

Prozessbegleitende Erfassung der Gefügeumwandlung im Randbereich bainitischer Schmiedeteile bei der Abkühlung im Warmbad



Durch den vermehrten Einsatz von Hochleistungsbauteilen in Leichtbauweise entsteht die Notwendigkeit, Bauteileigenschaften beanspruchungsgerecht einzustellen. Die Einstellung eines Zielgefüges von Schmiedebauteilen, welches die gewünschten charakteristischen mechanischen Werkstoffeigenschaften aufweist, kann durch eine gezielte Abkühlung aus der Umformwärme erfolgen. Die Auslegung eines solchen Abkühlprozesses entsteht konventionell unter Einbeziehung von Simulationsberechnungen und Erfahrungswerten. Die Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren sorgt dabei für hohe Sicherheitszuschläge und erfordert eine nachträgliche, stichprobenartige zerstörende Überprüfung der Fertigungsqualität. Das entwickelte Prüfsystem ermöglicht eine zerstörungsfreie In-situ-Überwachung der Gefügeausbildung und Werkstoffeigenschaften in unterschiedlichen Tiefenlagen während der Abkühlung im Warmbad. Somit kann eine Überwachung der Fertigungsqualität im Prozess erfolgen.

AUTOREN



René Gansel, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover



Lara Fricke, M. Sc.

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover



Dr.-Ing. Heinrich Klümper-Westkamp

leitet im Bereich Wärmebehandlung die Arbeitsgruppen Nitrieren/Nitrocarburieren und Sensorik am Leibniz Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT in Bremen



Dr.-Ing. Marco Laufer

ist Leiter für strategische Projekte und Produktkonformität bei der Hammerwerk Fridingen GmbH



Dr.-Ing. David Zaremba

leitet den Bereich Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover

Bainitische Stähle sind bezüglich der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften zwischen den AFP-Stählen und den höherlegierten kostenintensiveren Vergütungsstählen einzugliedern. Typische Einsatzbereiche sind hochbeanspruchte Bauteile im Fahrwerks- und Motorenbereich. Mithilfe einer gezielten Abkühlung aus der Umformwärme ermöglichen hochfeste duktile bainitische (HDB-)Stähle die Einstellung von Bauteileigenschaften, welche eine ähnliche Festigkeit und zumeist höhere Duktilität und damit auch höhere Dauerfestigkeit und ein vermindertes Risswachstum aufweisen als Vergütungsstähle. Diese Eigenschaften sind unter sicherheitstechnischen Aspekten von hoher Bedeutung. Gleichzeitig ist eine deutliche Verkürzung der Prozesskette und damit eine Zeit-, Energie- und Kosteneinsparung möglich [1].

Die Ausbildung des Zielgefüges ist für das Erreichen der geforderten Bauteileigenschaften notwendig und somit von grundlegender Bedeutung. Das bainitische Gefüge bildet sich bei Temperaturen und Abkühlraten aus, die zwischen denen für die Perlit- und die Martensitbildung liegen, weshalb das bainitische Gefüge auch als Zwischenstufengefüge bezeichnet wird. Aufgrund des Einflusses von Werkstoff- und Prozessparametern auf das Umwandlungsverhalten des Werkstoffs sind enge Prozessfenster und Toleranzbänder zur Einstellung eines feinstrukturierten, bainitischen Gefüges mit vorteilhaften mechanischen Bauteileigenschaften einzuhalten. Insbesondere die in Schmiedebauteilen typischerweise auftretenden und auf den stark unterschiedlichen Abkühlraten im Rand- und Kernbereich beruhenden Gefügegradienten sind unerwünscht und möglichst zu reduzieren. Am Beispiel eines Schmiedebauteils mit bainitischem Zielgefüge ist hier unter anderem die Martensitbildung

