

Oberflächenhärtung durch Induktion

Wie entsteht die harte Schale?

Für die Härtung von Stahl muss der zu härtende Bereich des Werkstückes über eine Temperatur von ca. 800 °C (Austenitisierungstemperatur) erwärmt und anschließend schnell bis unter etwa 500 °C abgekühlt werden. Der Prozess der Erwärmung kann durch Heizen mit Gas, durch Gleichstrom oder durch hochfrequenten Wechselstrom erfolgen.

Die Wirbelströme, die bei hoher Frequenz auftreten, haben die besondere Eigenschaft, oberflächennah zu fließen und ermöglichen damit eine Aufheizung in der Nähe der Oberfläche. Dieses Phänomen ist also bestens geeignet, eine Oberflächenhärtung im industriellen Maßstab zu realisieren. Wird der hochfrequente Wechselstrom durch die Induktion aus einer Primärspule erreicht, nennt man das Verfahren Induktionshärten.

In der industriellen Anwendung wird das Werkstück häufig unter einer oder mehreren Induktionsspulen hindurchgeführt, um eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten. Eine effiziente Art der Härtung wird erreicht, wenn der Erwärmungsprozess und der anschließende Abkühlungsprozess kontinuierlich ablaufen, z.B. wenn das Werkstück aus einem Band oder einem großen rotierenden Objekt besteht. Hier soll nun die Induktionshärtung an einem solchen Beispiel dargestellt werden.

Wirbelstromverteilung im Werkstück

Das Bild 1 zeigt die prinzipielle Anordnung, bestehend aus der Induktorwindung aus Kupfer, die von innen wassergekühlt wird, einem Joch aus magnetischem Material und dem sich geradlinig bewegenden Werkstück. Für die Simulation sind zwei

Domänen zu betrachten, die elektromagnetische Domäne, bestehend aus den oben genannten Bauteilen und der Umgebungsluft, sowie die thermische Domäne, die auf das unendliche Band beschränkt werden kann.

In der magnetischen Domäne ist zu beachten, dass zwar der Strom in der Primärspule harmonisch (sinusförmig) fließt, jedoch die Wirbelstromverteilung im Werkstück einen nicht harmonischen Zeitverlauf aufweist, da das Stahlband eine nichtlineare magnetische Materialeigenschaft besitzt. Also muss die magnetische Domäne nichtlinear transient über mehrere Perioden des Stromes bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes be-

rechnet werden. Ergebnis der elektromagnetischen Rechnung ist die Wärmegenerationsrate, die der Joule'schen Verlustleistungsdichte entspricht. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Domäne, in der die charakteristischen Zeiten (Periodenlänge) im Bereich unter einer Millisekunde liegen, sind die charakteristischen Zeiten in der thermischen Domäne eher im Bereich von Sekunden. Für die Lastübertragung zur thermischen Domäne wird also eine zeitliche Mittelung der Wärmegenerationsrate über eine Periode nötig. Diese gemittelte Wärmegenerationsrate kann dann zur thermischen Domäne als Last übertragen werden. Die Kopplung der beiden Domänen wird als Lastvektorkopplung bezeichnet.

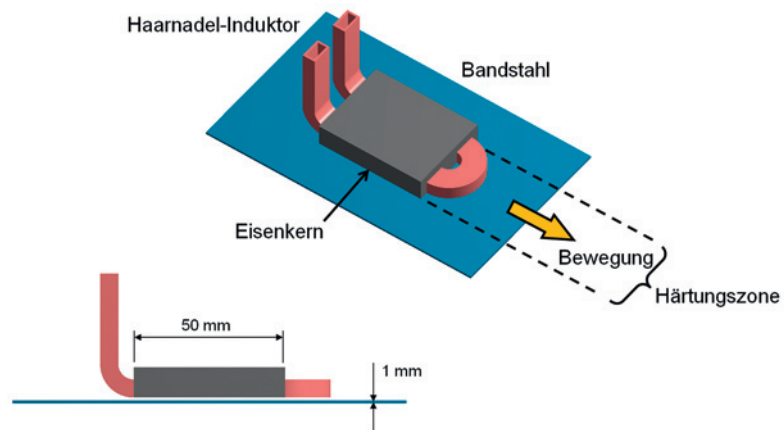


Bild 1: Für die Simulation des Induktionshärtens sind die elektromagnetische und die thermische Domäne zu betrachten.





Erwärmung erfolgt nicht homogen

Die Erwärmung des Bandes erfolgt nicht homogen, sondern örtlich und zeitlich variierend durch die importierte Wärmegenerationsrate sowie die Wärmeleitung im Werkstück. Zusätzlich muss die Abkühlung berücksichtigt werden, die in diesem Beispiel durch eine geeignete orts- und temperaturabhängige Konvektion realisiert wird.

Während der Erwärmung ändert das Werkstückband seine elektrischen und magnetischen Materialeigenschaften. Bei sehr hohen Temperaturen verliert es sogar seine ferritischen Eigenschaften. Das heißt, die Temperatur muss aus der thermischen Rechnung auf die magnetische Domäne übertragen werden, um die Materialeigenschaftsänderung lokal aufgelöst zu berücksichtigen. Gleichzeitig bewegt sich das Band während der Erwärmung gegenüber dem Induktor. Nun spielt zwar die Bewegungsgeschwindigkeit des Bandes keine Rolle für die Erzeugung von Wirbelströmen, aber die Wirbelströme sind im Band nicht örtlich konstant. Eine Variante, dies zu simulieren, wäre das Schieben des Bandes durch das Berechnungsgebiet. Dafür würde aber nicht nur ein sehr langes Band in der thermischen und elektromagnetischen Domäne benötigt, sondern der Mechanismus des Gleitens müsste auch noch in die magnetische Domäne integriert werden. Hier wurde eine effektivere Möglichkeit gewählt: Statt das Band zu bewegen, wird die Temperaturverteilung durch das Band bewegt. Dies geschieht durch Interpolieren der Anfangstemperaturen für einen folgenden Zeitschritt beim Neustart der transienten thermischen Analyse vor jedem Zeitschritt.

Wenn nun der thermische Zeitschritt durchgeführt wurde, müssen die Tempe-

raturen an das elektromagnetische Modell zurückgegeben werden, um die Materialeigenschaften temperaturabhängig zu berechnen. Der Veränderung der magnetischen Materialeigenschaften kommt eine besondere Bedeutung zu: elementweise werden die zur jeweiligen Temperatur passenden BH-Kurven per Skript den Elementen mitgeteilt. Um in der nachfolgenden elektrischen Periode den Aufwand für das Einschwingen zu vermeiden, wird auch hier mit dem Neustart gearbeitet. Der komplette Ablauf wird dann wiederholt, bis das gesamte System eingeschwungen ist.

Dünne Schichten sind notwendig

Für das Netz sind die Besonderheiten der Oberflächenselektivität zu berücksichtigen. Bild 2 zeigt eine typische Netzkonfiguration, die mittels sogenannter „Inflation Layer“ realisiert werden kann. Die sich ergebenden Stromdichten über die Materialdicke für kleine und große magnetische Feldstärken verdeutlichen, dass eine Anzahl dünner Schichten notwendig ist, um die Stromdichteverteilung ausreichend genau darzustellen.

Damit der Lösungsablauf einerseits nachvollziehbar und andererseits auch einem möglichst großen Anwenderkreis zugänglich wird, wurden alle erforderlichen Schritte mittels „Kommando-Schnipsel“ in ANSYS Workbench eingebracht. Dabei wird ausgenutzt, dass aus dem elektromagnetischen Analysesystem die Elementeigenschaften und Lasten mit Hilfe sogenannter Physics-Dateien in die transienten thermische Analyse übertragen werden kann. Hier lässt sich dann auch der komplette transiente Ablauf steuern. In Bild 3 wird die sich ergebende Temperaturverteilung dargestellt.

Info

Liste der verwendeten Verfahren und Hilfsmittel:

- nichtlineare transiente elektromagnetische Analyse
- zeitliche Mittelung der Wärmegenerationsrate
- Lastvektorkopplung für Joule'sche Wärme
- orts- und temperaturabhängige Konvektion
- transiente thermische Analyse mit Restart
- Kopie und Interpolation der Anfangstemperatur zur Bewegungssimulation
- BH-Kurve elementweise temperaturabhängig
- Elementschichtung von außen
- Physics-Konzept in der Workbench: Kopplung von Analysis Systems

Dieser Workflow dient uns als Standard für verschiedene Erwärmungsaufgaben mittels Wirbelströmen und ermöglicht, den kompletten Ablauf zu simulieren. Zusätzlich ergeben sich daraus Vorteile bezüglich der Optimierung mit Hilfe von Parameterstudien sowie erweiterter Einblicke in den gekoppelten Prozess, um das Verständnis zu vertiefen.

InfoAutor | CADFEM

Martin Hanke, CADFEM GmbH

InfoAnsprechpartner | CADFEM

Martin Hanke, CADFEM GmbH
Tel. +49 (0)30-4759 666-22
mhanke@cadfem.de

InfoVerwendeteSoftware

ANSYS Mechanical/EMAG

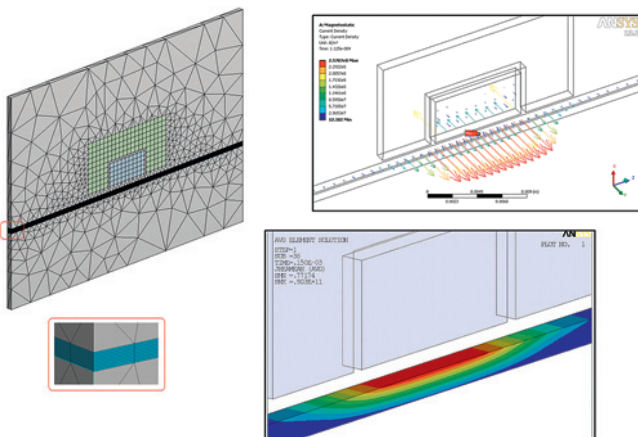


Bild 2: Für das Netz sind die Besonderheiten der Oberflächenselektivität zu berücksichtigen.

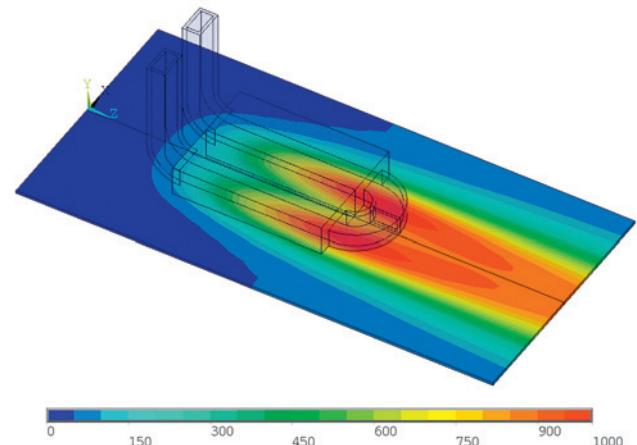


Bild 3: Beim Induktionshärten wird die dargestellte Temperaturverteilung durch Simulation ermittelt.