



Arbeitsblatt

Entwicklung einer zerstörungsfreien Umwandlungssensortechnik zur Charakterisierung gradiert eingestellter Gefüge und Randzoneneigenschaften während der Werkstoffumwandlung im Abkühlpfad

AiF-Nr.: 19595 N

Obmann: Marco Laufer

Laufzeit:

01.07.2017-30.06.2020

Erstelldatum:

21.10.2020

Forschungsstellen:

FS1: Leibniz Universität Hannover,
Institut für Werkstoffkunde (IW)

FS2: Leibniz-Institut für Werkstofforientierte
Technologien IWT

Projektleiter:

David Zaremba (FS1)

Heinrich Klümper-Westkamp (FS2)

Sachbearbeiter:

Lara Fricke, René Gansel (FS1)

Marian Skalecki, Carina Zimmermann (FS2)

Forschungsvereinigungen:

FSV und AWT

Projektbegleitender Fachausschuss: FA 20

Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung einer Umwandlungs-Sensortechnik zur zerstörungsfreien Charakterisierung gradiert eingestellter Gefüge und Randzoneneigenschaften während der Werkstoffumwandlung im Abkühlpfad. Um diese Zielsetzung zu erreichen war die Weiterentwicklung und Erprobung eines auf der Analyse harmonischer Anteile von Wirbelstromsignalen basierenden Mehrparameter-Prüfsystems vorgesehen, das eine differenzierte in situ Erfassung der Werkstoffumwandlung sowie der Gefügeausbildung in der Bauteilrand- und Kernzone ermöglicht. Sowohl beim Schmieden als auch beim Einsatzhärten und Bainitisieren werden die Gefügeausbildungen und damit die wesentlichen Bauteileigenschaften erst während der Wärmebehandlung in der Abkühlstrecke entwickelt. Die Prüftechnik sollte deshalb in den jeweiligen Abkühlprozess integriert werden, um

bei einem bekannten Umwandlungsverhalten der Bauteile in der Abkühlstrecke eine frühzeitige Erkennung ungeeigneter Abkühlverläufe zu ermöglichen. Weiterführend sollte mit einer Realisierung einer Online-Qualitätssicherung die Möglichkeit geschaffen werden, zu derzeit notwendigen, zerstörenden qualitätssichernden Maßnahmen bei der Herstellung von dickwandigen Schmiedebauteilen und Hochleistungsbauteilen mit gradierten Werkstoffeigenschaften eine wirtschaftliche Alternative zu bieten. In diesem Zusammenhang wurden folgende wesentliche Teilziele bearbeitet:

- Auslegung und Fertigung temperaturbeständiger Wirbelstromsensoren
- Integration der Wirbelstromsensorik in verschiedene Abkühlprozesse (Warmbad, Ölbad, Wasser-Luft-Sprayfeld)
- Erfassung der Gefügeausbildung in unterschiedlichen Randabständen mithilfe einer quasi-simultanen Multiparameter-Prüfung

- Bewertung des Aufkohlungsprozesses während der Bauteilabschreckung
- Zerstörungsfreie Differenzierung der signifikanten Aufkohlungsparameter Kohlenstoffpegel (CP) und Einsatzhärtetiefe (CHD)
- Eine demonstratorhafte Realisierung einer Online-Qualitätssicherung beim industriellen Schmiedeprozess und beim industriellen Einsatzhärten

Basierend auf dem Stand der Technik und den eigenen Vorarbeiten wurde bei der Planung des Vorhabens die Arbeitshypothese formuliert, dass es mithilfe der Analyse höherharmonischer Signalanteile möglich ist, die Gefügeausbildungen während der Bauteilabkühlung zu erfassen. Bei der Wirbelstromprüfung wird zunächst durch eine mit einem sinusförmigen Wechselstrom beaufschlagte Erregerspule ein magnetisches Wechselfeld generiert, das in dem zu prüfenden, ferromagnetischen Bauteil zu einer kontinuierlichen Ummagnetisierung entlang der magnetischen Hystereseurve führt. Gleichzeitig werden Wirbelströme induziert, die ihrerseits ein Sekundärmagnetfeld ausbilden, das dem primären Erregerfeld entgegengesetzt ist. Das so entstehende, resultierende Magnetfeld induziert in die Messspule eine entsprechend der magnetischen Hysterese nichtlinear verzerrte, oberwellenbehaftete Wechselspannung, wie in Abbildung 1 visualisiert.

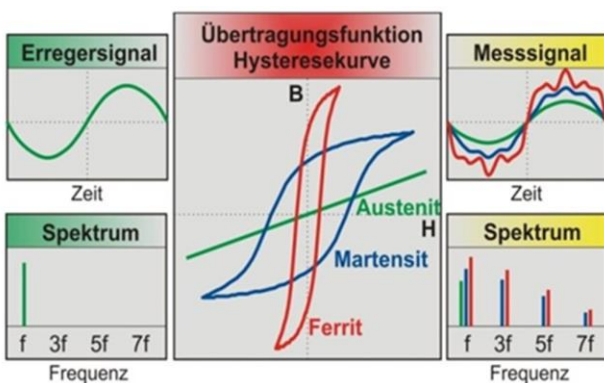


Abbildung 1: Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen [1].

Die Auswahl der Prüffrequenz besitzt einen erheblichen Einfluss auf die prüftechnische Differenzierung der Werkstoffumwandlungen in unterschiedlichen Tiefenlagen sowie deren Gewichtung in der Signalanalyse. Grundsätzlich sinkt mit steigender Frequenz die Wirbel-

strom Eindringtiefe, wodurch gleichzeitig eine Fokussierung auf den randnahen Bereich des Prüfkörpers erfolgt.

In Abhängigkeit der ablaufenden Gefügeausbildung bilden sich charakteristische Signalverläufe aus, wodurch eine Qualitätssicherung des jeweiligen Abkühlprozesses möglich wird.

Die Erprobung und Kalibrierung des Prüfsystems sowie die spätere Variation der Aufkohlungsparameter erfolgte in den Anlagen des IWT. Anschließend wurden die zerstörungsfrei aufgenommenen Prüfergebnisse mit der zerstörend ermittelten Gefügeausbildung und den mechanischen Kennwerten einsatzgehärteter und einsatzbainitisierter Bauteile korreliert.

Der für die Erreichung des Forschungsziels notwendige Lösungsweg sowie das Zusammenwirken der jeweiligen Arbeitspakete bzw. Forschungseinrichtungen ist in Abbildung 2 dargestellt.

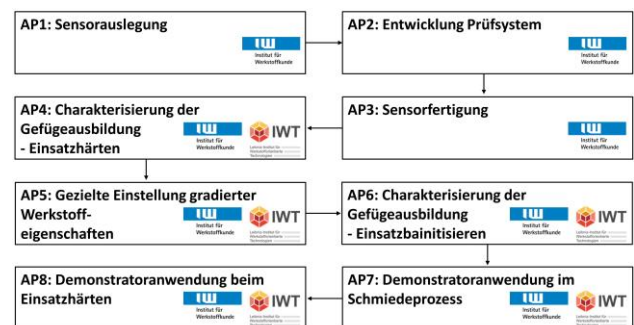


Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete

Die Online-Erfassung der Werkstoffumwandlung in den Abkühl- und Haltephasen direkt aus der Schmiedewärme bzw. dem Austenitgebiet stellen besondere Herausforderungen an die Entwicklung und anwendungsbezogene Auslegung der Wirbelstromsensoren. Die möglichen Sensor-Konzepte wurden basierend auf der Bauteilgeometrie sowie der prozesstechnischen Randbedingungen gewählt. Hier erforderte der Einsatz im Salzbad z.B. hermetisch geschlossene, hochtemperatur- und korrosionsbeständige Sensoren. Um die physikalischen Zusammenhänge mit den vielfältigen und herausfordernden Anforderungen, die an das Spulensystem gestellt werden, mit der technischen Machbarkeit des Sensors zu vereinen, wurden umfangreiche FEM-Simulationen durchgeführt. Es wurden sowohl der Werkstoff-Umwandlungsgrad in unterschiedlichen Tiefenlagen, die Prüffrequenz als auch die

magnetische Feldstärke variiert. Darüber hinaus wurden verschiedene Parameter für die Auslegung der Spulensysteme untersucht, um mithilfe der gewonnenen Daten Sensoren zu entwickeln, die individuell für die jeweilige Prüfaufgabe ausgelegt sind.

Hierauf aufbauend wurde die Prüftechnik weiterentwickelt, um eine quasi-simultane Multiparameter-Prüfung mit bis zu vier Prüffrequenzen zu gewährleisten. Es wurden Schnittstellen entwickelt, um prozessintegriert mittels Thermoelementen die Proben temperatur im Rand- und Kernbereich zu dokumentieren und diese mit den Wirbelstromsignalen zu verknüpfen.

Basierend auf den Simulationsergebnissen sowie auf ergänzenden analytischen MATLAB-Berechnungen wurde ein Spulensystem aufgebaut. Zusätzlich erfolgte eine Studie bezüglich des Temperatureinflusses auf das Gehäuse und die Kupferdrahtisolierung der Spulen, um zu gewährleisten, dass die gleiche Sensorik aus Gründen der Vergleichbarkeit in allen Abkühlmedien (Warmbad, Ölbad, Wasser-Luft-Sprayfeld) eingesetzt werden konnte.

Zur Erfassung und Charakterisierung der Gefügeausbildung beim Einsatzhärten wurde die Sensorik, wie in Abbildung 3 dargestellt, in das Ölbad integriert.

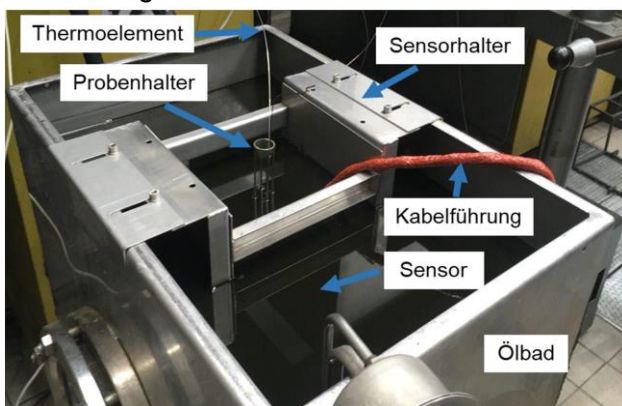


Abbildung 3: Versuchsaufbau innerhalb des Ölbaues [2].

Innerhalb des Projektes wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Höhe von 80 mm aus den Einsatzstählen C15 und 18CrNiMo7-6 untersucht.

Die Ausprägung der Kohlenstofftiefenprofile bei den Aufkohlungsbehandlungen wurde vorab mittels der Software HT Tools mit FDM-Simulati-

onsmethoden berechnet. Es wurden gezielt gradierte Werkstoffeigenschaften über die Variation des Randkohlenstoffgehaltes und der Einhärtungstiefe eingestellt. Im Anschluss wurde die Gefügeausbildung im Bauteil während der Abkühlung aus dem Austenitgebiet im Ölbad zerstörungsfrei von der Wirbelstromsensorik erfasst. Das Gefüge wurde anschließend mittels metallographischen Schliffrn, röntgenographischen Analysen und Härtetiefenverläufen charakterisiert und durch die erreichten Kohlenstoffverläufe ergänzt. Abschließend erfolgte eine Korrelation zwischen den zerstörend bestimmten Gefügecharakteristika und den zerstörungsfrei ermittelten Signalverläufen.

Darüber hinaus fand eine Variation des Abkühlmediums statt. Es wurden aufgekohlte Proben austenitisiert und in einem Wasser-Luft-Sprayfeld mit integriertem Wirbelstromsensor abgeschreckt. In einer anschließenden Untersuchung erfolgte das Einsatzbainitieren im Warmbad mit zylindrischen 18CrNiMo7-6 Proben. Hierbei wurde die Abkühl- und Haltephase mit dem integrierten Wirbelstromsensor hinsichtlich der Gefügeveränderung überwacht. Neben der Variation der Aufkohlparameter wurden ebenfalls Proben carbonitriert und anschließend verglichen. Zudem erfolgte die Variation der Warmbadtemperatur. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

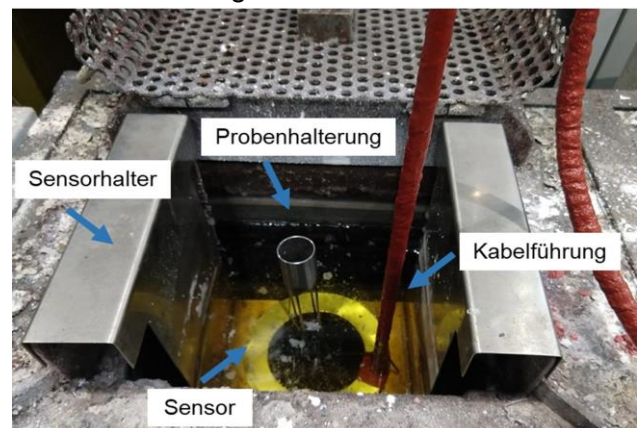


Abbildung 4: Versuchsaufbau im Warmbad.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Labormaßstab zu prüfen, wurden abschließend zwei Demonstratoranwendungen im industriellen Umfeld realisiert. Diese beinhalteten eine Online-Qualitätssicherung bei der Wärmebehandlung nach der Massivumformung sowie beim Einsatzhärten.

Ergebnisse

Die ersten Versuche wurden durchgeführt, um den Unterschied zwischen einer nicht aufgekohlten und einer aufgekohlten 18CrNiMo7-6 Zylinderprobe zu erarbeiten. Ein Ergebnis eines solchen Vergleichs ist in Abbildung 5 dargestellt.

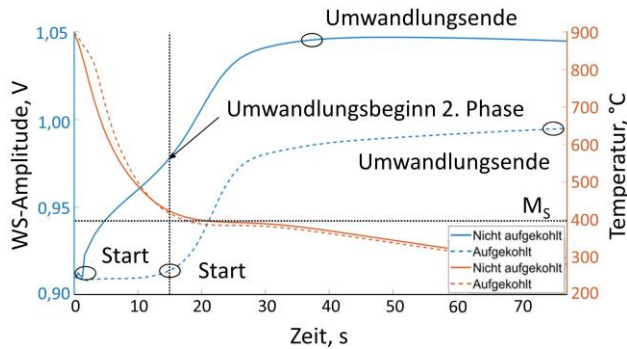


Abbildung 5: Vergleich des Verlaufs der 1. Harmonischen einer nicht aufgekohlten und einer aufgekohlten 18CrNiMo7-6 Probe inklusive Temperaturverläufe [2].

In den nicht aufgekohlten Proben kam es aufgrund von Entkohlungerscheinungen zu einem ferritischen Gefügeanteil im Randbereich. Der ferritische Gefügeanteil konnte mit den Wirbelstromprüfergebnissen klar vom Martensit unterschieden werden. Dieses ist anhand der unterschiedlichen Steigungen innerhalb des Amplitudenverlaufs in Abbildung 5 zu erkennen.

Weiterführende Versuche im Ölbad zeigten, dass eine Differenzierung der Kohlenstoffpegel und der Einhärtetiefe möglich ist. Die eingestellten Kohlenstoffpegel lassen sich anhand unterschiedlicher Umwandlungsstartpunkte des Randbereichs unterscheiden. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt kommt es zu einer weiteren Verringerung der Martensitstarttemperatur. Aus diesem Grund verzögert sich die Umwandlung des Randbereichs mit zunehmendem Kohlenstoffpegel. Eine Differenzierung der verschiedenen Einsatzhärtetiefen kann aufgrund der maximal erreichten Amplituden erfolgen. Dabei gilt, je größer die Einhärtetiefe ist, desto geringer ist die Amplitude. In Abbildung 6 sind die kausalen Zusammenhänge zwischen der Probenrandzone beim Einsatzhärten und den resultierenden Wirbelstromsignalen visualisiert.



Abbildung 6: Zusammenhänge zwischen der Charakteristik der Randzone beim Einsatzhärten und den resultierenden Wirbelstromsignalen.

Die Einflussgrößen aus Abbildung 6 sind eng miteinander verbunden. So erhöht sich beispielsweise bei einer Steigerung des Kohlenstoffgehaltes die Martensithärte, die Randhärte nimmt jedoch insgesamt aufgrund des gesteigerten Anteils an Restaustenit ab. Die Härte hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Wirbelstromsignal. Gleichermäßen verändert sich das Verhältnis zwischen Martensit und Restaustenit, wodurch die Wirbelstromtiefe aufgrund der schlechteren magnetischen und elektrischen Materialeigenschaften ansteigt. Folglich wird im Vergleich von Aufkohlungsparametern zumeist ein unterschiedliches Prüfvolumen erfasst.

Anhand der aufgekohlten C15 Zylinderproben mit einem C-Pegel von 0,9 % kann exemplarisch eine getrennte Gefügeumwandlung im Kern- und im Randbereich aufgezeigt werden, siehe Abbildung 7.

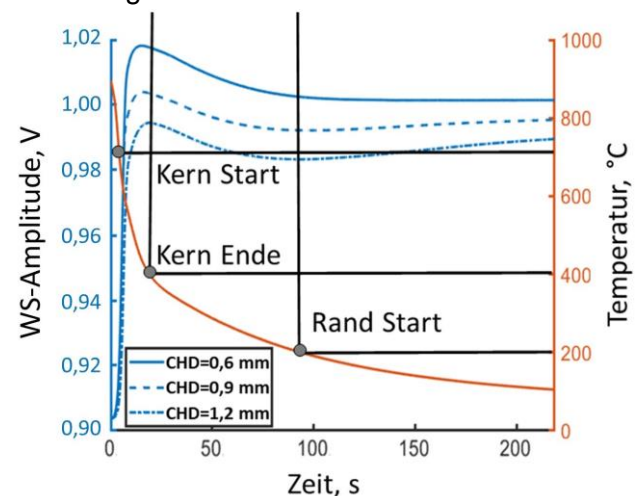


Abbildung 7: Wirbelstromprüfergebnisse beim Abschrecken von C15 Proben nach einer Aufkohlung auf 0,9 % Randkohlenstoffgehalt und einer variierten CHD [2].

Des Weiteren wurde im Rahmen von Wasser-Luft-Sprayfeldabkühlungen am IW die Umwandlungskinetik von einsatzgehärteten Zylinderproben untersucht, um hierbei weitere Abkühlbedingungen zu variieren. Dabei wurden die im IWT aufgekohlten C15 Proben (CP = 0,8 %, CHD = 0,3 mm, 0,5 mm und 0,8 mm) erneut austenitisiert und anschließend im Sprayfeld mit Wasser abgeschreckt und währenddessen prüftechnisch erfasst. Die Signalverläufe der 1. Harmonischen resultierend aus der Sprayfeldabkühlung sind in Abbildung 8 dargestellt.

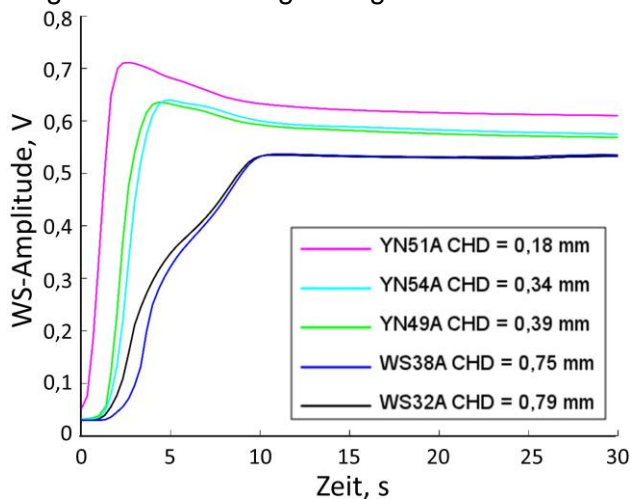


Abbildung 8: Signalverläufe der 1. Harmonischen bei einer Prüffrequenz von 100 Hz während der Sprayfeldabkühlung

Die CHD wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 6507-1 mithilfe von Härteprüfungen verifiziert. Anhand der ZfP-Signalverläufe bei einer Prüffrequenz von 100 Hz ist eine deutliche Unterscheidung der CHD anhand der Verläufe, der maximalen Amplitude und der Endamplitude möglich.

Darüber hinaus wurden exemplarisch 18CrNiMo7-6 Zylinderproben mit einem CP von 0,5 % im Salzbad einsatzbainitisiert. Sobald es zu keinem weiteren Anstieg innerhalb der Messsignalamplitude mehr kommt, ist davon auszugehen, dass die Gefügeumwandlung abgeschlossen ist. Der Grund dafür ist, dass keine weitere Neubildung ferromagnetischer Gefügebestandteile erfolgt und die physikalischen Materialeigenschaften konstant bleiben. Dadurch

konnte festgestellt werden, dass die vollbainitische Umwandlung bei einer Warmbadtemperatur von 275 °C bereits nach 2,5 h statt der berechneten Umwandlungszeit von 6 h und bei einer Warmbadtemperatur von 295 °C nach 1,75 h statt der berechneten 4 h abgeschlossen war. Folglich kann mithilfe der Wirbelstromprüfung eine genauere Bestimmung der benötigten Umwandlungsdauer vorgenommen werden. Chargen- und prozessbedingte Sicherheitsaufschläge, die zur Berechnung der bainitischen Umwandlungszeit bei klassischer Prozessauslegung notwendig sind können daher durch die vorgestellte Technik potentiell bauteilbasiert entfallen, wodurch sich erhebliches Einsparpotential hinsichtlich Prozesszeit und -kosten ergibt.

Die Umsetzung einer zerstörungsfreien Online-Qualitätssicherung innerhalb des Schmiedeprozesses in einer industriellen Schmiedelinie zu Demonstrationszwecken konnte erfolgreich realisiert werden. Es wurde gezeigt, dass eine Differenzierung der während der Abkühlung aus der Umformwärme im Warmbad ausgebildeten Gefüge im Randbereich möglich ist. Das Ziel der Versuche war eine vollbainitische Gefügeausbildung in den dickwandigen Demonstratorbauteilen (Flanschwellen). Die Signalverläufe lassen deutlich erkennen, wenn es aufgrund einer vom Soll abweichenden Gefügeausbildung z.B. zu einer nicht gewollten Martensitbildung in der Randzone kommt [3].

Ebenfalls wurde im Rahmen einer industriellen Demonstratoranwendung eine Online-Qualitätssicherung beim Einsatzhärten erfolgreich durchgeführt. Anhand der Signalverläufe, die während der Bauteilabkühlung (Kegelrad) im Ölbad zerstörungsfrei erfasst wurden, konnten unterschiedliche Einhärtetiefen anhand des Amplitudenmaximums der 1. Harmonischen und auch allgemein am Verlauf der Amplitude differenziert werden. Prozessstörungen, bei denen entweder zu viel oder zu wenig Kohlenstoff ins Bauteil eingebracht wurden, konnten eindeutig von den Standardbauteilen bzw. Standard-CHD unterschieden werden.

Zusammenfassung

Anhand der erzielten Forschungsergebnisse im Labor und in den industriellen Anwendungen

konnte gezeigt werden, dass die Entwicklung einer Umwandlungs-Sensortechnik zur zerstö-

rungsfreien Charakterisierung gradiert eingestellter Gefüge und Randzoneneigenschaften während der Werkstoffumwandlung im Abkühlpfad erfolgreich realisiert wurde. Eine Online-Qualitätssicherung bzw. die Werkstoffumwandlung in unterschiedlichen Randabständen konnte mithilfe der integrierten Wirbelstromsensoren im Ölbad, im Warmbad, unter freier Konvektion sowie im Wasser-Luft-Sprayfeld erfolgen.

Anhand der experimentellen Untersuchungen im Ölbad und im Wasser-Luft-Sprayfeld konnte der Kohlenstoffpegel und die Einhärtetiefe differenziert sowie das Umwandlungsende bestimmt werden. Darüber hinaus ist es möglich, Prozessstörungen mit zu viel oder zu wenig Kohlenstoff im Randbereich eindeutig zerstörungsfrei zu detektieren.

Chargen- und prozessbedingte Sicherheitsaufschläge, welche zur Berechnung der bainitischen Umwandlungszeit bei klassischer Prozessauslegung notwendig sind, können durch die vorgestellte Technik potentiell bauteilbasiert entfallen, wodurch ein erhebliches Einsparpotential hinsichtlich der Prozesszeit und -kosten entsteht.

Somit ergibt sich mithilfe des Wirbelstromprüfsystems die Möglichkeit zur zerstörungsfreien, frühzeitigen Erkennung von Fehlentwicklungen bei einem bekannten Umwandlungsverhalten der Bauteile in der Abkühlstrecke. Gleichbedeutend ist eine Qualitätssicherung der gewünschten Bauteileigenschaften während der Abkühlphase aus dem Austenitgebiet reproduzierbar möglich.

Literatur

- [1] Bruchwald, O.; Frackowiak, W.; Bucquet, T.; Huskic, A.; Reimche, W.; Maier, H. J.: In-situ-Erfassung der Werkstoffumwandlung und Gefügeausbildung von Schmiedebauteilen im Abkühlpfad. HTM J. Heat Treatm. Mat., 2015, 70(3), pp. 150-161.
- [2] Fricke, L. V.; Skalecki, M. G.; Barton, S.; Klümper-Westkamp, H.; Zoch, H.-W.; Zaremba, D. (2019): In-situ Characterization by Eddy Current Testing of Graded Microstructural Evolution in the Core and Peripheral Zone during Material Conversion during Case Hardening, HTM 74, 2019 (6), 345-356.
- [3] Gansel, R.; Fricke, L.; Klümper-Westkamp, H.; Laufer, M.; Zaremba, D.: Prozessbegleitende Erfassung der Gefügeumwandlung im Randbereich bainitischer Schmiedeteile bei der Abkühlung im Warmbad, massivUMFORMUNG, 2020 (2), 58-63

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 19595N wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt

Forschungsstelle 1:

Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde (IW)
Lise-Meitner-Straße 1
30827 Garbsen
Dr.-Ing. David Zaremba, zaremba@iw.uni-hannover.de Tel.: +49511 762 9816

Forschungsstelle 2:

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT
Hauptabteilung Werkstofftechnik
Badgasteiner Str. 3
28359 Bremen
Dr.-Ing. Heinrich Klümper-Westkamp, hkw@iwt-bremen.de, Tel.: +49421 218 51315