichen Gehalten an kritischen beziehungsweise seltenen Legierungselementen wurde systematisch untersucht. Hierzu wurde der  $\gamma'$ -Teilchenradius im Ausgangszustand und nach Auslagerung im Laborofen bei 900 °C beziehungsweise bei 1 000 °C zwischen einer und tausend Stunden ermittelt. Feinverteilte sekundäre  $\gamma'$ -Teilchen und feinste tertiäre  $\gamma'$ -Teilchen zwischen den sekundären tragen maßgeblich zur Härtung bei (Abbildung 3 links). Die Entwicklung des mittleren Teilchenradius als Funktion der Auslagerungsdauer und -temperatur wurde durch automatisierte Bildverarbeitung ermittelt (Abbildung 1). Nach Auslagerung bei 900 °C vergrößern und wachsen die feinsten tertiären  $\gamma'$ -Teilchen am schnellsten. In MAR-M247 sind sie nach Auslagerungszeiten von 100 Stunden aufgelöst. Bei 1 000 °C sind sie bereits nach einer Stunde Auslagerung aufgelöst (Abbildung 3 rechts). Die sekundären  $\gamma'$ -Teilchen wachsen schneller bei 1 000 °C als bei 900 °C.

#### Mikrostrukturbasierte Modellierung der Hochtemperaturfestigkeit

Ein Modell wurde erprobt, das die Fließgrenze aus den Beiträgen der Teilchen-, Mischkristall- und Feinkornhärtung einheitlich beschreibt. Die nach einstündiger Auslagerung gemessenen  $\gamma'$ -Teilchenradii und im Ausgangszustand

gemessenen Korngrößen wurden eingesetzt. Abbildung 2 zeigt experimentelle Fließgrenzen aus der Literatur, die modellierte Fließgrenze sowie die Härtungsbeiträge durch die jeweiligen Mechanismen. Der Beitrag durch Schneiden von feinsten tertiären  $\gamma'$ -Teilchen durch Versetzungen ist der höchste. Er sinkt bei Temperaturen oberhalb 850 °C durch ihre Vergrößerung und Auflösung bei 1 000 °C. Der Beitrag durch Mischkristallhärtung ist der zweithöchste. Der Beitrag durch Quergleiten der größten primären  $\gamma'$ -Teilchen beschreibt den Fließgrenzenverlauf zwischen 600 und 800 °C. Der Fließgrenzenbeitrag durch Feinkornhärtung ist sehr gering für diese Nickelbasislegierung, da die Körner sehr groß sind. Der Beitrag durch Teilchenumgehung ist ebenfalls niedrig. Er ist für große primäre  $\gamma'$ -Teilchen wirksam, die in der Detailaufnahme in Abbildung 2 nicht zu sehen sind.

Gegenstand künftiger Untersuchungen wird es sein, die Entwicklung des Teilchenradius der  $\gamma'$ -Teilchen durch diffusionskinetische Berechnungen vorherzusagen und diese zur Bewertung der temperatur- und dehnratenabhängigen Fließgrenze sowie der Kriecheigenschaften zu nutzen. Zur Validierung dieses prädiktiven Modells werden neben den mikrostrukturellen Untersuchungen mechanische Kennwerte an mehreren Nickelbasislegierungen ermittelt.

Dr. Valérie Friedmann, Dr. Christoph Schweizer