in der Randzone bei zu schneller Abkühlung zu nennen. Die Vorhersage über die Entwicklung der Mikrostruktur mittels ZTU-Diagrammen oder Simulationsberechnungen ist oft ungenau, aufgrund einer unterschiedlichen Austenitisierungstemperatur und -dauer oder einer veränderten chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs zum Beispiel durch Chargenschwankungen. Daher werden Sicherheitsmargen in der Prozessgestaltung in Kombination mit einer zusätzlichen Qualitätsprüfung notwendig. Die Qualitätssicherung erfolgt derzeit stichprobenartig durch zerstörende Prüfungen am fertigen Bauteil, sodass Schwankungen in der Fertigungsqualität oder fehlerhafte Gefügeausbildungen erst spät erkannt werden und zu hohen Ausschussraten oder aufwendigen Nacharbeiten, hohen Kosten und Zeitverzögerungen im Betriebsablauf führen. Eine 100-Prozent-Kontrolle der Bauteilqualität ist ohne Einsatz einer zerstörungsfreien Prüfmethode nicht möglich.

Mit dem Ziel, die aufwendigen und zerstörenden Prüfungen auf ein Minimum zu reduzieren, wurde ein Wirbelstromprüfsystem entwickelt, welches im Prozess die Gefügemwandlung zerstörungsfrei in unterschiedlichen Tiefenlagen während der Abkühlung im Warmbad erfasst.

WIRBELSTROMTECHNIK

Elektromagnetische Prüfverfahren eignen sich hervorragend, um berührungslos und zerstörungsfrei die Gefügeausbildung zu charakterisieren [2 – 5]. Unter den elektromagnetischen Prüfverfahren ist insbesondere die Analyse von höherharmonischen Signalanteilen bei der Wirbelstromprüfung gut geeignet, um Werkstoffumwandlungen zuverlässig zu erfassen und die entsprechende Gefügeausbildung zu charakterisieren.

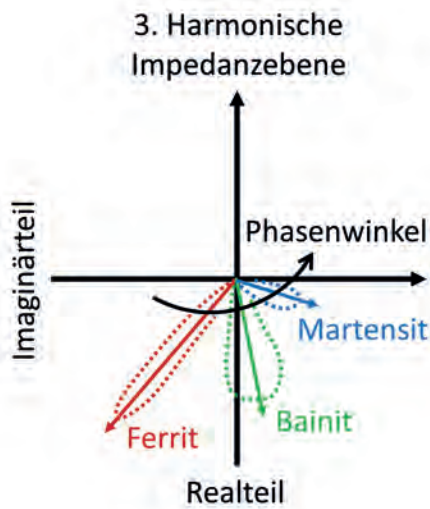


Bild 1: Schematische Darstellung der 3. Harmonischen in der Impedanzebene [4]

Mittels Analyse der harmonischen Signalanteile lassen sich paramagnetische austenitische sowie ferromagnetische Gefügebestandteile, wie beispielsweise Martensit, differenzieren. Bei der Prüfung von ferromagnetischen Materialien ist das Messsignal aufgrund der magnetischen Hysterese durch Oberwellen überlagert. Mit Hilfe der Fourier-Transformation kann das Messsignal in die einzelnen höherharmonischen Signalanteile getrennt werden. Grundsätzlich werden zur Auswertung der Amplituden- und Phasensignale die 1. und 3. Harmonische betrachtet. Zusätzlich wird die Impedanzebene betrachtet.

Die 1. Harmonische (Grundwelle) liefert, wie auch die konventionelle Wirbelstromprüfung, Informationen über die elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften. Anhand der Amplitude der 1. Harmonischen kann zudem das Umwandlungsverhalten, wie beispielsweise der Umwandlungsbeginn sowie das Umwandlungsende, festgestellt werden. Die 3. Harmonische ist hingegen geeignet, um Informationen über ferromagnetische Gefügebestandteile zu ermitteln, da sie in direktem Zusammenhang mit der Form und Ausprägung der magnetischen Hysteresekurve steht. Mit dem Beginn der Gefügeumwandlung zeigt die Amplitude der 3. Harmonischen einen starken Anstieg und kehrt gegen Ende der Umwandlung auf ein niedriges Niveau zurück. Bei einer Überlagerung der Phasenausbildungen von beispielsweise Martensit und Bainit muss zur besseren Interpretation der Signale die Impedanzebene analysiert werden.

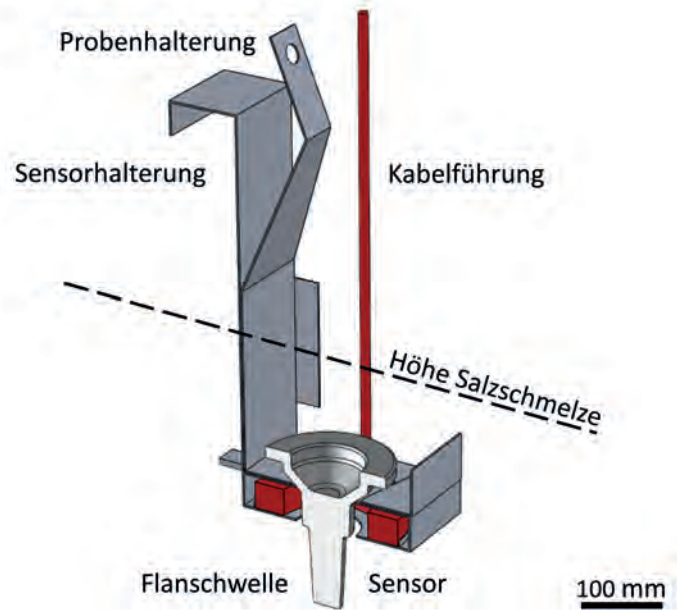


Bild 2: Schematische Versuchsanordnung

Innerhalb der Impedanzebene der 3. Harmonischen bilden sich während der Gefügeumwandlung charakteristische Schleifen aus, wie in Bild 1 schematisch dargestellt.

Mithilfe des Scheitelpunkts der Schleife und des Phasenwinkels des Amplitudenmaximums der 3. Harmonischen kann das ausgebildete Gefüge identifiziert werden. Bei einer Überlagerung der Phasenausbildungen entsteht eine Kombination aus den charakteristischen Schleifen [3 – 5]. Darüber hinaus konnte zwischen der mechanischen Härte und dem Phasenwinkel des Amplitudenmaximums der 3. Harmonischen in der Impedanzebene ein nahezu linearer Zusammenhang nachgewiesen werden [4].

Während der Prüfung können beispielsweise bis zu vier verschiedene Erregerstromfrequenzen quasisimultan zum Einsatz kommen. Durch Frequenzvariation kann die aufgrund des Skin-Effekts begrenzte Eindringtiefe variiert werden. Somit lässt sich das Gefüge in unterschiedlichen Tiefenlagen voneinander unterscheiden.

VORGEHENSWEISE

Am Beispiel des bainitischen Schmiedestahls SOLAM B 1100 wurden exemplarisch Massivumformungen mit anschließender Abkühlung im Warmbad durchgeführt, welches eine Salzschmelze beinhaltet. Zu Beginn der Schmiedeprozesskette wurden die Rohlinge induktiv an Luft auf 1.250 °C

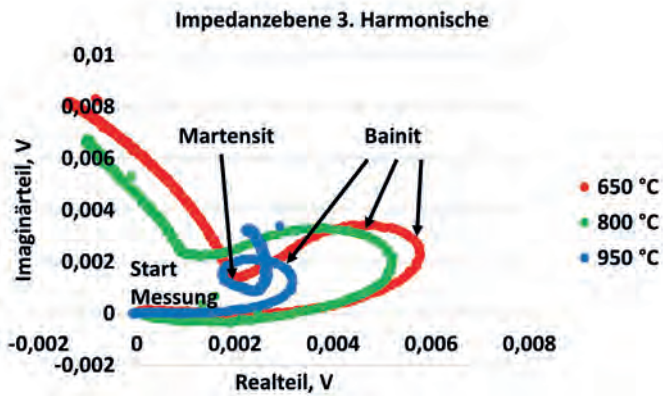


Bild 3: Prüftechnisch erfasste Messwertverläufe in der Impedanzebene während der Abkühlung im Warmbad

erwärmt und innerhalb eines Durchlaufofens austenitisiert. Im Anschluss erfolgte das zweistufige Schmieden des Bauteils in Form einer Flanschswelle. Die Flanschswelle wurde als Bauteil ausgewählt, da sie durch ihre unterschiedlichen Durchmesser entsprechend stark abweichende Abkühlgradienten aufweist.

In Bild 2 ist der Versuchsaufbau im Querschnitt dargestellt. Mithilfe der Proben- und Sensorhalterung konnte der Bereich der Flanschswelle mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Höhe von 40 mm reproduzierbar im Sensor positioniert werden. Die reproduzierbare Positionierung der Bauteile im Sensor ist hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Messwerte als wesentlich anzusehen. Die Abkühlung des Bauteils erfolgte im konstant auf 350 °C temperierten Warmbad. Der Sensor befindet sich im Warmbad und ist dafür konzeptioniert, den hohen Anforderungen der Warmbadumgebung standzuhalten.

Mit dem Ziel, ein vollbainitisches Gefüge mit minimalen Anteilen fremdartiger Phasen zu erzeugen, wurde die Eintauchtemperatur beziehungsweise die Oberflächentemperatur der Flanschswelle variiert. Unter Berücksichtigung des ZTU-Diagramms des SOLAM B1100 wurde bei einer direkten Abkühlung im Warmbad eine Martensitbildung und bei einer Abkühlung unter freier Konvektion eine Bainitbildung mit Anteilen von Martensit erwartet. Die geschmiedete Flanschswelle wurde deswegen bis zu einer definierten Oberflächen-

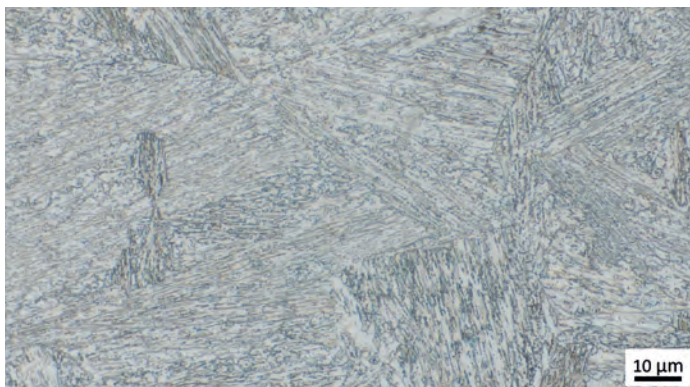


Bild 4: Schliffbild aus dem Randbereich der ab 650 °C im Warmbad abgekühlten Flanschswelle
Bilder: Autoren

temperatur von jeweils 650, 800 und 900 °C unter freier Konvektion an Luft abgekühlt und anschließend im Warmbad positioniert und dort isotherm bei 350 °C bainitisiert. Die Oberflächentemperatur wurde mit einem Infrarot-Thermometer ermittelt. Höhere Eintauchtemperaturen als 950 °C konnten nicht realisiert werden. Die Oberflächentemperatur von 650 °C wurde als untere Bauteiltemperatur identifiziert, damit der SOLAM B1100 gerade noch vollständig umwandelt.

In Bild 3 ist der Signalverlauf der Amplitude der 3. Harmonischen in der Impedanzebene zum jeweiligen Versuch während der Abkühlung im Warmbad aufgetragen. Der Start der Datenkurven beginnt innerhalb der Impedanzebene im Koordinatenursprung. Anschließend bilden sich in Abhängigkeit der Gefügeausbildung während der Abkühlung aus dem Austenitgebiet charakteristische Schleifen aus.

