

T. Oevermann, S. Saalfeld, T. Niendorf, B. Scholtes

Prozessintegration von induktiver Wärmebehandlung und Festwalzen – sichere und zuverlässige Komponenten mit hoher Schwingfestigkeit

Process Integration of Inductive Heat Treatment and Deep Rolling – Safe and Reliable Components with High Fatigue Strength

Kurzfassung/Abstract

Mechanische Oberflächenbehandlungen, beispielsweise das Festwalzen, spielen in der technischen Praxis eine bedeutende Rolle und tragen wesentlich zur Steigerung der Zuverlässigkeit hochbeanspruchter Komponenten bei. In einer Reihe von Fällen wurde gezeigt, dass eine Erhöhung der Prozess-temperatur die Wirksamkeit der Verfahren noch steigert, weil dies zu einer besseren Stabilisierung der eingebrachten Druckeigenspannungen führt. Eine wesentliche Voraussetzung zur Einführung dieser Verfahren in die Praxis ist allerdings, dass insgesamt effiziente und möglichst kurze Prozesse resultieren, bei denen die erzielbaren Eigenschaftsverbesserungen in einer ausgewogenen Relation zum Mehraufwand im Vergleich mit konventionellen Prozessen stehen. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die Prozessintegration von induktiver Wärmebehandlung und Festwalzen in diesem Zusammenhang vielversprechend ist und es werden erste Versuchsergebnisse vorgestellt. ■

Schlüsselwörter: Prozessintegration, induktive Wärmebehandlung, Festwalzen, Eigenspannungen, Ermüdung

Autoren/Authors: *Torben Oevermann, M. Sc.*, Institut für Werkstofftechnik – Metallische Werkstoffe, Universität Kassel, Mönchebergstraße 3, 34125 Kassel, oevermann@uni-kassel.de (Kontakt/Corresponding author)

Stephanie Saalfeld, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf, Prof. Dr.-Ing. habil. Berthold Scholtes, Institut für Werkstofftechnik – Metallische Werkstoffe, Universität Kassel

Mechanical surface treatments such as deep rolling are important processes in industrial application and contribute considerably to processing of safe and reliable high-strength components. It has been shown that increased process temperatures enhance the efficiency of deep rolling, as compressive residual stress states are stabilized pronouncedly. Prerequisites for industrial application of these methods are, however, efficient and short processes characterized by a balanced property optimization – cost relation in comparison to established techniques. It is shown that the integration of inductive heat treatment and deep rolling is a promising approach in this context and first experimental results are presented. ■

Keywords: Process integration, inductive heat treatment, deep rolling, residual stresses, fatigue

1 Grundlagen

Die gezielte Einstellung von Material- und Bauteileigenschaften sowie von Eigenspannungen entlang der Fertigungsprozesskette, beginnend mit der Bildung des Festkörpers bis hin zum letzten Bearbeitungsschritt, ist heute Stand der Technik. Dadurch können Festigkeit und Lebensdauer unter gegebenen Beanspruchungsbedingungen entscheidend beeinflusst werden, sodass die Wahl der Fertigungsverfahren und Prozessparameter ein erhebliches Optimierungspotenzial bietet. In diesem Zusammenhang kommt oberflächennahen Bauteilbereichen eine besondere Bedeutung zu, weil sie in der Regel der Ort des Schadensausgangs sind und gleichzeitig am höchsten beansprucht werden. Wichtige Beispiele

in diesem Zusammenhang sind ermüdungsbeanspruchte Komponenten mit oder ohne Korrosionseinwirkung. Fertigungsprozesse bei hoch und komplex beanspruchten Komponenten sollten daher so geführt werden, dass besonders schadenstolerante Randzonen entstehen. Zu diesem Zweck wurden spezifische Verfahren entwickelt, um günstige randnahe Gefügestände und Eigenspannungen zu erzeugen und dadurch den Werkstoffwiderstand gegen Versagen des ganzen Bauteils gezielt zu erhöhen.

Mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren, wie beispielsweise das Kugelstrahlen, Laserschockverfestigen oder Festwalzen, spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie sind in der industriellen Praxis weit verbreitet und beruhen auf definierten, randnahen plastischen Deformationen, welche eine Werkstoffverfestigung,

Druckeigenspannungsfelder, gegebenenfalls Phasenumwandlungen sowie eine Änderung der Oberflächentopographie hervorrufen. Die Verfahren wurden in der Vergangenheit auf der Basis grundlegender werkstofftechnischer Untersuchungen kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. Sie liefern heute einen wesentlichen Beitrag zur Herstellung sicherer und zuverlässiger Komponenten in vielen Bereichen der Praxis, beispielsweise in der Fahrzeug- oder Antriebstechnik [1-3]. Weiterhin gibt es Hinweise darauf, dass durch starke randnahe Plastizierungen daran anschließende Diffusionsprozesse beschleunigt werden können [4]. Dies eröffnet neue Perspektiven für chemo-thermische Behandlungsverfahren.

In der Regel werden die genannten Verfahren einzeln angewandt und stellen einen zusätzlichen Schritt und Aufwand in der Fertigungsprozesskette dar. In einigen Fällen werden sie auch in andere Teilprozesse integriert, um den Fertigungsaufwand zu begrenzen [5]. Kombinationen verschiedener Verfahren erwiesen sich in der Vergangenheit als besonders effizient, insbesondere wenn dadurch günstige Druckeigenspannungszustände stabilisiert werden konnten. Man unterscheidet hierbei zwischen konsekutiven und simultanen Verfahren, je nachdem ob sie nacheinander oder gleichzeitig zum Einsatz kommen. Etabliert sind, beispielsweise bei Komponenten der Antriebstechnik, Kombinationen aus chemo-thermischen Verfahren und daran anschließende Kugelstrahlbehandlungen, wodurch höchste Schwingfestigkeiten erreichbar werden. Es konnte des Weiteren gezeigt werden, dass eine an eine mechanische Oberflächenbehandlung angeschlossene Auslagerungsbehandlung zu einem besonders feinkörnigen Gefüge bzw. zu lokal erhöhten Festigkeiten führt [6, 7]. In einigen Fällen wurden thermische und mechanische Verfahren schon kombiniert und simultan angewandt. Beispiele hierfür sind das Festwalzen oder das Kugelstrahlen bei erhöhter Temperatur [1, 8-10]. In [11] wurde gezeigt, dass auch eine direkte Integration in den Wärmebehandlungsprozess möglich ist. Dadurch konnte eine Verbesserung der Eigenspannungsstabilität im Vergleich mit konventionellen Behandlungen bei Raumtemperatur erreicht werden, sodass merklich höhere Schwingfestigkeiten resultierten. Die Bilder 1 und 2 geben hierfür Beispiele. Bei Raumtemperatur

festgewalzte Proben aus vergütetem C45E (Bild 1, links) zeigen nahe der Oberfläche nach schwingender Beanspruchung einen deutlich stärkeren Abbau der randnahen Druckeigenspannungen als solche, deren Festwalzbehandlung bei 530 °C erfolgte. Die in Bild 2 gezeigten (statistisch nicht abgesicherten) Wöhlerkurven belegen, dass durch die verbesserte Eigenspannungsstabilität im Vergleich mit konventionell bei Raumtemperatur festgewalzten Proben noch ein merklicher Festigkeits- bzw. Lebensdauergewinn erzielt werden kann.

Bei der Kombination thermischer und mechanischer Randschichtverfestigungsprozesse liegt es nahe, Verfahren mit induktiver Probenerwärmung in die Betrachtungen einzubeziehen. Diese haben in der Fertigungstechnik aufgrund ihrer Flexibilität und Energieeffizienz eine große Bedeutung. Die resultierenden Energiekosten bei der induktiven Wärmebehandlung sind allgemein bekannt. Die Wärme wird durch Wirbelströme direkt im Bauteil erzeugt und muss nicht durch Konvektion auf das Bauteil übertragen werden. Durch einen optimal auf die Probengeometrie angepassten Induktor ist die Erwärmung im Bauteil sehr gleichmäßig.

Besonders vorteilhaft wirken sich hierbei die stark verkürzten Austenitisierungs- oder Erwärmdauern aus. Dadurch sind beispielsweise geringe Einhärtungstiefen und ein konturentreues Härten komplizierter Bauteilgeometrien in kurzen Prozesszeiten möglich [12]. Ein schädigungs- bzw. oxidationsarmes Randschichthärtens und ein geringer Reinigungsaufwand durch die Nutzung optimal abgestimmter, wassermischbarer Abschreckmittel auf Polymerbasis sind weitere Gründe, warum die induktive Wärmebehandlung in der Praxis an Bedeutung gewonnen hat. Treten in Abhängigkeit der Fertigungsparameter, beispielsweise Induktionsfrequenz und Temperatur-Zeit-Verlauf der Erwärmung, prozessbedingt ausgeprägte Temperaturgradienten auf, die zu Verzug und/oder hohen Eigenspannungen führen, kann hier durch eine geeignete Abstimmung der Parameter oder durch Verfahren wie bspw. das Kalibrier- oder Fixturhärten Abhilfe geschaffen werden [13]. Trotz stark verkürzter Prozesszeiträume können durch induktives Härten und Kurzzeitaustenitisieren gleichwertige Werkstoffeigenschaften erreicht werden, wie es bei der konventionellen Wärmebehandlung der Fall

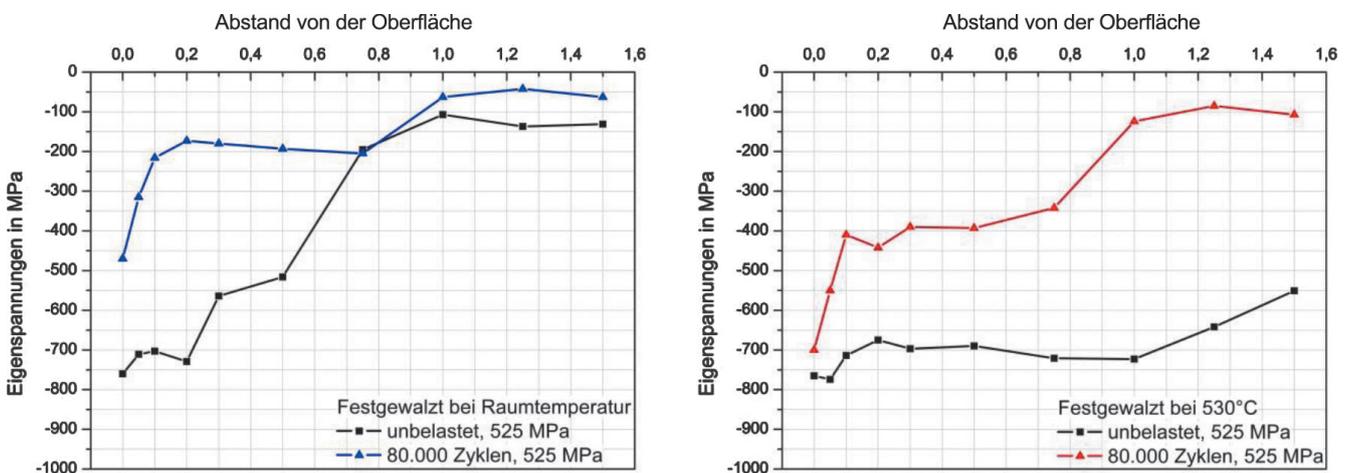


Bild 1. Eigenspannungstiefenverläufe für bei Raumtemperatur und bei erhöhter Temperatur (530 °C) festgewalzte Proben des Stahls C45E im unbelasteten Zustand und nach 80000 Zyklen unter Zug-Druckbeanspruchung bei $R = -1$ und einer Beanspruchungsamplitude von jeweils 525 MPa [11]

Fig. 1. Residual stress-depth distributions of steel SAE1045 deep rolled at room temperature or at 530 °C after processing and after additional 80000 fatigue loading cycles under tension-compression loading with $R = -1$ and a stress amplitude of 525 MPa [11]

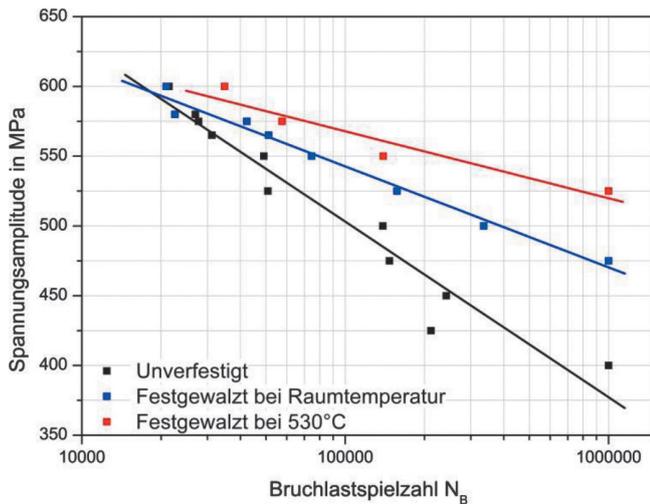


Bild 2. Wöhlerkurven des Stahls C45E in den angegebenen Zuständen [11]

Fig. 2. S-N-curves of steel SAE1045 in different conditions [11]

ist. Ein Überhitzen muss allerdings insbesondere beim Härten von Stählen ab Kohlenstoffgehalten von ca. 1 % vermieden werden, da diese sonst zu einer grobkörnigen Mikrostruktur und einem stark erhöhten Restaustenitgehalt neigen, was u. a. zu einer Verringerung der Kerbschlagzähigkeit führt [14]. Zur Verbesserung der Bauteilzähigkeit und Bearbeitbarkeit und um Verzug unter Betriebsbedingungen zu vermeiden, werden auch induktiv (randschicht) gehärtete Bauteile angelassen. Dies wird noch häufig konventionell im Ofen durchgeführt und benötigt je nach den gewünschten Materialeigenschaften entsprechend lange Zeiträume. Alternativ bietet das induktive Kurzzeitanlassen, ebenfalls schon lange Gegenstand der Forschung [15, 16], weiteres Potenzial in der Optimierung der Kombinationsprozesse. Neben einer Verkürzung der Prozessdauern bietet es zusätzliche Möglichkeiten der Funktionsintegration, wie bspw. das in [17] vorgestellte Anlassen mit Restwärme.

Die angestrebte Prozessintegration von induktiver Wärmebehandlung und (Hochtemperatur-) Festwalzen führt durch zunehmende Automatisierung der kurzen Einzelprozesse zu einer Verkürzung der Gesamtprozessdauer und zu einer hohen Anlagenausnutzung. Ein Transport größerer Bauteilchargen zwischen Wärmebehandlung und (End-)Bearbeitung entfällt, Wartezeiten werden vermindert. Dadurch können Kosten gesenkt werden. Eine zusätzliche Option stellt die Erweiterung des Kombinationsprozesses durch ein simultan ausgeführtes Richtwalzen dar, falls sich Verzug durch andere (vorherige) Prozessschritte nicht vermeiden lässt. Beispielsweise kann hier das Potenzial eines Festwalzprozesses zur Kompensation von Verzug an Wälzlageringgen genannt werden [18].

2 Konzept

Im Rahmen des LOEWE-Schwerpunktes „Safer Materials“ an der Universität Kassel¹ wird eine Anlage aufgebaut, in der die Prozessschritte induktives Härten, Anlassen und Festwalzen bei definierter Temperatur integriert und miteinander verkettet durchführbar sind. Damit sollen die wissenschaftlichen Grundlagen kombi-

nierter Wärmebehandlungs- und Festwalzprozesse erforscht werden. Eine wesentliche Herausforderung bei der Kombination dieser Verfahren besteht darin, eine Funktionsintegration und Verbesserung der Eigenschaften unter gleichzeitiger Verkürzung der Prozesskette zu erreichen, um letztendlich die notwendige Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Die Planung entsprechender Fertigungsprozesse muss dabei auf der Basis zuverlässiger und physikalisch basierter Prognosen von Gefüge-Eigenschaften-Korrelationen erfolgen. Daraus lassen sich dann allgemeingültige und beanspruchungsangepasste Designregeln für hoch- und komplexbeanspruchte Komponenten ableiten.

Als wesentlich wird im vorliegenden Fall auch die Umstellung auf eine reine Einzelteilfertigung (One-Piece-Flow) angesehen. Bei dieser Art der Fertigung ist eine erhebliche Verkürzung der Behandlungsdauer pro Bauteil erforderlich, für die sich eine induktive Wärmebehandlung hervorragend eignet [19]. Weitere Vorteile der Einzelteilfertigung sind geringe Reaktionszeiten auf veränderte Anforderungen an das Bauteil (bspw. bei veränderten Bestellmengen) und die flexible Anpassung der Parameter.

Im folgenden Abschnitt werden mögliche Prozesskettenvarianten diskutiert, welche später realisiert werden können. Anschließend werden einige grundsätzliche Resultate im Zusammenhang mit der Prozessintegration der induktiven Wärmebehandlung in einen Festwalzprozess vorgestellt. Die laufenden Forschungsarbeiten befassen sich insbesondere mit den erzielbaren randnahen Eigenschaften und Eigenspannungszuständen sowie der Prozesszuverlässigkeit und -wirtschaftlichkeit im Vergleich mit konventionellen Verfahren.

Bild 3 zeigt den schematischen Aufbau der Prozesskette. Diese besteht aus insgesamt drei Stationen, welche miteinander verkettet sind. Über die Bedieneinheit (Station I) lässt sich der gesamte Prozess regeln bzw. überwachen. Sowohl die Steuerung der Induktionsheizung und der Festwalzeinrichtung als auch die Überwachung der berührungslosen Temperaturmessung sind dadurch gewährleistet. Die Probekörper werden in Station II induktiv wärmebehandelt und direkt im Anschluss auf der Werkzeugmaschine (Station III) unter Verwendung einer weiteren Induktionsheizung bei definierter Temperatur festgewalzt. Anlassprozesse sind sowohl in Station II als auch III möglich. In Bild 4 sind schematisch mögliche Prozessvarianten dazu beschrieben. Teilbild 4 A zeigt den aktuell angewandten Prozess. Zunächst wird die Probe induktiv gehärtet (1). Das Anlassen findet konventionell im Ofen statt (2).

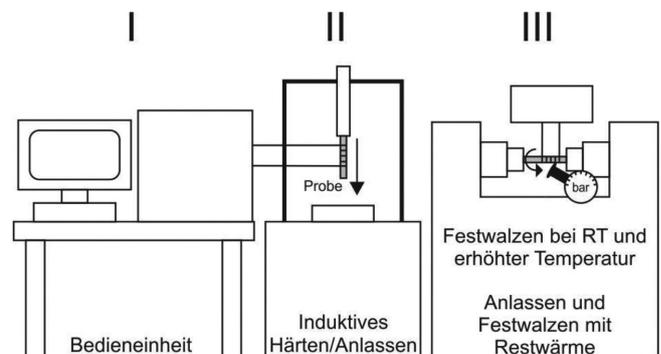


Bild 3. Schematischer Aufbau der integrierten Prozesskette

Fig. 3. Process chain for integration of inductive heating and deep rolling (schema)

¹ <http://www.uni-kassel.de/projekte/safer-materials/startseite.html>

Nach der Anlassbehandlung erfolgt das Festwalzen, bei dem die Probe in die Festwalzeinrichtung auf einer Werkzeugmaschine eingespannt wird (3). Das mehrfache Wechseln und Umspannen der Proben nimmt dabei viel Zeit in Anspruch. Zudem kann jeweils nur eine Probe induktiv gehärtet und festgewalzt werden. Zum Anlassen im Ofen werden aus wirtschaftlichen Gründen jedoch immer mehrere Proben gleichzeitig wärmebehandelt.

Teilbild 4 B zeigt eine Variation des zuvor beschriebenen Prozessablaufs. Dabei wird die Probe sowohl induktiv gehärtet als auch direkt im Anschluss daran induktiv angelassen (1), das Abkühlen der Probe nach dem Anlassen erfolgt an Luft. Je nach Anlassedauer ergeben sich hier erhebliche Zeiteinsparungen gegenüber Variante A, da nicht zunächst mehrere Proben gehärtet und dann gemeinsam angelassen werden. Im Anschluss an den Wärmebehandlungsprozess findet das Festwalzen auf der Werkzeugmaschine statt (2). Dazu muss die Probe einmalig umgespannt werden. Im letzten Teilbild (4 C) ist der Prozess mit kombiniertem Festwalz- und Anlassprozess dargestellt. Die abgeschreckte Probe wird direkt im Anschluss an das induktive Härten (1) auf die Festwalzeinrichtung umgespannt. Dort kann das Anlassen und das Festwalzen entweder simultan erfolgen oder aber konsekutiv. Eine konsekutive Ausführung bietet zusätzlich die Möglichkeit, beide Prozesse mit unterschiedlichen, definierten Temperaturen ($T_{\text{Festwalz}} \geq T_{\text{Anlass}}$ oder $T_{\text{Festwalz}} \leq T_{\text{Anlass}}$) oder auch ein Festwalzen bei Restwärme aus dem Anlassprozess durchzuführen. Ein weiterer Vorteil der Prozessvariante C ist ein zusätzlicher Zeitgewinn bzw. eine Vereinfachung der Prozessdurchführung, da sich die Temperatur des Probekörpers nach dem Härten und Abschrecken beim Umspannen auf Raumtemperatur befindet.

3 Versuchswerkstoffe und Versuchsdurchführung

Zunächst wurden, neben der technischen Konzeption der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Prozesskette zum kombinierenden Wärmebehandeln und Festwalzen, grundlegende Untersuchungen bzgl. der zu erwartenden Gefügestände und Eigenspannungsverteilungen sowie den resultierenden mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Untersucht wurden der Einfluss verschiedener Wärmebehandlungsverfahren vor dem Festwalzen sowie die Auswirkungen einer Variation der Parameter Temperatur, Druck und Überrollungszahl beim Festwalzen auf den Eigenspannungszustand und die Lebensdauer der Proben.

Als Modellwerkstoffe wurden der unlegierte Vergütungsstahl C45E und der legierte Vergütungsstahl 42CrMo4 ausgewählt. Beide Werkstoffe eignen sich gut für das Induktionshärten und werden in der Praxis häufig für schwingend beanspruchte Bauteile, wie bspw. Achsen oder Wellen, verwendet. Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe.

Als Probengeometrie wurde eine zylindrische Zug-Druck-Probe mit einer Gesamtlänge von 115 mm verwendet (Bild 5). Der Prüfquerschnitt besitzt einen Durchmesser von 6 mm. Neben der

Ermittlung der quasistatischen Kennwerte im Zugversuch wurden auch Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit Proben dieser Geometrie durchgeführt. Ebenso wurden daraus Prüfkörper für die mikroskopische Analyse sowie Härtemessungen präpariert. Alle Proben wurden zunächst induktiv auf der in Bild 6 schematisch dargestellten Wärmebehandlungseinrichtung gehärtet. Die Platzierung der Probe an der Kolbenstange des Pneumatikzylinders

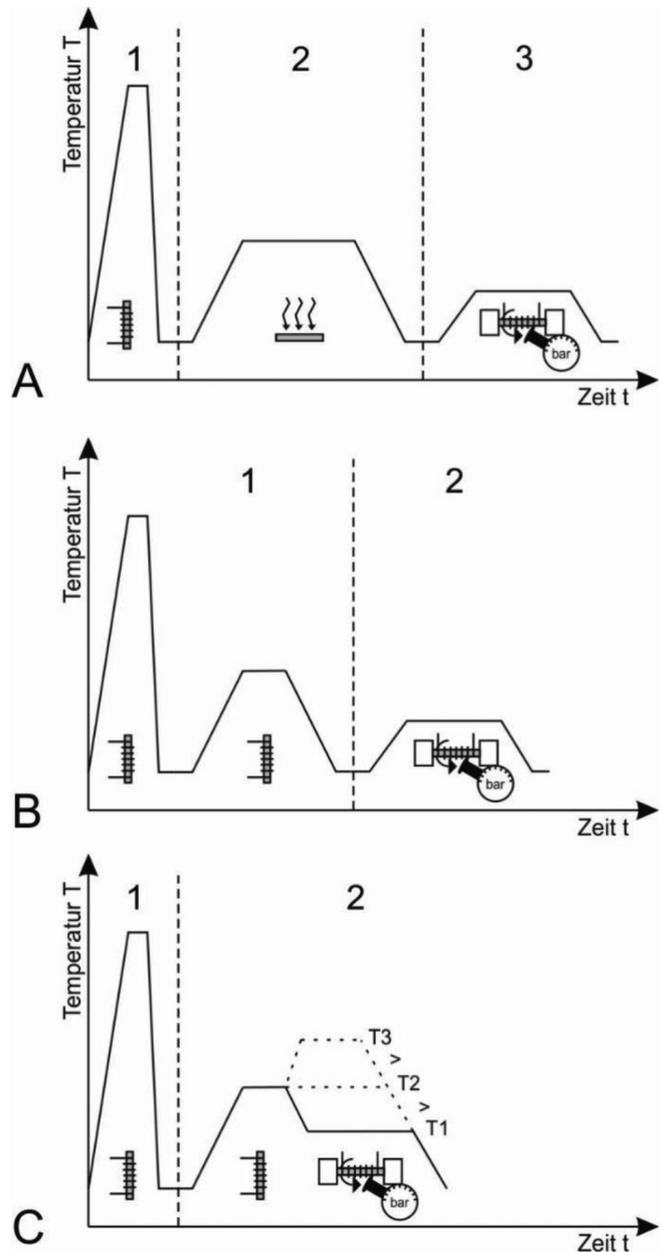


Bild 4. Variation der Prozessschritte und Prozesskombinationen (Prozessvarianten)

Fig. 4. Possible variations of process steps and process combinations

Bezeichnung	Werkstoffnr.	C	Mn	Si	S	Cr	Mo
C45E	1.1191	0,45	0,6	0,195	0,026	---	---
42CrMo4	1.7225	0,42	0,6	0,3	0,025	1,2	0,2

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe (Gehalt in Ma.-%)

Table 1. Chemical composition of the steels used (wt.-%)

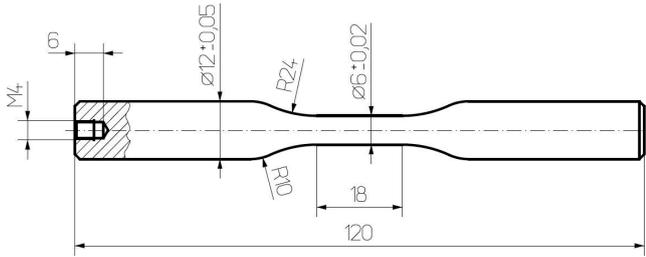


Bild 5. Endkontur der Zug-Druck-Proben

Fig. 5. Geometry of the specimen for tension-compression tests

erfolgte durch das stirnseitige Gewinde mittig in der Spule. Die Enden der Probe wurden aufgrund der Gesamtlänge der Spule nicht direkt durch den Induktor erwärmt, sondern lediglich durch die Wärmeleitung des Werkstoffs selbst. Dies hatte auf das spätere Festwalzen und die weiteren Untersuchungen jedoch keinen Einfluss. Die Temperaturmessung und -überwachung erfolgte mithilfe eines Pyrometers der Firma Sensortherm. Nachdem die Probe auf eine Austenitisiertemperatur von 900 °C erwärmt und für eine Sekunde gehalten wurde, fuhr der Pneumatikzylinder in die Endposition und tauchte die Probe in ein Abschreckbad. Die Abschreckung erfolgte dabei mit einer zur Martensitbildung hinreichend hohen Abschreckgeschwindigkeit. Sämtliche Proben waren anschließend durchgehärtet. Das Abschreckbad wurde durch eine Pumpe ständig umgewälzt, dadurch konnte der Effekt der Dampfhautbildung auf der Werkstoffoberfläche reduziert bzw. vermieden werden. Als Abschreckmedium diente für beide untersuchten Materialien ein Wasser-Polymer-Gemisch (Aquatensid BW der Firma Petrofer) mit einem 10 prozentigen Polymeranteil (C45E) bzw. einem 25 prozentigen Polymeranteil (42CrMo4). Durch die Verwendung synthetischer Abschreckmedien kann die Abschreckwirkung gezielt eingestellt werden, was sich weiter positiv auf die Bauteiloberfläche auswirkt. Etwaiger Verzug kann verhindert oder zumindest vermindert werden.

Bei Betrachtung des Temperatur-Zeit-Verlaufs (Bild 7) werden die kurzen Prozessdauern der induktiven Wärmebehandlung deutlich. Die Proben hatten nach bereits 11 s ihre Austenitisiert-

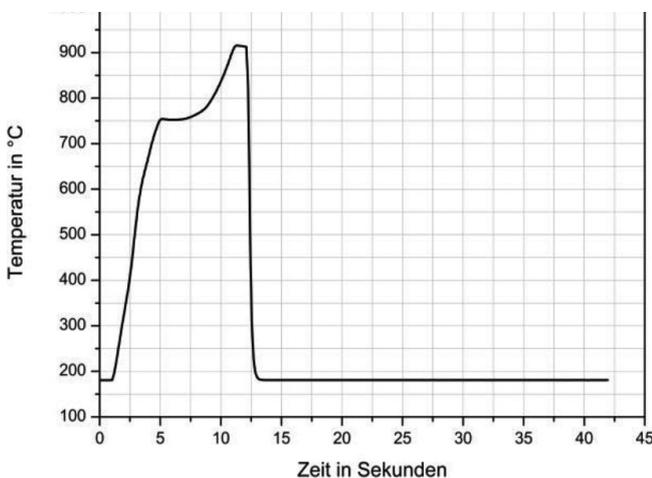


Bild 7. Temperatur-Zeit-Verlauf des induktiven Härteprozesses

Fig. 7. Temperature-time profile of the inductive heat treatment process

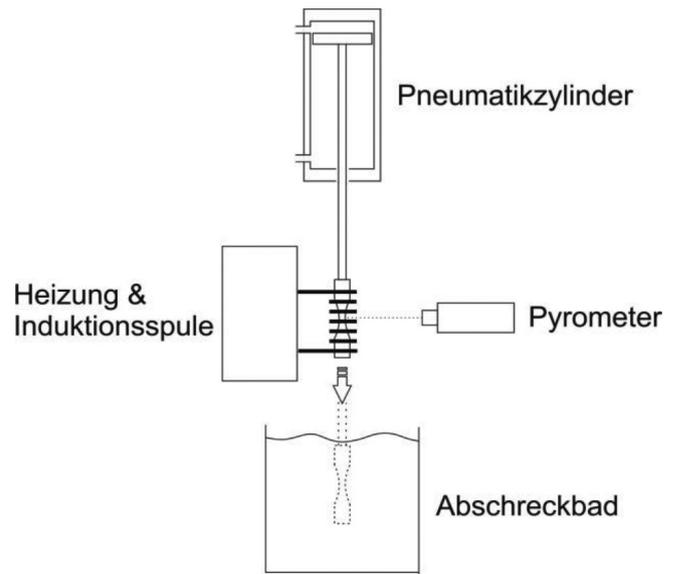


Bild 6. Wärmebehandlungseinrichtung (schematisch)

Fig. 6. Heat treatment equipment (schema)

temperatur erreicht und der gesamte Härteprozess war nach dem Abschrecken und einer anschließenden Haltephase im Abschreckbad nach ca. 42 s abgeschlossen. Dabei kann diese Haltedauer gegebenenfalls noch reduziert werden. Das sich daran anschließende Anlassen der durchgehärteten Proben erfolgte bisher konventionell im Luftumwälzofen (C45E) und im Salzbadofen (42CrMo4), bei 400 °C für vier Stunden (C45E) und bei 280 °C für eine Stunde (42CrMo4). Die nachfolgenden Beispiele betreffen Proben in unterschiedlichen Anlasszuständen. Außerdem wird auch über Vorversuche zum induktiven Anlassen berichtet.

Das Festwalzen fand auf einer konventionellen Werkzeugmaschine statt. Exemplarisch wird der Festwalzvorgang am Beispiel des in Bild 8 dargestellten Versuchsaufbaus erläutert. Die zylindrische Probe wurde durch zwei Spannfutter auf beiden Seiten fixiert. Um die Probe auf höhere Temperaturen zu erwärmen, stand eine Induktionsspule zur Verfügung. Die Temperaturüberwachung erfolgte mithilfe eines schlaufenförmigen Thermoelements. Als Festwalzrolle diente ein gehärtetes Walzrad der Firma Ecoroll mit einem Durchmesser von 40 mm. Über den angebrachten Pneumatikzylinder (\varnothing 80 mm) wurde die Rolle mit einer zuvor festgelegten Festwalzkraft auf die zylindrische Zug-Druck-Probe gedrückt und fuhr die Kontur der Probe über den gesamten Verfahrensweg innerhalb der Induktionsspule ab. Während des Festwalzprozesses erfolgte eine ständige Wasserkühlung der Festwalzrolle, die Spannfutter wurden durch eine Druckluftzufuhr gekühlt.

Ermüdungsversuche erfolgten spannungsgeregelt unter Zug-Druck-Beanspruchung mit einer Prüffrequenz von 15 Hz und einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ in einem servohydraulischen Prüfsystem der Firma Schenck. Für die Eigenspannungsmessungen, die konventionell nach dem $\sin^2 \Psi$ -Verfahren unter Verwendung von CrK α -Strahlung an den {211}-Gitterebenen erfolgten, stand ein entsprechendes Diffraktometer des Typs Huber zur Verfügung. Die Härtemessungen erfolgten normgerecht mit einem Härteprüfer der Firma Leco. Die mikroskopischen Aufnahmen wurden nach einer entsprechenden Probenpräparation mit Hilfe eines Lichtmikroskops der Firma Zeiss angefertigt.

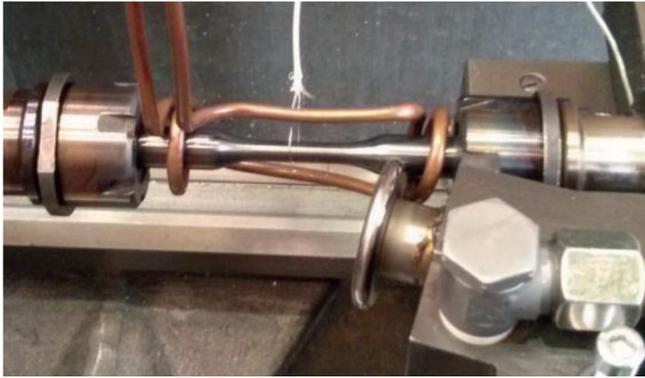


Bild 8. Induktiv erwärmte Probe beim Festwalzen

Fig. 8. Combined deep rolling and inductive heating of a specimen

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Härteverläufe und Gefüge

Bild 9 zeigt Härteverläufe des Stahls C45E der bei Raumtemperatur und bei 250 °C festgewalzten Proben, welche mit einem Festwalzdruck von 3 bar und jeweils 3-facher Überrollung festgewalzt wurden. Die Randhärte der bei Raumtemperatur festgewalzten Proben nimmt von 350 HV 0,3 im Kern der Probe auf 360 HV 0,3 im Randbereich leicht zu. Dies entspricht einer Härtesteigerung von knapp 3 %. Im Gegensatz dazu zeigt sich für die bei 250 °C festgewalzten Probekörper eine deutlichere Steigerung der Randhärte um etwa 22 %.

Lichtmikroskopische Untersuchungen der Randzone des Stahls C45E zeigen, dass sich aufgrund der Plastizierungen durch den Festwalzprozess eine Vorzugsrichtung der morphologischen Strukturen in der Randschicht ausbildet (vgl. Bild 10). Diese in Festwalzrichtung ausgeprägte Kornform ist für die bei Raumtemperatur festgewalzten Proben ausgeprägter als für die bei erhöhter Temperatur festgewalzten und wird durch eine mehrfache Überrollung der Proben noch verstärkt.

4.2 Eigenspannungszustände

In Bild 11 sind die in Probenlängsrichtung gemessenen Eigenspannungstiefenverläufe der mit 3 bar und einfacher Überrollung bei Raum- und höherer Temperatur festgewalzten Proben des Stahls C45E dargestellt. Tendenziell zeigen beide Zustände qualitativ

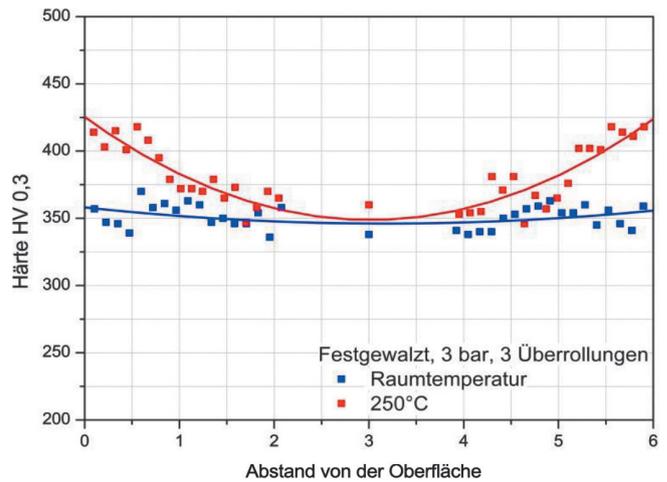


Bild 9. Härteverläufe des Stahls C45E (Anlasstemperatur $T_{Anlass} = 400^\circ\text{C}$) für bei Raumtemperatur und bei 250 °C mit einem Festwalzdruck von 3 bar und 3-facher Überrollung festgewalzte Proben

Fig. 9. Hardness-depth distributions of steel SAE1045 tempered at 400 °C and deep rolled at room temperature or 250 °C (deep rolling pressure: 3 bar, number of passes: 3)

einen ähnlichen Tiefenverlauf. Die maximalen Druckeigenstressungen liegen direkt an der Oberfläche. Im Falle des Festwalzens bei erhöhter Temperatur (250 °C) treten ca. 50-100 MPa höhere Druckeigenstressungsbeträge als bei Raumtemperatur auf.

Des Weiteren wurden Eigenspannungsmessungen an Proben aus 42CrMo4 nach einer Festwalzbehandlung mit variierten Parametern für Festwalzdruck und Überrollungszahl durchgeführt, um für den mit 280 °C niedrig angelassenen Zustand zweckmäßige Eigenspannungszustände generieren zu können. Exemplarisch sind die Eigenspannungen des bei Raumtemperatur und bei erhöhter Temperatur (280 °C) mit 3 bar und 3 Überrollungen festgewalzten Zustandes in den Bildern 12 und 13 jeweils für die axiale und tangential Messrichtung dargestellt.

Ähnlich der Proben aus C45E liegen die Eigenspannungsbeträge der bei erhöhter Temperatur festgewalzten Proben über denen der bei Raumtemperatur festgewalzten Proben. Auffällig sind hier vor allem die höheren axialen Eigenspannungen der bei 280 °C festgewalzten Probe ab ca. 0,25 mm unterhalb der Oberfläche (Bild 12) und deren ausgeprägtes Eigenspannungsmaximum in tangentialer Richtung bei einem Abstand von der Oberfläche von 0,5 mm (vgl. Bild 13). Die Wirkung der Festwalztemperatur auf Höhe und Tiefenverteilung der Eigenspannungen in Abhän-

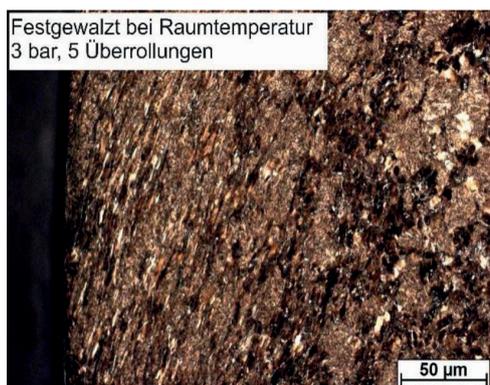


Bild 10. Kornmorphologie in der Randzone bei Festwalztemperaturen von Raumtemperatur (links) und 250 °C (rechts) bei C45E für einen Festwalzdruck von 3 bar und 5-facher Überrollung

Fig. 10. Grain morphology near the surface after deep rolling at room temperature (left) and at 250 °C (right) of steel SAE 1045 (deep rolling pressure: 3 bar, number of passes: 5)

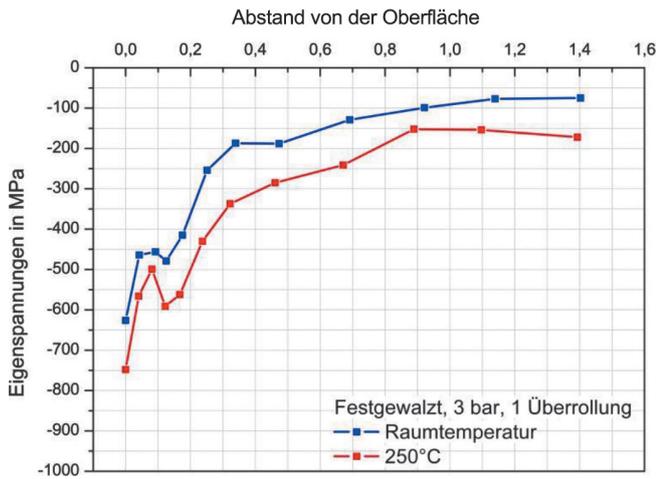


Bild 11. Eigenspannungstiefenverläufe des Stahls C45E in axialer Richtung für bei Raumtemperatur und bei 250°C mit einem Festwalzdruck von 3 bar und 1-facher Überrollung festgewalzte Proben

Fig. 11. Residual stress-depth distributions of steel SAE 1045 in axial direction deep rolled at room temperature or at 250°C (deep rolling pressure: 3 bar; number of passes: 1)

gigkeit der Anlasstemperatur und damit der mechanischen Eigenschaften ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

4.3 Induktives Anlassen

Für die Integration von Anlass- und Festwalzprozess sind Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Anlasstemperaturen, Haltezeiten und den resultierenden Härtewerten sowie den mechanischen Kennwerten der Werkstoffe C45E und 42CrMo4 erforderlich. Hierzu wurden die Werkstoffe auf unterschiedlichen Anlassenstufen bei einer Variation der Anlassedauer induktiv angelassen. Anschließend wurden Härteverläufe jeweils durch den gesamten Probenquerschnitt gemessen. Neben den Erkenntnissen über die

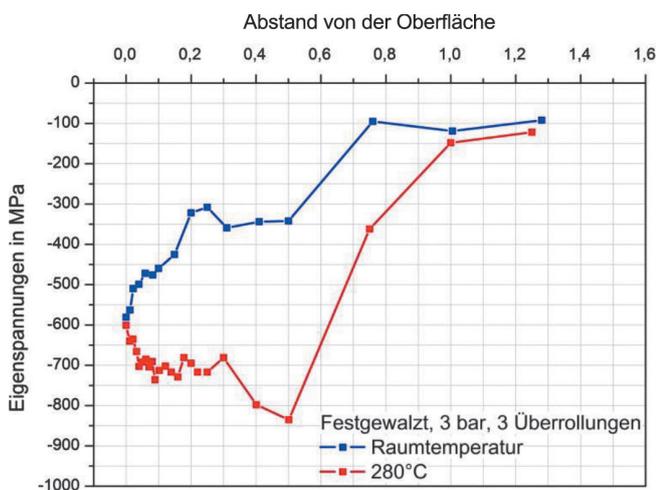


Bild 13. Eigenspannungstiefenverläufe des bei 280°C angelassenen Stahls 42CrMo4 in tangentialer Richtung nach dem Festwalzen bei Raumtemperatur und bei 280°C

Fig. 13. Residual stress-depth distributions of steel SAE 4140 tempered at 280°C in tangential direction after deep rolling at room temperature or at 280°C

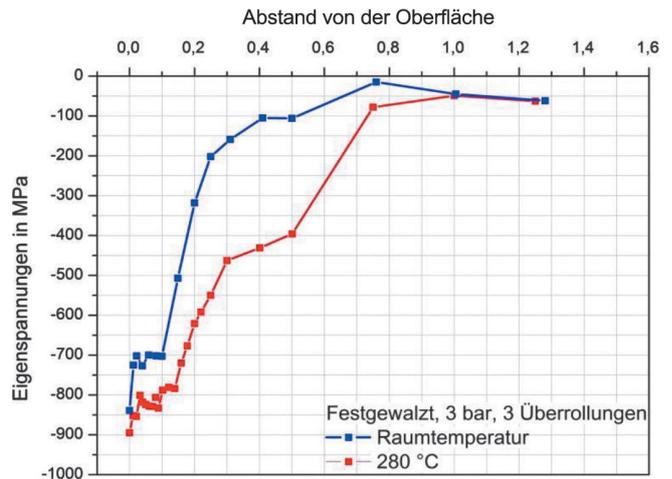


Bild 12. Eigenspannungstiefenverläufe des bei 280°C angelassenen Stahls 42CrMo4 in axialer Richtung nach dem Festwalzen bei Raumtemperatur und bei 280°C

Fig. 12. Residual stress-depth distributions of steel SAE 4140 tempered at 280°C in axial direction after deep rolling at room temperature or at 280°C

genannten Zusammenhänge bestand das Ziel der Untersuchungen in der Herstellung eines im Vergleich zu den konventionell angelassenen Proben möglichst gleichwertigen Zustandes bzgl. der mittleren Härte, Streuung der Härtewerte und des Verhältnisses von Härte und Zähigkeit, um schlussendlich die festgewalzten Zustände miteinander vergleichen zu können. Beispielhaft sind in Bild 14 der über den Probenquerschnitt gemittelte Härtewert und die Streuung der einzelnen Härteverläufe bei unterschiedlich langen Haltezeiten in der Induktionsspule und einer konstanten Anlasstemperatur von 540°C von 42CrMo4 dargestellt. In der gewählten halblogarithmischen Darstellung ergibt sich dabei ein linearer Zusammenhang.

In Bild 15 sind Härteverläufe über den Probenquerschnitt zweier induktiv und einer konventionell im Salzbad angelassenen Probe einander gegenübergestellt. Das angestrebte Ziel eines möglichst gleichwertigen Härteverlaufs nach dem induktiven Anlassen im Vergleich zum Anlassen im Salzbadofen wurde mit einer Anlassedauer von 20 Sekunden erreicht.

Eine Ermittlung der quasistatischen Kennwerte von Proben gleicher Härte im Zugversuch ergab, dass bei induktiv und konventionell im Salzbad angelassenen Proben vergleichbare Verhältnisse vorliegen, vgl. Bild 16. Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind bei den induktiv angelassenen Proben geringfügig höher als bei den konventionell angelassenen. Streck- bzw. Dehngrenze sind nahezu identisch, wobei bei den konventionell angelassenen Proben eine Streckgrenzenerscheinung auffällt, die bei den induktiv angelassenen nicht vorhanden ist. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Untersuchungen in [21], in denen u. a. der Einfluss der Kurzzeitwärmebehandlung auf die mechanischen Kennwerte analysiert wurde.

4.4 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

In Bild 17 sind statistisch nicht abgesicherte Ergebnisse von Schwingfestigkeitsuntersuchungen an induktiv gehärteten und konventionell im Salzbadofen angelassenen Proben des Stahls 42CrMo4 ohne und mit Festwalzbehandlung dargestellt. Die festgewalzten Proben

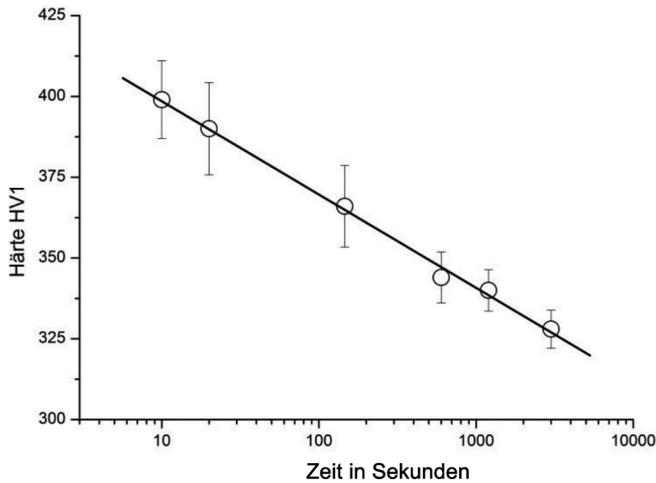


Bild 14. Zusammenhang von Anlasszeit und Mittelwert der Härte beim induktiven Anlassen bei $T_{\text{Anlass}} = 540^\circ\text{C}$ des Stahls 42CrMo4

Fig. 14. Influence of time temperature on mean hardness of steel SAE 4140 for inductive tempering at 540°C

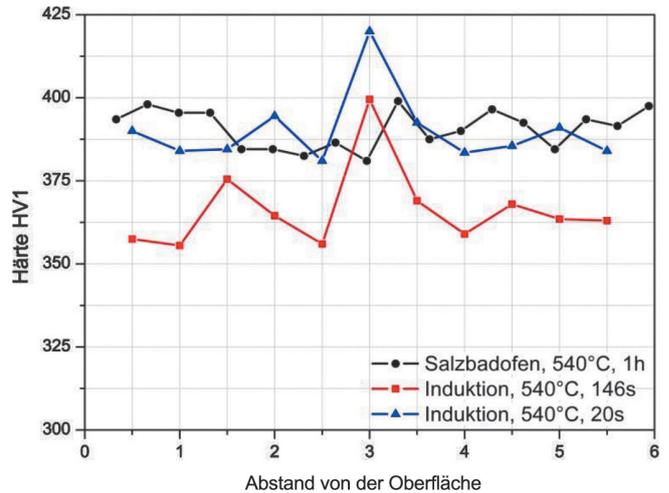


Bild 15. Vergleich der Härteverläufe beim induktiven Anlassen und Anlassen im Salzbad ($T_{\text{Anlass}} = 540^\circ\text{C}$) des Stahls 42CrMo4

Fig. 15. Hardness distributions after inductive tempering or tempering in a salt bath furnace at 540°C of steel SAE 4140

wurden bei Raumtemperatur bzw. bei 280°C mit jeweils 3 bar und 3 Überrollungen festgewalzt. Anschließend wurden jeweils fünf Proben pro Lasthorizont spannungskontrolliert bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ unter Zug-Druck-Beanspruchung ermüdet, wobei Spannungsamplituden im unteren Bereich der Zeitfestigkeit ($\sigma_a = 1000\text{ MPa}$), im mittleren Zeitfestigkeitsbereich ($\sigma_a = 800\text{ MPa}$) und im Übergang zur Dauerfestigkeit ($\sigma_a = 700\text{ MPa}$) gewählt wurden. Das Potenzial zur Lebensdauersteigerung durch eine Kombination aus induktiver Wärmebehandlung und einem Festwalzprozess ist deutlich zu erkennen. Erwartungsgemäß weisen festgewalzte Proben höhere Lebensdauern bzw. Festigkeiten auf als nur wärmebehandelte. Insbesondere bei den höchsten aufgeprägten Spannungsamplituden besitzen die bei 280°C festgewalzten Proben längere Lebensdauern als die bei Raumtemperatur behandelten. In zukünftigen Untersuchungen soll insbesondere die Wechselwirkung zwischen Anlass- und Festwalztemperaturen näher untersucht werden.

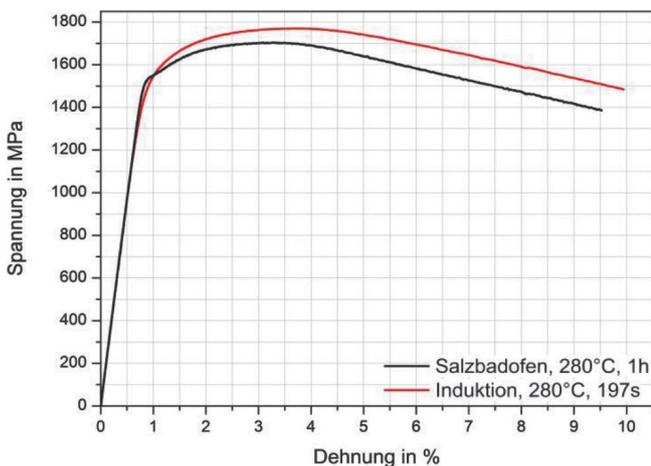


Bild 16. Spannung-Dehnung-Kurven des Stahls 42CrMo4 von induktiv und konventionell angelassenen Proben

Fig. 16. Comparison of stress-strain-diagrams after inductive or conventional tempering

Die Gründe für den in Bild 17 erkennbaren Lebensdauererfolg durch das Festwalzen bei erhöhter Temperatur liegen in der erhöhten Stabilität der eingebrachten Druckeigenstressungen und einer deutlichen Reduzierung der plastischen Dehnungsamplitude. Beide Effekte werden in [20] mit statischer und dynamischer Reckalterung und einer Stabilisierung der durch das Festwalzen bewirkten Versetzungsstruktur erklärt. Die hieraus resultierende Beschränkung der Versetzungsbeweglichkeit bedingt eine verringerte plastische Dehnungsamplitude. Dieses Verhalten wird auch in den aufgezeichneten Wechselverformungskurven bei einer Beanspruchungsamplitude von 1000 MPa aus Bild 18 deutlich. Während die bei Raumtemperatur festgewalzte Probe ab 10000 Zyklen eine starke Entfestigung aufweist, zeigt die bei 280°C festgewalzte Probe nur sehr kleine

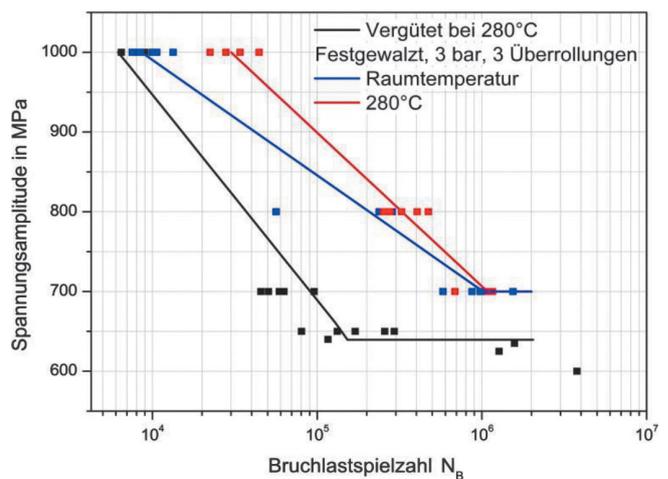


Bild 17. Wöhlerdiagramme festgewalzter Proben aus vergütetem 42CrMo4 im Vergleich zum Ausgangszustand – Einfluss erhöhter Temperatur beim Festwalzen

Fig. 17. S,N-curves of quenched and tempered deep rolled steel SAE 4140 compared with the starting condition – influence of deep rolling temperature

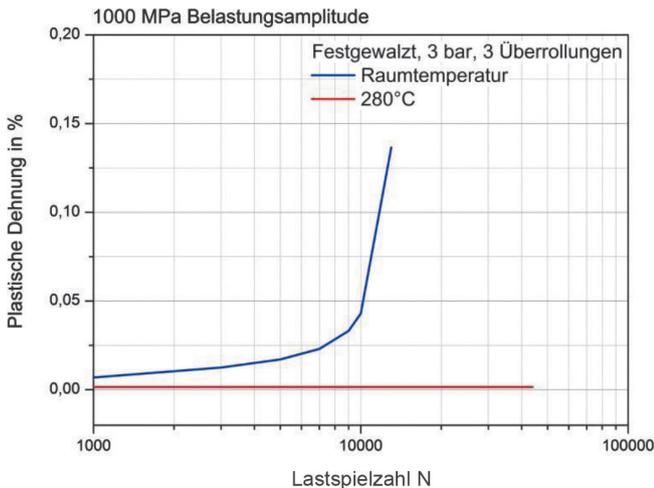


Bild 18. Wechselverformungskurven bei einer Belastungsamplitude von 1000 MPa unter Zug-Druck-Beanspruchung von bei Raumtemperatur und bei 280°C festgewalzten Proben aus 42CrMo4

Fig. 18. Plastic strain amplitude vs. number of cycles for specimen made of steel SAE 4140 deep rolled at room temperature or at 280°C (stress amplitude: 1000 MPa)

und über die Lebensdauer bis zum Bruch praktisch unveränderte plastische Dehnungsamplituden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Lebensdauer von Bauteilen wird entscheidend durch ihre Randschichtzustände beeinflusst. Mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren, wie z. B. Festwalzen oder Kugelstrahlen, verfolgen das Ziel, die Beanspruchbarkeit, Lebensdauer und die Sicherheit gegen Versagen insbesondere bei schwingender Beanspruchung zu erhöhen. Festwalzen bei erhöhten Temperaturen hat sich im Vergleich zum Raumtemperaturfestwalzen als besonders wirksam herausgestellt, da Eigenspannungszustände stabilisiert werden können. Es wurde das Konzept eines Prozesses vorgestellt und diskutiert, der eine zuverlässige und wirtschaftliche Integration des Hochtemperaturfestwalzens in die induktive Wärmebehandlung von Stählen ermöglicht. Zudem besteht hierbei die Möglichkeit, flexibel verschiedene Parametervariationen zu untersuchen und ihre Auswirkungen auf die Schwingfestigkeiten zu analysieren. Optimierte Parameter für unterschiedliche Ausgangszustände und Materialien können auf dieser Basis bestimmt werden. Charakteristische Auswirkungen des Prozesses auf randnahe Eigenschaften sowie die Schwingfestigkeit wurden am Beispiel von Proben aus vergütetem 42CrMo4 sowie C45E vorgestellt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst – Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE) – für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes „Safer Materials“.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Hessen State Ministry of Higher Education, Research and the Arts – Initiative for the Development of Scientific and Economic Excellence (LOEWE) – for financial support of the special research project “Safer Materials”.

Literatur

- Schulze, V.: Modern Mechanical Surface Treatment. Wiley-VCH, Weinheim, 2006. – ISBN 978-3-527-31371-6
- Scholtes, B.; Vöhringer, O.: Mechanical Surface Treatment. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Saleem Hashimai (ed.), Elsevier, Amsterdam, NL, 2016, DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.03549-9
- Scholtes, B.: Residual Stresses. In: Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, G. E. Totten, R. Colas (Hrsg.), Taylor & Francis, London, UK, 2015, S. 3005-3023
- Cho, K. T.; Song, K.; Oh, S. H.; Lee, Y.-K.; Lee, W. B.: Surface hardening of shot peened H13 steel by enhanced nitrogen diffusion. Surf. Coat. Tech. 232 (2013), S. 912-919, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.123
- Denkena, B.; Meyer, R.; Breidenstein, B.: Development of Combined Manufacturing Technologies for High-Strength Structure Components. Adv. Mater. Res. 22 (2007), S. 67-75, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.22.67
- Nikitin, I.: Zur Verbesserung des Ermüdungsverhaltens des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 im Temperaturbereich 25-600 °C durch mechanische Randschichtverfestigungsverfahren. Dissertation, Universität Kassel, 2007
- Gray, H.; Wagner, L.; Lütjering, G.: Effect of Modified Surface Layer Microstructures through Shot Peening and Subsequent Heat Treatment on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Ti Alloys. In: Shot Peening, H. Wohlfahrt u. a. (Hrsg.), DGM Informationsges., Oberursel, 1987, S. 467-475
- Menig, R.; Schulze, V.; Vöhringer, O.: Optimized warm peening of the quenched and tempered steel AISI 4140. Mat. Sci. Eng. 335 (2002), S. 198-206, DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01915-3
- Cherif, A.; Hochbein, H.; Zinn, W.; Scholtes, B.: Increase of fatigue strength and lifetime by deep rolling at elevated temperature of notched specimens made of steel SAE 4140. HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 (2011) 6, S. 342-348, DOI: 10.3139/105.110120
- Cherif, A.; Zinn, W.; Scholtes, B.: Consecutive and Simultaneous Coupling of Thermal and Deep Rolling Surface Treatments. Proc. 1st Int. Conf. on Thermo-Mechanically Graded Materials, 29.-30.10.12, Kassel, H.-P. Heim u. a. (Hrsg.), Wiss. Skripten Auerbach, 2012, S. 91-96
- Cherif, A.: Analyse und Beurteilung gekoppelter thermisch-mechanischer Prozesse zur Randschichtverfestigung. Dissertation, Universität Kassel, 2011
- Conrad, G.: Betrachtungen zur Schwingfestigkeit von Bauteilen nach induktiver Randschichthärtung mit sehr kurzen Heizzeiten. HTM Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung 61 (2006) 3, S. 165-171, DOI: 10.3139/105.100373
- Goy, W.; Bartknecht, D.: Induktives Fixturhärte- und Anlassverfahren. HTM J. Heat Treatm. Mat. 65 (2010) 1, S. 46-51, DOI: 10.3139/105.110049
- Steineder, K.; Schneider, R.: Influence of short-cycle heat treatment conditions on the hardness-toughness-relationship of the steels 51CrV4, 74NiCr2 mod. and 100Cr6. HTM J. Heat Treatm. Mat. 68 (2013) 2, S. 77-84, DOI: 10.3139/105.110179
- Dengel, D.: Kurzzeitanlassen von Stahl. HTM Haertere-Techn. Mitt. 39 (1984) 5, S. 182-192
- Dengel, D.; Schlicht, H.: Zur Untersuchung von Anlassvorgängen bei induktiver Schnellerwärmung. HTM Haertere-Techn. Mitt. 36 (1981) 5, S. 223-230
- Rodman, D.; Nürnberger, F.; Daling, A.; Schaper, M.; Krause, C.; Kästner, M.; Reithmeier, E.: Tempering Induction Hardened 42CrMo4 Steel Helical Gearwheels from Residual Heat Using Spray Cooling. steel research int. 85 (2014) 3, S. 415-425, DOI: 10.1002/srin.201300133
- Beekhuis, B.; Meyer, D.; Brinksmeier E.; Epp, J.: Verzugkompensation von Wälzlagering durch Festwalzen. HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 (2011) 3, S. 165-174, DOI: 10.3139/105.011034
- Goy, W.; Altena, H.: Prozessintegration der Wärmebehandlung in die Fertigung. HTM J. Heat Treatm. Mat. 71 (2016) 1, S. 3-11, DOI: 10.3139/105.110275
- Nikitin, I.; Altenberger, I.; Cherif, M. A.; Juijerm, P.; Maier, H. J.; Scholtes, B.: Festwalzen bei erhöhten Temperaturen zur Steigerung der Schwingfestigkeit. HTM Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung 61 (2006) 6, S. 289-295, DOI: 10.3139/105.100395
- Holzweissig, M. J.; Lackmann, J.; Konrad, S.; Schaper, M.; Niendorf, T.: Influence of Short Austenitization Treatments on the of Low-Mechanical Properties Alloy Steels for Hot Forming Application. Metall Mat. Trans. A 46 (2015) 7, S. 3199-3207, DOI: 10.1007/s11661-015-2907-3

Bibliography

DOI:10.3139/105.110311
 HTM J. Heat Treatm. Mat.
 72 (2017) 1; page 10-18
 © Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
 ISSN 1867-2493