

Kontrolliertes Bainitisieren trumps in puncto Wirtschaftlichkeit auf

Im Gegensatz zum martensitischen Härten punktet das Bainitisieren mit konträr erscheinenden Eigenschaften, wie hoher Härte und Zähigkeit. Mit der Entwicklung eines Sensors, der die isotherme Gefügeumwandlung automatisch erfasst, trumps das Verfahren nun auch in puncto Wirtschaftlichkeit auf.

HEINRICH KLÜMPER-WESTKAMP UND ANDERE

Das Bainitisieren hat als isotherm geführter Härtingsprozess enorm an Bedeutung gewonnen. Grund dafür sind die vorteilhaften Ergebnisse, wie hohe Zähigkeit bei gleichzeitig hoher Härte und geringem Verzug. Solche Ergebnisse werden durch herkömmliches martensitisches Härten bei weitem nicht erreicht. In vielen Anwendungen scheiterte das Bainitisieren jedoch an der Wirtschaftlichkeit aufgrund der langen Behandlungsdauer. Damit ist jetzt Schluss, wie ein Projekt der Stiftung „Institut

für Werkstofftechnik“, Bremen, und des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover zeigt. Um den Härtingsverlauf beim Bainitisieren kontinuierlich erfassen und regulieren zu können, haben die Institute das Online-Messsystem Bainitsensor entwickelt (Bild 1). Dieses System ermöglicht, das Bainitisieren punktgenau zu beenden.

Somit entfallen die bisher üblichen enormen Zeitzuschläge, weil damit werkstoff- und umwandlungsbedingte Schwankungen sofort erkannt und entsprechend korrigiert

werden. Der Einsatz des Sensors erhöht die Wirtschaftlichkeit des Bainitisierens erheblich und reduziert die Qualitätsschwankungen enorm. Zudem ermöglicht er neue prozesssichere Verfahrensvarianten mit definiert eingestellten stabilisierten Restaustenitgehalten. Weitere Anwendungspotenziale liegen in der zwei- und mehrstufigen Bainitumwandlung, um eine hohe Prozesssicherheit bei hoher Energieeffizienz zu gewährleisten. Bei der gezielten Veredlung hochwertiger Bauteile aus Werkstoffen wie Kugelgraphitguss oder Trip-Stählen spielt das Bainitisieren bereits eine zentrale Rolle. In diesem Bereich wird der Sensor zur Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitssteigerung beitragen.

Gleichzeitige Einstellung von hoher Härte und Zähigkeit

Kennzeichnend für ein bainitisches Gefüge ist, dass es sich in weiten Grenzen einstellen lässt. Somit kann es sehr unterschiedliche Eigenschaften abdecken. Man unterscheidet zwischen oberem Bainit und unterem Bainit – je nachdem, bei welcher Temperatur die isotherme Umwandlung erfolgt ist. Ferner ermöglicht das Bainitisieren, sehr gezielt Restaustenit als weichen Gefügebestandteil zu vermeiden und für bestimmte Anwen-

Dr.-Ing. Heinrich Klümper-Westkamp ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) in Bremen. Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch ist geschäftsführender Direktor des IWT. Dr.-Ing. Wilfried Reimche ist Bereichsleiter zerstörungsfreie Prüfverfahren am Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover. Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach leitet dieses Institut. Weitere Informationen: Heinrich Klümper-Westkamp, 28359 Bremen, Tel. (04 21) 2 18-53 15, Fax (04 21) 2 18-53 33, hkw@iwt-bremen.de

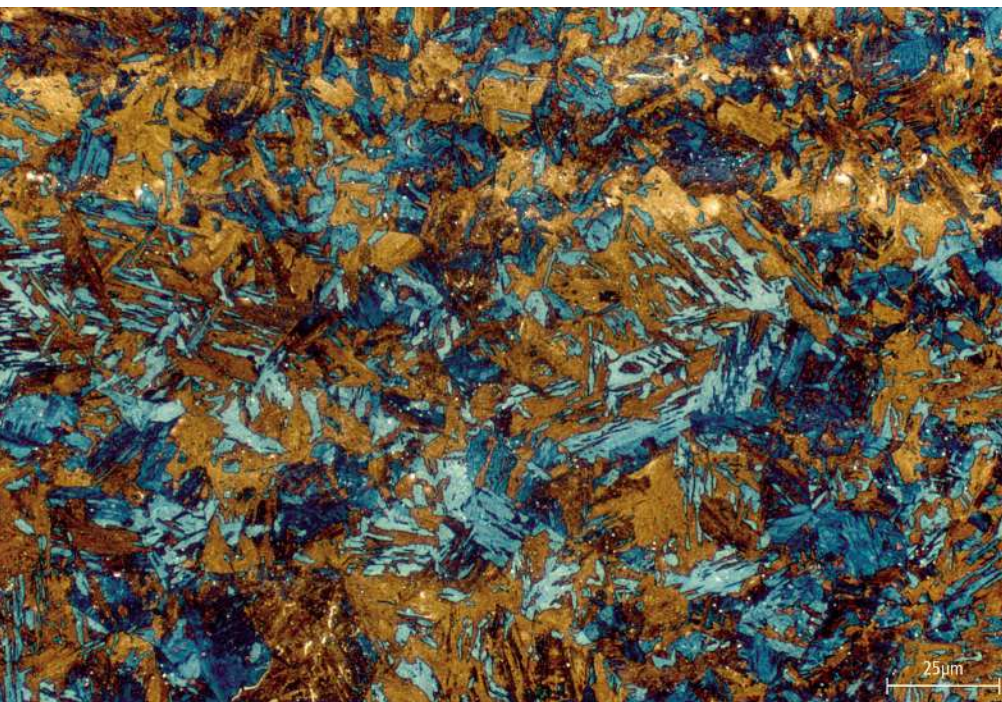


Bild: IWT

Kennzeichnend für ein bainitisches Gefüge ist die Kombination konträr scheinender Werkstoffeigenschaften. Man unterscheidet zwischen oberem und unterem Bainit – je nach Temperatur, bei der die isotherme Gefügeumwandlung erfolgt ist.



Bild 1: Sensor zur Überwachung des Bainitisierens bei zylindrischen Werkstücken. Damit werden die üblichen, enormen Zeitaufschläge zur Sicherstellung der kompletten Gefügeumwandlung überflüssig.

vom Werkstoffgefüge, von der Zusammensetzung der Legierung, von den Temperaturen der Austenitisierung sowie von der Bainitumwandlung ab. Daraus

ergibt sich die Schwierigkeit, den Prozessablauf mit Anfang und Ende der Bainitisierung vorauszusagen. Aus diesem Grund wird vielfach mit hohen Zeitzuschlägen gearbeitet, um sicher eine vollständige Umwandlung zu gewährleisten. Dieser Aspekt verringert die Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und damit die Akzeptanz in der Praxis.

Das Bainitisieren läuft dreistufig ab: Erst erfolgt das Auste-

nitisieren durch Erwärmen auf eine ausreichend hohe Temperatur. Dabei kommt es zu einer möglichst vollständigen Phasenumwandlung von Ferrit (krz-Gitter) in Austenit (kfz-Gitter). Danach wird das Bauteil so schnell auf die Bainitisierungstemperatur gekühlt, dass kein Ferrit oder Perlit entsteht. Schließlich wird die Bainitisierungstemperatur konstant gehalten. Dabei erfolgt nach und nach

dungen definierte stabilisierte Restaustenitgehalte einzustellen [1].

Im Vergleich zum martensitischen Härten hat das Bainitisieren einen herausragenden Vorteil [2]: Es ermöglicht, gleichzeitig sehr hohe Härte und hohe Zähigkeit einzustellen. Dieser Vorteil ist im Bild 2 am Beispiel des 100Cr6 dem martensitischen Härten gegenübergestellt. Bainitisch gehärtet erreicht man dabei zwar geringfügig niedrigere Härtewerte, jedoch wird die Zähigkeit – in Bild 2 im Kerbschlagversuch als Schlagarbeit erfasst – um mehr als 40% gesteigert. Weitere Vorteile des bainitischen Härten sind ein niedriger Verzug, eine hohe Maßstabilität, ein erhöhter Widerstand gegen Risswachstum und die Möglichkeit zur Erzeugung von Druckeigenspannungen in der Randschicht, um die Beanspruchbarkeit der Oberflächen zu erhöhen.

Bei nahezu allen technischen Kenngrößen hat das bainitische Härten Vorteile im Vergleich zum martensitischen Verfahren. Der entscheidende Nachteil des bainitischen Härten ist jedoch die vergleichbar lange Haltezeit im Bainitbad. Die Bainitumwandlung ist ein zeitintensiver Prozess. Die Prozessdauer hängt

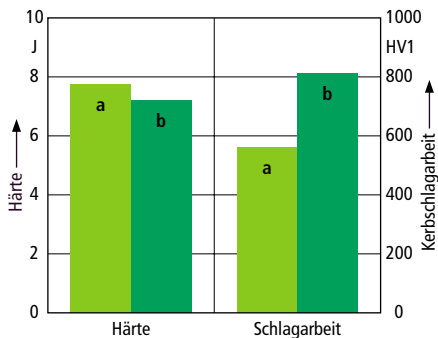


Bild 2: Anders als das martensitische Härten führt das Bainitisieren des Stahls 100Cr6 gleichzeitig zu einer sehr hohen Härte und hohen Zähigkeit (Schlagarbeit) [7].

a martensitisches Härten: 845 °C (20 min), 60 °C (Ölbad), 170 °C (2 h), b bainitisches Härten 845 °C (20 min), 230 °C (Salzbad, 4 h)

die Umwandlung vom Austenit (kfz) zum Bainit (krz). Im Gegensatz zu Perlit, der bei hoher Temperatur entsteht, wird Bainit als ein nichtlamellares, nichtkooperatives eutektoidisches Zweiphasen-Produkt beschrieben [3]. Die Gefügebilder in Bild 3 zeigen, wie feine Nadelstrukturen mit Beginn der Umwandlung ausgeschieden und mit zunehmender Dauer immer mehr werden, bis dieser Prozess vollständig abgeschlossen ist [4].

Magnetisches Werkstoffverhalten ist Basis für das Messprinzip

Um die Bainitumwandlung kontinuierlich zu kontrollieren, wurde ein Messsystem entwickelt, das auf der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen basiert. Damit lassen sich die Veränderungen der magnetischen und elektrischen Werkstoffeigenschaften während des Umwandlungsprozesses automatisch erfassen. Wegen der großen Änderung des magnetischen Werkstoffverhaltens, die aus dem Übergang vom paramagnetischen Austenit zum ferromagnetischen Bainit resultiert, ist das Messsystem zur Er-

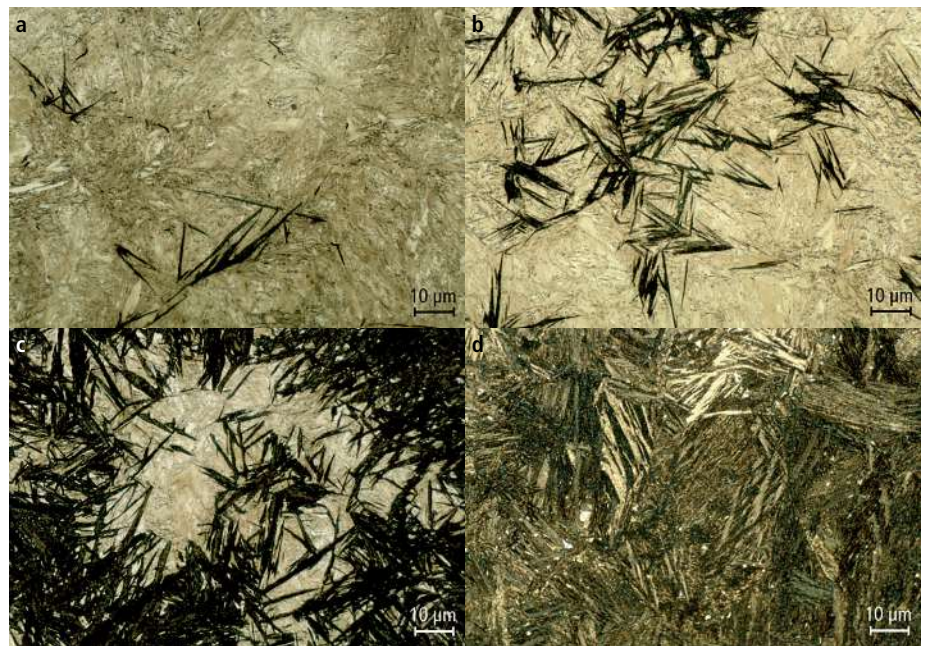


Bild 3: Beim Bainitisieren von 100Cr6 (T_A 950 °C, T_B 230 °C) werden feine Nadelstrukturen ausgeschieden, bis die Gefügeumwandlung abgeschlossen ist. a nach 1 h, b 2 h, c 4 h, d 14 h

fassung der Bainitumwandlung qualifiziert. Bild 4 zeigt am Beispiel zweier Werkstoffe den Umwandlungsverlauf, der vom entwickelten Wirbelstrom-Messsystem erfasst wird. Nach einer Inkubationsphase beginnt die Umwandlung langsam, um dann zu beschleunigen, bis rund 50% des Gefüges umgewandelt sind. Dann verzögert sich die Umwandlung wieder zunehmend, um schließlich langsam auszulaufen.

Der Sensor besteht aus einer Erregerspule, die bei einer definierten Frequenz ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt, mit dem das Werkstück beaufschlagt wird. Durch dieses Feld werden Ummagnetisierungsvorgänge und Wirbelströme im Prüfkörper generiert, die ein gegenläufiges Sekundärfeld erzeugen. Dieses sekundäre Magnetfeld wird von einer Spule im Sensor erfasst (Bild 5). Auf diese Weise werden Informationen über die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Probe gewonnen. Das Messsignal wird mit Hilfe einer schnellen Fourier-

Transformation hinsichtlich der harmonischen Signalanteile analysiert, wobei insbesondere die Höherharmonischen mit der Hysteresekurve im Zusammenhang stehen und Informationen über die ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften liefern. Zur Erfassung des Umwandlungsvorgangs im Bauteil wurden verschiedene Wirbelstromsensoren über ihre Bauform an die Bauteilgeometrie angepasst und im Bainitisierungsbad im Temperaturbereich von 200 bis 400 °C erprobt.

Mit dem Bainitsensor wurden umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um die Bainitumwandlung online an verschiedenen Stählen sowie bei unterschiedlichen Umwandlungs- und Austenitisierungstemperaturen zu überprüfen, zu qualifizieren und zu quantifizieren. Als Stähle wurden Legierungen für Schienen, Nadellager und Zahnräder verwendet [5 und 6].

Der Sensor ermöglicht, den Bainitisierungsvorgang zu überwachen, den jeweils

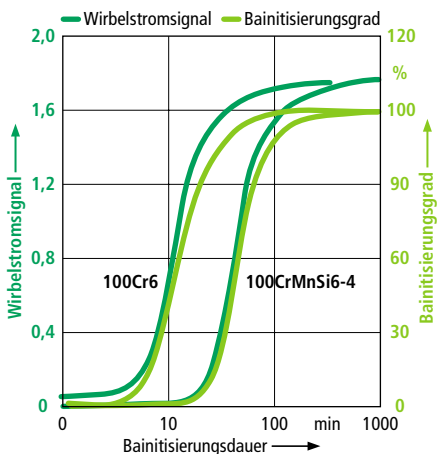


Bild 4: Das Wirbelstromverfahren eignet sich zur Überwachung der Gefügeumwandlung beim Bainitisieren.

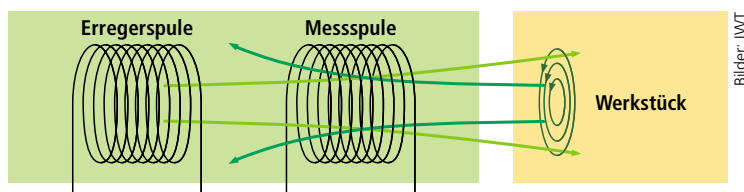


Bild 5: Eine Erregerspule erzeugt über ein magnetisches Wechselfeld Wirbelströme im Werkstück. Diese Wirbelströme verursachen ein sekundäres Magnetfeld in der Messspule. So erfasst der Sensor elektrische und magnetische Signale, die über den Bainitisierungsgrad Aufschluss geben.

aktuellen Umwandlungsgrad zu erfassen und entsprechend wirtschaftlich den Bainitisierungsprozess zu beenden. Zusätzlich bietet der Bainitsensor die Möglichkeit, festzustellen ob die vorausgehende Austenitisierung ausreichend war. So wurde in Versuchen gezeigt, wie der Sensor eine unvollständige Austenitisierung erfasst. Nach 3 und 5 min Austenitisierungsdauer war die Umwandlung noch nicht vollständig abgeschlossen. Der verbliebene Ferritanteil wurde zu Beginn der Bainitumwandlung durch einen Messwert der ersten Harmonischen größer null angezeigt. Ähnliche Messsignale erhielt man, wenn die Abkühlung von der Austenitisierungstemperatur nicht schnell genug erfolgte und vor der Bainitumwandlung bereits Ferrit oder Perlit entstand.

Der Sensor basiert auf dem Wirbelstromverfahren unter Anwendung der Harmonischen-Analyse. Die Amplitude der 1. Harmonischen ist vergleichbar mit Dilatometermessungen und liefert über eine Kalibrierung quantitative Aussagen über den aktuellen Bainitisierungsgrad. Änderungen der Stahlqualität und der Wärmebehandlungsabläufe beeinflussen die Umwandlungsdauer. Der

Bainitsensor ermöglicht, den Bainitisierungsgrad online im Prozessablauf zu verfolgen. Das ist vor allem hinsichtlich Zeiteinsparung, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz vorteilhaft. So ermöglicht der Sensor, die Gefügeumwandlung auch beim mehrstufigen Bainitisieren direkt zu verfolgen und über definierte Umwandlungsstufen im Prozessablauf zu steuern.

Sensor ermöglicht gezielte Einstellung von Mehrphasengefügen

Potenzielle Anwendungen, bei denen eine bestimmte Phase wie der Restaustenitgehalt reproduzierbar eingestellt werden muss, sind mit dem Sensor prozesssicher umsetzbar. Der Bainitsensor ermöglicht einen direkten Einblick in den Umwandlungsprozess am aktuellen Bauteil und schafft damit Möglichkeiten zur Einbeziehung weiterer Werkstoffe und zur gezielten Einstellung von Mehrphasengefügen [7]. Das Forschungsvorhaben (AIF 14241N) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert, wofür sehr gedankt

wird. Der AWT-Fachausschuss 20 „Sensorik in der Wärmebehandlung“ hat die Projektdurchführung fachlich begleitet. **MM**

Literatur

- [1] Bhadeshia, H. K.: Bainite in steels: transformations, microstructure and properties. 2nd Edition, London: IOM Commercial 2001.
- [2] Veters, H.: Wälzelemente aus 100Cr6 bainitisch umwandeln oder martensitisch härten. HTM-Zeitung Werkstatt, Wärmebehandlung, Fertigung 6/2002, S. 403.
- [3] Aaronson, H.-I., und andere: A progress report on the definitions of bainite. Scripta Materialia 3/2002, S. 139.
- [4] Klümper-Westkamp, H.: , und andere: Bainite sensor – a new tool for process and quality control of the bainite transformation. HTM-Zeitung Werkstatt, Wärmebehandlung, Fertigung 3/2008, S. 174–180.
- [5] Sawley, K., und J. Kristan: Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue. FFEMS 10/2003, S. 1019.
- [6] Kaiser, P.: Bainitisch vergütetes Kaltband für Stanz-, Biege- und Formteile. EFB-Colloquium, „Prozessoptimierung in der Blechverarbeitung“, 13. bis 14. März 2001, Fellbach b. Stuttgart.
- [7] Dong, J., und andere: Gefüge und mechanische Eigenschaften von Wälzlagerstählen nach verkürzten Wärmebehandlungen in der unteren Bainitstufe. HTM-Zeitung Werkstatt, Wärmebehandlung, Fertigung 3/2006, S. 128–135.