Bei der Abkühlung von 950 °C ist eine unterschiedliche Schleifenausbildung im Vergleich mit den weiteren Abkühltemperaturen zu beobachten. Dabei wird die typische bau-

chige bainitische Phasenausbildung durch eine martensitische Phasenausbildung überlagert. Darüber hinaus ist mit steigender Eintauchtemperatur ein geringfügiges Ansteigen des Phasenwinkels zu erkennen. Mithilfe von metallografischen Untersuchungen wurde der Randbereich des prüftechnisch erfassten Absatzes der Flanschswelle zusätzlich charakterisiert. Die Ergebnisse bestätigen die vermehrte Martensitbildung bei der Abkühlung von 950 °C auf die Warmbadtemperatur von 350 °C. Das mithilfe eines Lichtmikroskops aufgenommene Schliffbild vom Randbereich der Flanschswelle, die ab 650 °C im Warmbad abgekühlt wurde, weist hingegen ein homogenes bainitisches Gefüge auf (Bild 4). Insgesamt sind bei dieser Flanschswelle nur minimale Anteile an martensitischer Phase vorzufinden.

Aufgrund des Skin-Effektes erfolgt eine Limitierung der Wirbelströme auf den oberflächennahen Bereich. Die Flanschswelle besitzt einen Durchmesser von 60 mm, wodurch der Kernbereich mithilfe der Wirbelstromtechnik nicht erfasst wurde. Dennoch besteht die Möglichkeit, über niedrigere Prüffrequenzen und damit höhere Eindringtiefen die Gefügeausbildung im Kernbereich abzuschätzen. Erfahrungsgemäß entstehen bei den bainitischen Stählen während der Abkühlung häufig geringe Anteile von Martensit, die prüftechnisch im Randbereich erfasst werden können.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Eine Umsetzung einer zerstörungsfreien Online-Qualitätssicherung des Schmiedeprozesses in einer industriellen Schmiedelinie zu Demonstrationszwecken konnte erfolgreich realisiert werden. Damit ist eine Differenzierung der während der Abkühlung aus der Umformwärme im Warmbad ausgebildeten Gefüge im Randbereich möglich. Die Messwertverläufe in Bild 3 zeigen eine deutliche Änderung aufgrund der unterschiedlichen Gefügeausbildung auf, wie in diesem Fall die der Martensitbildung. Damit entsteht die Möglichkeit, gewünschte und auch unerwünschte Gefügeausbildungen in unterschied-

lichen Tiefenlagen zerstörungsfrei aufzuzeigen und prozessparallel zu dokumentieren. Innerhalb eines Schmiedeprozesses kann somit eine gleichbleibende Fertigungsqualität ermöglicht werden. Aus diesem Grund ist die In-situ-Wirbel-

stromprüfung ein vielversprechendes Werkzeug zur prozessparallelen Dokumentation des Wärmebehandlungszustands und der Fertigungsqualität. Basierend hierauf ist eine deutliche Reduzierung zerstörender Untersuchungen denkbar.



[1] Herberz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.; Volz, H.-U. (Hg.) (2013): Massivumformung kurz und bündig. Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen

[2] Papaelias, M.P.; Strangwood, M.; Davis, C.L.; Peyton, A.J.: Measurement and modeling of the electromagnetic response to phase transformation in steels. Metallurgical and Materials Transactions, A 35 (2004), S. 965 – 972

[3] Bruchwald, O.; Frackowiak, W.; Bucquet, T.; Huskic, A.; Reimche, W.; Maier, H. J. (2015): In-situ-Erfassung der Werkstoffumwandlung und Gefügeausbildung von Schmiedebauteilen im Abkühlpfad. In: HTM 70 (3), S. 150 – 161

[4] Bruchwald, O.: In-situ-Erfassung der Werkstoffumwandlung und Gefügeausbildung mittels Wirbelstromtechnik. Dissertation, Hannover, 2017

[5] Barton, S.; Bruchwald, O.; Frackowiak, W.; Bongartz, B.; Reimche, W.; Zaremba, D.: Entwicklung einer Bainit-Sensortechnik zur Charakterisierung gradiert Gefügeausbildungen in der Bauteil-Rand- und Kernzone, DGZfP-Jahrestagung 2018 (09)



Das IGF-Vorhaben 19595 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) 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 Schlussberichts kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages