



Arbeitsblatt

HiPerComp Projekt 2: Entwicklung von Wärmebehandlungskonzepten zur Einstellung beanspruchungsgerechter Gefüge

AiF-Nr.:
16687N

Obmann:
Dr.-Ing. Winfried Gräfen

beteiligte Unternehmen
Es haben über 40 Unternehmen das
Gemeinschaftsvorhaben "HiPerComp"
begleitet.

Laufzeit:
01.06.2011 – 31.05.2014

Erstelldatum:
05.11.2014

Forschungsstelle:
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:
Name

Sachbearbeiter:
Holger Surm

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 4 (Einsatzhärten)
FA 21 (Gefüge und mechanische
Eigenschaften)

Zielsetzung und Lösungsweg

Aus dem Zwang zur Erhöhung der spezifischen Beanspruchbarkeit der Werkstoffe folgt die Notwendigkeit, die vorherrschenden Schädigungsmechanismen besser zu verstehen und die Beanspruchbarkeit durch die Weiterentwicklung bestehender Werkstoffe bzw. die Entwicklung neuer Werkstoff- und Wärmebehandlungskonzepte zu erhöhen. Bei diesen Arbeiten stehen insbesondere die Erhöhung der Prozesssicherheit, die Unempfindlichkeit der Bauteile gegenüber Überlasten sowie die Unempfindlichkeit des Werkstoffs gegenüber Werkstoffversagen an Einschlüssen im Fokus der Arbeiten und eher weniger die alleinige Steigerung der Festigkeit.

Daraus folgt, dass das bisherige Konzept bei der Weiterentwicklung hoch und höchst beanspruchbarer Werkstoffe überdacht und geändert werden muss. Bislang wurde und wird die hohe Beanspruchbarkeit dadurch erzielt, dass hochreine Werkstoffe zum Einsatz kommen. Hierdurch konnten zwar hohe Festigkeiten erreicht werden, allerdings stieg auch die Empfindlichkeit gegenüber Einzelstörungen, wie vereinzelt harten Einschlüssen oder Clustern sonst zulässiger kleiner Einschlüsse in kritischen Bereichen des Bauteils.

Die Zielsetzung des Gemeinschaftsvorhabens „HiPerComp - Innovative Konzepte zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit hochbeanspruchter Bauteile“ (www.hipercomp.de) liegt auf

der signifikanten Erhöhung der Unempfindlichkeit des Werkstoffs gegenüber dem Versagen an Einzeleinschlüssen oder Einschlussclustern. Dieses Ziel wurde durch die interdisziplinäre Kooperation von Metallurgen (Stahlentwicklung, -herstellung, Halbzeugherstellung), Werkstofftechnik / Wärmebehandlung, Konstruktion und Werkstoff- bzw. Bauteilerprobung in insgesamt sechs Projekten erarbeitet.

Das Hauptziel des Projektes „Entwicklung von Wärmebehandlungskonzepten zur Einstellung beanspruchungsgerechter Gefüge“ lag in der Entwicklung von industriell anwendbaren Wärmebehandlungsmethoden für die neu entwickelten Werkstoffe, um die Verfestigungspotenziale dieser Stähle im industriellen Maßstab nutzen zu können.

Folgende Maßnahmen wurden im Projekt im Detail untersucht:

1. Härten durch kohärente Ausscheidungen,
2. Härten durch aluminiumhaltige κ -Karbide,
3. Mischkristallverfestigung durch Silizium,
4. Kornfeinung,
5. Ausnutzung der verformungsinduzierten Martensitbildung.

