

„Numerische Simulation des induktiven Randschichthärtens mit Ersatzwärmequellen“

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Maria K. Stephan

Das Induktionshärten von Großwälzlageringern mit mehreren Metern Durchmesser wie sie beispielsweise in Kränen, Windkraftanlagen oder Tunnelbohrmaschinen zum Einsatz kommen, ist seit Jahrzehnten etabliert. Trotz der starken Weiterentwicklung der Rechentechnik war es bisher nicht möglich, den Prozess des Induktionshärtens solcher Großwälzlageringerringe umfassend zu simulieren. Die beteiligten physikalischen Felder und deren starke Wechselwirkungen erlaubten bisher nur Simulationen der Gesamtflächenhärtung an symmetrischen Bauteilen mit Abmessungen in der Größenordnung weniger 10 mm.

Der neuartige Ansatz, die induktive Härtung mittels Ersatzwärmequellen zu simulieren, ermöglicht auch die Simulation größerer Bauteile für die Härtung im Vorschubverfahren. Dazu wird der Induktionshärteprozess zunächst experimentell mit zahlreichen in-situ Temperaturmessungen charakterisiert, sodass basierend auf diesen Temperatur-Zeit-Verläufen dreidimensionale Ersatzwärmequellen entwickelt werden können. Auch eine Anpassung der temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten an die tatsächlich vorhandene Brausenabschreckung wurde vorgenommen.

Am Beispiel eines geraden Ringabschnittes mit dem Querschnitt eines Tragrings aus einem Großwälzlager wurden die notwendigen Ersatzwärmequellen im quasistationären Zustand für Tragbahn und Verschleißbahn entwickelt und eine Anpassung der temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten der Brausenabschreckung vorgenommen. Die Validierung erfolgte anhand experimenteller Härtungen mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen zusammen mit den Simulationsergebnissen sehr anschaulich, dass es möglich ist, Simulationen des Induktionshärtens mit Ersatzwärmequellen durchzuführen ohne die elektromagnetischen Felder direkt zu berücksichtigen. Dieser neuartige Ansatz ermöglicht thermische, thermisch-metallurgische oder perspektivisch auch thermisch-metallurgisch-mechanische Simulationen des

Induktionshärtens ohne elektromagnetische Felder einzubeziehen. Ohne weitere Änderungen der Ersatzwärmequellen sind im untersuchten Rahmen auch Simulationen mit veränderter Vorschubgeschwindigkeit bei gleichem Induktor möglich.

Gegenüber den bisherigen eingeschränkten Anwendungen von Ersatzwärmequellen wird hier die komplexe dreidimensionale Geometrie des Bauteils und des Induktors berücksichtigt. Auch die Relativbewegung zwischen Induktor und Bauteil während des Härtens und damit der Charakter des Vorschubprozesses können auf diese Weise korrekt simuliert werden.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Ersatzwärmequellen als Produkt aus einzelnen Funktionen der Raumrichtungen und einem Skalierungsfaktor beschrieben werden können. Sie können basierend auf experimentellen Temperatur-Zeit-Verläufen des Prozesses iterativ bestimmt werden, wobei eine getrennte Anpassung der einzelnen Verteilungsfunktionen durch den multiplikativen Ansatz möglich ist. Darüber hinaus ist auch die abschnittsweise Definition einzelner Verteilungsfunktionen in Abhängigkeit der jeweils anderen Raumkoordinaten möglich. Der aus diesem Ansatz entstehenden Flexibilität sind nur durch die Wahl der funktionalen Zusammenhänge und der resultierenden Anzahl der Parameter Grenzen gesetzt. Daher sind Ersatzwärmequellen mit diesem Ansatz nicht nur für Anwendungen des Induktionshärtens mit verschiedensten Induktor- und Bauteilgeometrien sowie unterschiedlichen Werkstoffen und Prozessparametern geeignet, sondern auch für die Simulation von Volumenwärmequellen in anderen Fertigungsprozessen.

Entscheidend für die korrekte Bestimmung von Ersatzwärmequellen ist dabei die Messung der Temperatur-Zeit-Verläufe an einer Vielzahl von Positionen, die eine Charakterisierung des dreidimensionalen zeitabhängigen Temperaturfeldes ermöglicht. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass sowohl eine Kenntnis der exakten Messpositionen entscheidend ist als auch eine Messung mit einer niedrigen Zeitkonstante der Thermoelemente. Da diese Anforderung in den meisten Fällen nicht vollständig umsetzbar ist, kann alternativ auch eine Rekonstruktion der Temperatur-Zeit-Verläufe basierend auf Kalibrierungsversuchen der Thermoelemente vorgenommen werden, um die Temperaturmessungen nachträglich hinsichtlich der thermischen Trägheit und der Kontaktbedingungen zu korrigieren.

Die erzielten Abweichungen der Simulationen von durchschnittlich 20 % im Vergleich zu den experimentellen Einhärtungstiefen bei gleichzeitig sehr guter Abbildung der Form der gehärteten Schicht sind in Anbetracht der Komplexität des Induktionshärtens großer

Bauteile im Vorschubverfahren als sehr gut zu bewerten. Die verbleibenden Unterschiede können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden:

- stark geseigerter Werkstoff,
- Berechnung der Einhärtungstiefe aus den Phasenanteilen,
- Grenzen der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung vor dem Hintergrund der Rechenzeit,
- verwendete Literaturdaten der thermophysikalischen Eigenschaften,
- Verwendung eines einzigen Umwandlungsmodells bei der Abschreckung unabhängig von den örtlichen Austenitisierbedingungen.

Damit bietet der dargelegte Ansatz auch die Möglichkeit, zukünftig Simulationen des Induktionshärtens im Vorschubverfahren an großen Bauteilen wie Großwälzlagerringen durchzuführen und dabei den Spannungs- und Dehnungszustand zu charakterisieren. Die langen Rechenzeiten von derzeit bis zu 8 Wochen auf einem leistungsfähigen Simulations-PC¹ machen weitere Arbeiten am Modell erforderlich, bevor eine Erweiterung um die Spannungen und Dehnungen oder ein Einsatz in der industriellen Praxis sinnvoll ist. Diese Rechenzeiten können durch die Verwendung von leistungsfähigen Rechnerclustern verkürzt werden.

Die aktuellen Ersatzwärmequellen wurden noch nicht zur Untersuchung des Einflusses weiterer Prozessparameter wie Härtfrequenz, Induktorstrom oder Koppelabstand verwendet. Zukünftig wäre hier ein zweistufiges Vorgehen denkbar. In einem ersten Schritt wird mittels elektromagnetisch-thermischer Simulation die Ersatzwärmequelle bestimmt. Im zweiten Schritt dient diese Ersatzwärmequelle als thermische Randbedingung einer thermisch-metallurgisch-mechanischen Simulation. Auf diese Weise sind auch Parameterstudien der Frequenz, des Induktorstroms oder des Koppelabstand möglich und die Ersatzwärmequellen können in ihrer räumlichen Verteilung angepasst werden.

¹ FUJITSU CELSIUS R970 (x64 System) mit 2 Intel® Xeon® Gold 5122 Prozessoren (3,60 GHz, 4 Kerne, 8 Threads), 192 GB RAM mit 2 933 MT/s und NVIDIA Quadro P400.