

1

Einleitung

Das induktive Randschichthärten ist ein langjährig in der Industrie angewendetes elektrothermisches Verfahren, das zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Bau- und Konstruktionsteilen aus Stahl, Stahlguss oder Gusseisen eingesetzt wird. Die wärmebehandelten Werkstücke weisen im Oberflächenbereich große Härten auf, besitzen im nicht gehärteten Kern jedoch eine Restduktilität, die bei stoßartigen Belastungen von großem Vorteil ist. Daraus resultieren zahlreiche Anwendungsgebiete im Automobilbereich, wie beispielweise bei Innenverzahnungen in Automatikgetrieben, die an der Oberfläche starkem Verschleiß unterliegen und große Kräfte übertragen müssen [1–4].

Der Härtevorgang ist in mehrere Teilschritte unterteilbar. Zunächst wird das Werkstück induktiv oberflächennah auf eine Temperatur oberhalb der Austenitisierungstemperatur erwärmt. Je nach Erwärmungsdauer, die beim Randschichthärten abhängig von der Einhärtetiefe und dem geforderten Härteprofil zwischen 0,2 und 2 Sekunden liegt, werden Temperaturen von 850 bis 950 °C erreicht. Unmittelbar nach der Erwärmungsphase folgt die Abschreckung an der Werkstückoberfläche mittels einer Kühlemulsion. Ist die erzielte Abkühlgeschwindigkeit hoch genug, wird das Austenitgefüge vollständig in widerstandsfähiges Martensit umgewandelt. Zur Reduzierung der Härte oder zur Verringerung der durch die großen Temperaturgradienten entstandenen thermischen Spannungen kann das gehärtete Werkstück auf einem niedrigen Temperaturniveau angelassen werden [5–8].

Das Verfahren des induktiven Randschichthärtens stellt hohe Anforderungen an das Werkstückmaterial und die Anlagentechnik. Aufgrund der sehr kurzen Erwärmungszeiten im Zehntel-Sekunden-Bereich, man spricht in diesem Zusammenhang von einer Kurzzeitaustenitisierung, steht für den Austenitisierungsvorgang ein sehr begrenzter Zeitraum zur Verfügung. Das Ausgangsmaterial sollte vorvergütet sein und eine kleine Korngröße aufweisen, die mit sinkender Erwärmungszeit feiner gewählt wird. Des Weiteren sollte die Härtetemperatur bei kurzen Erwärmungszeiten höher gewählt werden als bei langen Erwärmungszyklen [9–11].

Die kurzen Heizzeiten sind zwingend erforderlich, damit die in der Randschicht erzeugte Wärme nicht durch Wärmeleitungseffekte in den Kern des Werkstücks abgeführt wird. Dies würde zur unerwünschten Durchhärtung im Volumen führen. Sehr kurze Erwärmungszeiten erfordern hohe Generatorleistungen, verbunden mit großen Induktorströmen. Mit einer Generatorleistung von 1000 kW kann eine Oberfläche von ca. 150 cm² konturnah randschichtgehärtet werden [12]. Aufgrund der großen Stromdichten werden in den Induktoren große Verlustleistungen umgesetzt. Deshalb werden Induktoren aus Hohlleitern hergestellt, durch die Kühlwasser strömt. Neben der Kühlung stellen die am Induktor wirkenden Kräfte, hervorgerufen durch die hohen Induktorströme und magnetischen Feldstärken, eine weitere Herausforderung dar. Gerade bei Kurzzeithärtungen müssen die Induktoren mechanisch stabil ausgeführt werden.

Das erzielte Härteergebnis ist u. a. abhängig von der Induktorgeometrie sowie den Härteparametern, zu denen beispielsweise die Erwärmungszeit, die Frequenz des Induktorstroms und dessen Größe zählen. Die Daten werden i. A. empirisch durch kostenintensive Versuchsreihen ermittelt, die umfangreicher werden, je komplexer sich die Werkstückgeometrie und das geforderte Härteprofil darstellen. Mittels numerischer Simulationen können anstelle aufwendiger experimenteller Untersuchungen kostengünstige computergestützte Parameterstudien zur Ermittlung der Härteparameter durchgeführt werden. Der Einsatz numerischer Simulationsmodelle zur Prozessauslegung und Optimierung hat sich in verschiedensten Anwendungsgebieten durchgesetzt. So wurden beispielsweise unter Zuhilfenahme numerischer Simulationen der sogenannte Czochralski-Prozess zur Herstellung von einkristallinem Silizium optimiert [13] und induktive Querfeldbanderwärmer für industrielle Prozesse ausgelegt [14]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein numerisches Simulationsmodell vorgestellt, das den transienten dreidimensionalen Erwärmungsvorgang für das induktive Randschichthärten erfolgreich berechnet. Es kann zur Ermittlung der Induktorgeometrie und der einzustellenden Härteparameter, insbesondere bei innovativen komplexen Härteaufgaben, effizient eingesetzt werden.

2

Problemstellung und Zielsetzung

Induktive Randschicht-Härteverfahren werden in der Industrie auf verschiedensten Anwendungsgebieten erfolgreich eingesetzt. In der Automobilindustrie werden beispielsweise Kurbelwellen, Ventile oder Zahnräder induktiv gehärtet. Des Weiteren werden stark beanspruchte Werkzeugoberflächen randschichtgehärtet.

Der Einsatz des induktiven Randschichthärtens liegt darin begründet, dass es als direktes elektrothermisches Verfahren zahlreiche Vorteile gegenüber dem traditionellen Einsatzhärten bietet. Beim induktiven Härten wird die Wärme direkt im Gut erzeugt. Dadurch sind sehr hohe Leistungsdichten realisierbar, die Erwärmungsvorgänge im Zehntel-Sekunden-Bereich ermöglichen. Die Wärme muss nicht, wie es beim Einsatzhärten der Fall ist, über die Oberfläche in das Gut eingebracht werden. Die Härteanlagen weisen, im Vergleich zu den voluminösen Heizkammern beim Einsatzhärten, eine sehr kompakte und platzsparende Bauweise auf. In Verbindung mit den kurzen Taktzeiten ist eine wirtschaftliche Integration in eine Fertigungslinie möglich. Der Transport zur Wärmebehandlung in eine Einsatzhärterei entfällt.

Neben den ökonomischen Vorteilen weisen induktiv randschichtgehärtete Bauteile Vorteile hinsichtlich der Produktqualität auf. Die Härteparameter, wie beispielsweise die Frequenz des Induktorstroms, dessen Größe und die Erwärmungs- bzw. Härtezeit, sind präzise regelbar. Die im Werkstück umgesetzte Volumenleistung und das daraus resultierende Erwärmungsprofil, welches beim induktiven Randschichthärten unmittelbar auf das zu erwartende Härteprofil schließen lässt, sind damit sehr gut reproduzierbar. Die Prozesssicherheit ist exzellent. Des Weiteren kann hervorgehoben werden, dass aufgrund der extrem kurzen Wärmebehandlungszeiten der Werkstückverzug minimal ist. Ebenfalls sind, anders als beim Einsatzhärten, kaum Verzunderungen an der Werkstückoberfläche erkennbar.

In den letzten Jahren wird in zunehmendem Maße versucht, neben den erwähnten klassischen Einsatzgebieten des induktiven Randschichthärtens neue Anwendungsgebiete zu erschließen, um die Vorteile dieses Verfahrens nutzen zu können. Die neuartigen

Härteaufgaben stellen höchste Ansprüche hinsichtlich des Härteprozesses. Durch geringe Wandstärken, verbunden mit filigranen Werkstückgeometrien, sollen Kosten eingespart werden. Dabei ist ein Durchhärten des Werkstücks oft unerwünscht, da eine Duktilität einen positiven Einfluss auf das Bruchverhalten der mechanisch meist stark beanspruchten Werkstücke besitzt. Oft wird zusätzlich ein konturnahes Härtebild gewünscht.

Um das geforderte Härteergebnis zu erzielen, müssen gerade bei innovativen Härteaufgaben zahlreiche kostenintensive Versuchsreihen durchgeführt werden. Vorhandenes Fachwissen ist zum Erreichen des gewünschten Härteprofils von Vorteil, führt aber nicht zwingend zu befriedigenden Härteergebnissen.

Die jüngsten Entwicklungen in der Computertechnik sowie der kommerziellen Simulationssoftware erlauben es, induktive Erwärmungsvorgänge numerisch zu untersuchen. Mittels Parameterstudien kann das Härteverfahren, die Induktorgeometrie sowie die einzustellenden Härteparameter, wie beispielsweise die Frequenz und Größe des Induktorstroms, bestimmt werden. Somit können in nennenswertem Umfang zeitraubende und kostenintensive experimentelle Härtungen reduziert werden.

Um den Erwärmungsprozess beim induktiven Randschichthärten erfolgreich berechnen zu können, muss das zu entwickelnde numerische Simulationsmodell folgende Voraussetzungen erfüllen:

- 3D-Berechnungsmodell: Weisen die Werkstückgeometrie und das geforderte Härteprofil komplexe dreidimensionale Geometrien auf, ist eine Reduzierung auf ein zweidimensionales Simulationsmodell oft nicht mehr zulässig, da zu starke Vereinfachungen beim Erstellen des Modells getroffen werden müssten. Nur eine dreidimensionale Analyse führt zum bestmöglichen Ergebnis.
- Transienter Erwärmungsvorgang: Der Erwärmungsvorgang bei dem induktiven Randschichthärten ist zeitabhängig und höchst dynamisch. Eine stationäre Berechnung führt nicht zu einem sinnvollen Ergebnis.
- Kopplung elektromagnetischer und thermischer Felder: Das elektromagnetische und das thermische Feld beeinflussen sich gegenseitig. Durch die elektromagnetische Berechnung wird die im Gut umgesetzte Volumenleistungsdichte be-

stimmt, die zur Erwärmung führt. Die Temperaturverteilung im Werkstück wirkt über die temperaturabhängigen Materialeigenschaften auf das elektromagnetische Feld zurück. Beispielsweise verliert Stahl beim Erreichen der Curie-Temperatur den Ferromagnetismus, welches sich signifikant auf den Feldverlauf auswirkt.

- Temperaturabhängige Materialdaten: Beim induktiven Härtevorgang wird das Werkstück ausgehend von Raumtemperatur auf bis zu 1000 °C erwärmt. Die Materialdaten ändern sich in diesem Temperaturbereich teilweise so stark, dass die Eingabe eines Mittelwertes nicht zulässig ist.
- Werkstückrotation / Vorschub: Bei verschiedenen Anwendungen rotiert das zu erwärmende Werkstück, oder es wird im Vorschub gehärtet. Sind die Vorgänge zeitlich schnell veränderlich, so müssen sie im Simulationsmodell berücksichtigt werden.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein numerisches Simulationsmodell aufbauend auf der kommerziellen FEM-Software ANSYS [15, 16] zu entwickeln, das den Erwärmungsprozess für das induktive Randschichthärten komplexer Geometrien erfolgreich simuliert. Anhand eines konkreten Anwendungsfalls, dem induktiven Randschichthärten einer Schneckenwelle für Schneckengetriebe, soll der Einfluss unterschiedlicher Frequenzbereiche und Generatorleistungen auf das Erwärmungsprofil untersucht werden, das seinerseits auf das zu erwartende Härteergebnis schließen lässt. Des Weiteren soll die innovative Zweifrequenz-Technik, bei der gleichzeitig mit einer Mittel- und einer Hochfrequenz induktiv erwärmt wird, im Simulationsmodell implementiert werden, da sie für das konturnahe Härten komplexer Geometrien besonders gut geeignet ist [17–19]. Das numerische Modell ist mittels experimentellen Probehärtungen zu verifizieren.

Ferner ist zu untersuchen, ob das entwickelte numerische Simulationsmodell für die automatische Optimierung verwendet werden kann. Bei der automatischen Optimierung werden unter Einbeziehung definierter Randbedingungen numerisch die Werte der Eingabegrößen für das Simulationsprogramm bestimmt, die zum bestmöglichen Ergebnis führen. Beispielsweise werden die Frequenz und Größe des Induktorstroms ermittelt, die zu einer möglichst homogenen Temperaturverteilung führen. Das Simu-