Ergebnisse

Aus Sicht der Wärmebehandlung erwiesen sich die Maßnahmen zur Teilchenausscheidung von Kupfer und Aluminium als nicht erfolgsversprechende Optionen im Bereich der höchstfesten Stähle. Grund dafür ist das hohe Temperaturniveau, bei denen die Teilchenausscheidung abläuft, so dass in diesem Wärmebehandlungsschritt das Härtinggefüge deutlich an Festigkeit verliert. Als erstes Beispiel dient das Verhalten beim Anlassen eines Al-legierten 100Cr6 (Bild 1). Das Anlassverhalten der gehärteten Al-legierten Variante ist im Vergleich zum Referenzwerkstoff stark modifiziert. Dabei ist positiv zu vermerken, dass die Al-legierte Variante eine erhöhte Anlassbeständigkeit besitzt. Trotz einer geringeren Abschreckhärte tritt ein signifikanter Härteabfall erst ab einer Temperatur oberhalb von 400 °C auf. Dieser Effekt ist aber nicht auf die Ausscheidungsbildung von FeAlC-Karbid zurückzuführen, denn die Ergebnisse der röntgenographischen Untersuchungen sowie der Messungen der Elementverteilung mittels Mikrosonde weisen eine Ausscheidungsbildung erst bei deutlich höheren Temperaturen ab 600 °C nach.

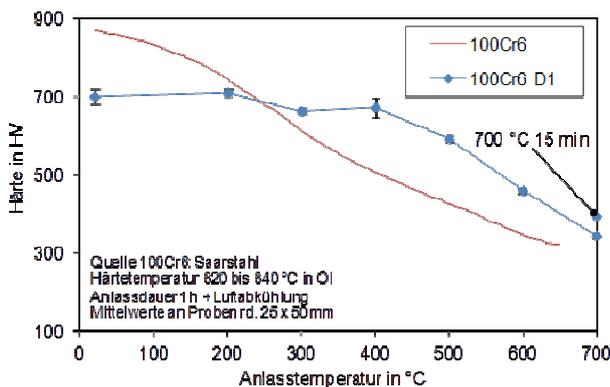


Bild 1: Anlassschaubild (100Cr6 D1 (+5,8 Masse-% Al); Zeit-Temperatur-Folge: 3 K/min 1050 °C 5 min / Gas N₂ t₈₅=9 s / T_{Anl.} 2 h)

Um Effekte der Kupferausscheidungen nutzen zu können, müssen vergleichsweise hohe Anlasstemperaturen um die 500 °C angestrebt werden. Der Einfluss der Anlasstemperatur auf den Härteverlauf im einsatzgehärteten Zustand (Werkstoff 18CrNiMo7-6 mit 1,0 Masse-% Kupfer) kann dem Bild 2 entnommen werden. Mit steigender Anlasstemperatur ist ein deutlicher Härteabfall über den gesamten Querschnitt zu verzeichnen. Insbesondere das Anlassen bei einer Temperatur von 480 °C, die sich in den Untersuchungen zum Anlassverhalten zur Ausbildung der Kupferausscheidungen als optimal herausgestellt hatte, hat einen Härteverlauf als Resultat, welcher die Kriterien nach ISO-6335-5 bezüglich der Randhärte nicht mehr erfüllt.

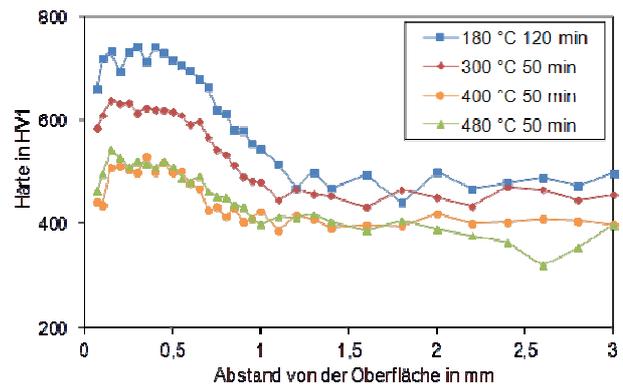


Bild 2: Härteverlauf nach dem Einsatzhärten in Abhängigkeit von verschiedenen Anlassbedingungen (18CrNiMo7-6 J17 (+1,0 Masse Cu), Wärmebehandlung: Niederdruckaufkohlung 940 °C, Acetylen, Soll-CHD=0,85 mm, Gasabschreckung 10 bar N₂; Anlassen T_{Anl.}, t_{Anl.} siehe Legende)

Durchaus positive Ergebnisse können der Mischkristallverfestigung mittels Silizium zugewiesen werden. Beim untersuchten Vergütungsstahl C56E2 konnte eine Steigerung der Härte und der Anlassstabilität verzeichnet werden. Die Entwicklung der Härte in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur ist in Bild 3 für die Varianten C56E2 DF0 (Referenz Industrie) und DF1 sowie DF2 (0,8 bzw. 2,0 Masse-% Si) dokumentiert. Im Vergleich zum Referenzwerkstoff muss für die Variante DF1 die Anlasstemperatur von 220 °C auf 240 °C erhöht werden. Bei einem Siliziumgehalt von 2,0 Masse-% ist noch eine weitere Steigerung auf eine Anlasstemperatur von 350 °C notwendig, um in diesem Fall die geforderte Grenzhärte von 650 HV1 einzustellen.

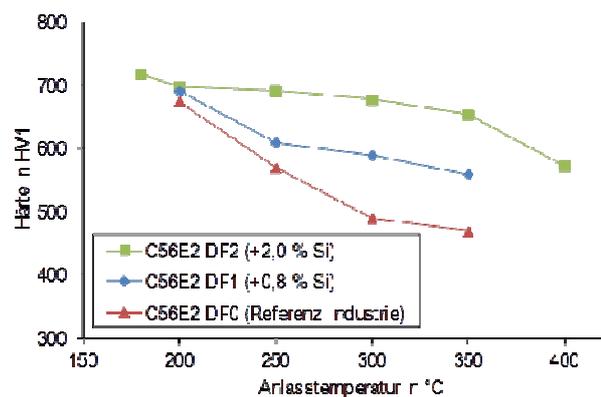


Bild 3: Härte nach dem Vergüten in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur (Referenzwerkstoff C56E2, Zeit-Temperatur-Folge: Salzbad 850 °C 35 min / Wasser 15 min, Anladdauer 2 h)

Das Element Silizium wurde neben Aluminium zudem zum Einstellen TRIP-fähiger Gefüge eingesetzt. Im Bereich der Einsatzstähle (Referenzwerkstoff 18CrNiMo7-6) gelang in der Randschicht das Einstellen thermisch stabiler Restaustenitgehalte (Bild

4). In diesem Zusammenhang ist im Moment das Wärmebehandlungsverfahren Einsatzbainitisieren zu bevorzugen, da diese durch eine relativ einfache Prozessführung und Restaustenitgehalte von bis zu 40 Vol.-% besteht. Allerdings bedarf es noch Optimierung in Bezug auf die erzielten Härten. Hier könnte im Bereich der Einsatzstähle eine Verfahrensvariante Quenching+Partitioning+Tempering zum Einsatz kommen.



Bild 4: Gefüge nach dem Bainitisieren (18CrNiMo7-6 J8 (+1,0 Masse-% Si); Zeit-Temperatur-Folge: 3 K/min 950 °C 5 min / 240 °C 10 h / RT; Schlißflage: Längsschliff; Ätzung: 50 s, 3% alk. HNO₃)

Im Bereich der Wälzlagerstähle (Referenzwerkstoff 100Cr6) konnten sowohl mittels Bainitisieren als auch über Quenching+Partitioning+Tempering erfolgversprechende Wärmebehandlungsvarianten an Silizium und Aluminium legierten Varianten aufgezeigt werden. Auch in diesem Fall erscheint das Bainitisieren das größere Potenzial zur industriellen Nutzung der neuen Legierungsvarianten im Konzept TRIP aufzuweisen, da aufgrund der einfacheren Prozessführung das Einstellen verschiedener Phasenanteile Bainit und Restaustenit ermöglicht wird, womit ein Anpassen an spezifische Bauteileigenschaften gegeben ist. Der resultierende Restaustenitgehalt nach dem Bainitisieren (Bild 5) wird maßgeblich durch die Umwandlungsvorgänge bestimmt. Durch die Verkürzung der Haltedauer wird entsprechend weniger Austenit in Bainit umgewandelt. Folglich steigt auch der Restaustenitgehalt nach dem Abschrecken auf Raumtemperatur an, solange die Martensitbildung beim Abschrecken vermieden werden kann. Es bildet sich ein Maximum im Restaustenitgehalt aus, welches in den röntgenographischen Messungen im bainitisierten Zustand für drei Varianten (Al- und Si legiert) auch ermittelt werden konnte. Dabei liegt der maximale Restaustenitgehalt bei den Al-legierten bei ca. 40 Vol.-% und wird nach fünf Stunden erreicht. Bei der Si-legierten Variante stellt sich das Maximum nach drei Stunden ein. Es liegt allerdings mit etwa 35 Vol.-% leicht unter den Werten der Al-legierten Varianten. Zudem ist der Abfall des Restaustenitgehaltes mit zunehmender Bainitisierdauer stärker ausgeprägt.

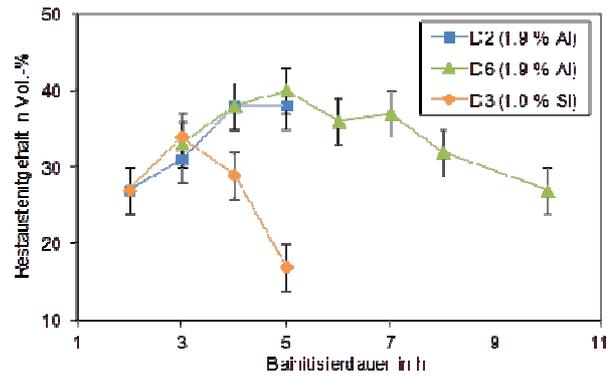


Bild 5: Restaustenitgehalt nach dem Bainitisieren für verschiedene Varianten (Referenzwerkstoff 100Cr6; Zeit-Temperatur-Folge: 3 K/min 900 °C 5 min / 220 °C t_{Bainit} / RT)

Durch Änderungen in der Zeit-Temperatur-Folge kann die Korngröße modifiziert werden. Dieser Effekt ist in erster Linie auf die zusätzlichen Umwandlungen zurückzuführen, die beim Einfachhärten im Vergleich zum Direkthärten durchlaufen werden. Allerdings konnten durch diese Maßnahme die Korngrößenverteilung des Referenzwerkstoffes 18CrNiMo7-6 nicht so weit zu kleineren Korngrößen verschoben werden, dass die Werte des Nb-legierten Zustandes erreicht werden konnten (Bild 6). Aus Sicht der Wärmebehandlung kann deshalb das Legieren mit Niob befürwortet werden, da so sichergestellt werden kann, dass ein feinkörniges Härtungsgefüge bei konventioneller Prozessführung erzielt wird. Voraussetzung hierfür ist aber eine korrekte Einstellung des Ausscheidungszustandes während der thermomechanischen Behandlung.

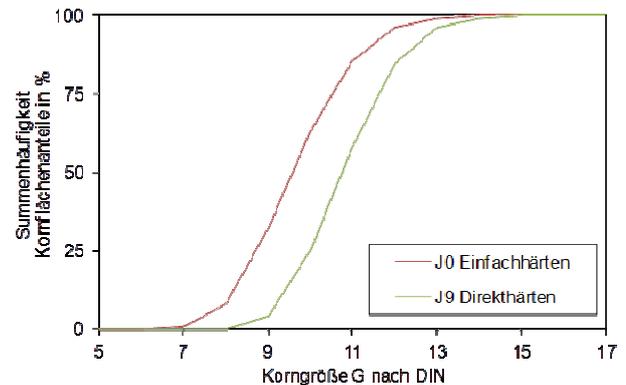


Bild 6: Korngrößenverteilung nach Härten und Anlassen (Referenzwerkstoff 18CrNiMo7-6; Varianten Direkthärten bzw. Einfachhärten nach isothermischer Umwandlung)

Der positive Effekt des Mikrolegierungselementes Niob konnte auch für die Gruppe der Vergütungsstähle aufgezeigt werden. Die mittels Bildanalyse ermittelten Korngrößenverteilungen der beiden betrachteten Varianten des Referenzwerkstoffes C56E2 sind in den beiden folgenden Bildern dokumentiert. Beim Referenzwerkstoff C56E2 DF0 (Bild 7a) verschiebt sich die Lage der Verteilung mit dem Erhöhen der Austenitisiertemperatur in Richtung

größeres Korn. Bei der Nb-legierten Variante (Bild 7b) ist dieser Trend nicht auszumachen. Es ergeben sich für die verschiedenen Austenitisiertemperaturen nahezu identische Verteilungen. Durch das Legieren mit Niob ergibt sich auch in diesem Fall eine Verbesserung der Feinkornbeständigkeit gegenüber dem Referenzwerkstoff.

Zusammenfassung

Das Projekt hatte das Ziel, industriell anwendbare Wärmebehandlungsmethoden für neue Stähle zu entwickeln, um deren Verfestigungspotenziale im industriellen Maßstab nutzen zu können. Die Anpassung der Wärmebehandlungen zielte auf folgende Maßnahmen: Ausnutzen der verformungsinduzierten Martensitbildung durch TRIP-fähige Gefüge und Verfestigungsmechanismen durch Teilchenausscheidungen, Mischkristallbildung und Feinkornzustände. Aus Sicht der Wärmebehandlung erwiesen sich folgende Maßnahmen als erfolgversprechende Optionen:

- Mischkristallverfestigung mittels Silizium aufgrund der Steigerung der Härte und der Anlassstabilität,
- Einstellen TRIP-fähiger Gefüge bei Einsatzstählen über die Wärmebehandlungsvariante Einsatzbainitieren,
- Einstellen TRIP-fähiger Gefüge bei Wälzlagerstählen über die Wärmebehandlungsvarianten Bainitieren und Quenching+Partitioning+Tempering,
- Aufzeigen der positiven Effekte einer Kornfeinung durch Mikrolegierungselemente.

Aus den Untersuchungsergebnissen dieses Projektes konnten somit angepasste und optimierte Wärmebehandlungsvarianten für neu entwickelte Stähle erarbeitet werden, die das Potenzial einer industriellen Anwendung aufweisen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16687N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

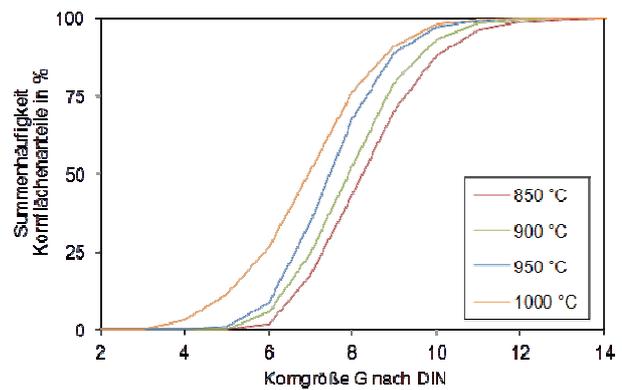
Es wurde vom Fachausschuss 4 (Einsatzhärten) und Fachausschuss 21 (Gefüge und mechanische Eigenschaften) der AWT betreut.

Der vollständige Schlussbericht kann über die Stiftung Institut für Werkstofftechnik bezogen werden.

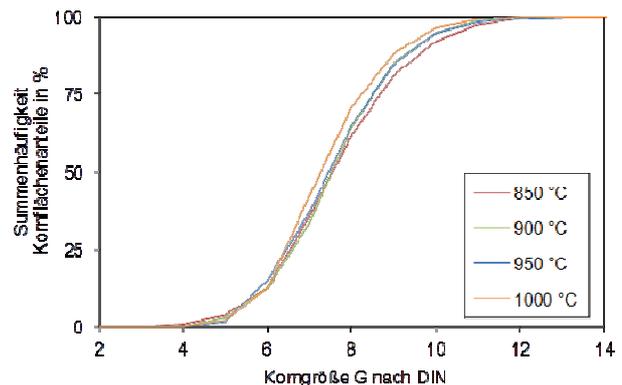
Kontakt:

Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Badgasteiner Straße 3
D-28359 Bremen
www.iwt-bremen.de

Dr.-Ing. Holger Surm
Tel.: 0421 218-51342
Email: surm@iwt-bremen.de



a) C56E2 DF0 (Referenz Industrie)



b) C56E2 DF3 (+0,004 Masse-% Nb)

Bild 7: Korngrößenverteilung nach dem Vergüten in Abhängigkeit von der Austenitisiertemperatur (a) C56E2 DF0 (Referenz Industrie), b) C56E2 DF3 (+0,004 % Nb); Zeit-Temperatur-Folge: Salzbad $T_{Aust.}$ 35 min / Wasser 10 min / 230 °C 1 h)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages