

Thermoinduktive Drahtinspektion für Oberflächenrisse

B. Oswald-Tranta,
G. Wally, P. O'Leary
Institut für Automation,
Montanuniversität Leoben, Österreich (A)

Zusammenfassung

Beim thermoinduktiven Prüfverfahren wird das Material kurzzeitig induktiv erwärmt und die Temperatur mit einer, im Infrarotbereich empfindlichen Kamera aufgenommen. Um die Oberflächenrisse herum entsteht ein Wärmestau, der eine inhomogene Temperaturverteilung verursacht, wodurch man die Position der Risse bestimmen kann.

Beim Ziehen von Stahldrähten können entlang des Drahtes lange (über 10 mm) aber seichte (0.1-0.5 mm) Oberflächenrisse entstehen. Experimente zeigen, dass auch solche seichten Längsfehler mit Hilfe der thermoinduktiven Methode gefunden werden können.

Um die Temperaturerhöhung um den Riss herum zu berechnen, wurden einerseits analytische Modelle aufgestellt und andererseits wurden auch Finite Elemente Simulationen eingesetzt. Die Modelle erlauben es, aus der Temperaturerhöhung die Risstiefe zu berechnen. Weiters helfen die Rechnungen ein tieferes Verständnis für den Prozess zu entwickeln wie auch die Parameter der Inspektion, wie Leistung, Dauer der Erwärmung, usw. zu optimieren. Die Ergebnisse der Simulationen und der analytischen Rechnungen stimmen sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Insbesondere lässt sich zeigen, dass diese Methode sehr gut geeignet ist, um seichte Risse nachzuweisen. Weiters kann sie auch benutzt werden, um die Risstiefe zu bestimmen.

Einführung

Beim Ziehen von Stahldrähten mit einem Durchmesser von 4.5-10mm können seichte Oberflächenrisse entstehen, die ab einer Tiefe von 0.1mm festgestellt werden müssen. Diese Fehler sind Längsrisse, d.h. sie haben eine Ausprägung entlang des Drahtes und sind oft mehrere cm lang. Die Detektion muss zuverlässig und in Echtzeit bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von bis zu 2m/s stattfinden.

Die klassische Methode der Wirbelstromprüfung liefert unsichere Ergebnisse für seichte und lange Oberflächenrisse. Deswegen wurde die thermoinduktive Methode auf ihre Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit für Stahldrähte untersucht. Bei dem thermoinduktiven Prüfverfahren läuft das Material durch eine Induktionsspule, siehe Bild 1. Durch den hochfrequent-induzierten Wirbelstrom wärmt sich die Oberfläche auf und die Temperaturverteilung wird mit einer Infrarot-Kamera aufgenommen. Inhomogenitäten, wie Risse an der Oberfläche, erzeugen eine inhomogene Erwärmung, die wiederum in den Infrarotaufnahmen sichtbar wird.

Das thermoinduktive Prüfverfahren kann für elektrisch leitende Materialien verwendet werden, um Fehler zu detektieren [1,2,3].

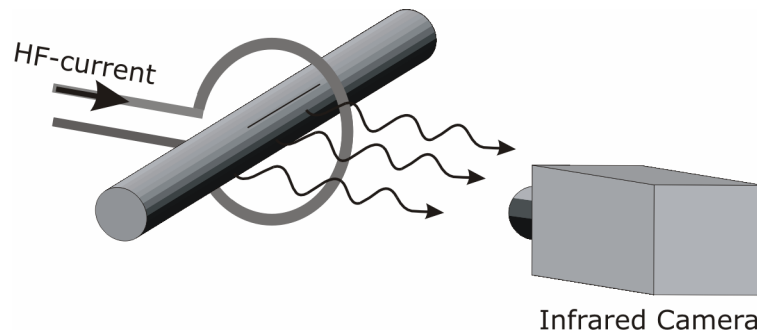


Bild 1: Schematische Darstellung der thermoinduktiven Prüfmethode.

Jedoch besonders gut geeignet hierfür sind magnetische Materialien, wie Stahl. Der hochfrequent-induzierte Wirbelstrom (200 kHz) fließt wegen des hohen Permeabilitätswertes nur in einer sehr dünnen Oberflächenschicht mit einer Tiefe von etwa 0.03 mm. Wenn die Tiefe eines Risses deutlich größer ist, als diese Eindringtiefe fließt der Strom „um den Riss herum“, siehe Bild 2. Dies erzeugt eine höhere lokale Stromdichte, welche eine höhere Temperatur verursacht.

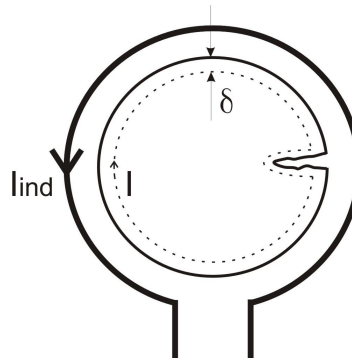


Bild 2: Der hochfrequent induzierte Wirbelstrom fließt um den Oberflächenriss herum.

Diese Technik wird etwa seit 20 Jahren standardmäßig in der Stahlindustrie mit der Therm-O-Matic-Prüfanlage [4] eingesetzt. Im Prüfstand werden Stahlstäbe und Knüppel mit einem Durchmesser von 35–150mm auf Längsrisse überprüft. Die gefundenen Fehler werden mit Farben markiert und nachträglich händisch oder mittels eines Roboters durch Schleifen entfernt.

Das Ziel unserer Arbeit war einerseits zu untersuchen, ob die thermoinduktive Methode für kleine Durchmesser eines Stahldrahtes von 4.5–10 mm verwendet werden kann. Andererseits, durch theoretische Untersuchungen abzuleiten, wie die zusätzliche Temperaturerhöhung um den Riss von der Tiefe abhängt. Zusätzlich waren mit Hilfe von Finite Elemente Simulationen und analytischer Modellrechnungen die Parameter der Inspektion, wie Leistung, Dauer der Erwärmung, usw. zu optimieren.

Experimentelle Ergebnisse

Thermoinduktive Messungen wurden im Laboraufbau in folgender Weise durchgeführt: der Stahldraht wurde in der Mitte einer Induktionsspule

platziert, siehe Bild 3. Hierbei wurden eine Heizleistung von etwa 1kW und eine Erregungsfrequenz von 200kHz verwendet. Die Leistung wurde für eine Zeitdauer von 0.1-0.5 s eingeschaltet. Die Infrarot-Kamera schaut zwischen den Windungen hindurch auf das erwärmte Drahtstück. Die Kamera ist extern getriggert, um genau am Ende der Heizperiode eine Aufnahme zu machen.

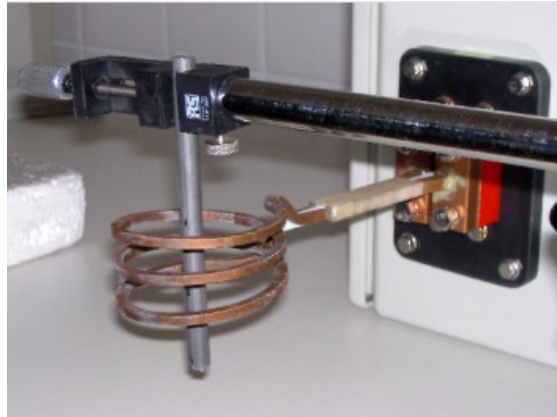


Bild 3: Experimenteller Aufbau im Laboratorium.

Bild 4a zeigt die Infrarotaufnahme eines Drahtstückes mit einem Durchmesser von 4.5 mm. Entlang des Drahtes befindet sich ein Längsriss mit einer Tiefe von 0.15mm, wobei diese Tiefe durch metallografische Querschnitt-Untersuchungen festgestellt wurde. Nach einer Heizperiode von 0.1 s wurde die Temperatur an der Drahtoberfläche um etwa 4.5 °C erhöht. Um den Riss herum kann man eine zusätzliche Temperaturerhöhung von 0.7°C feststellen. Um die genaue Position des Risses zu bestimmen, wurden einfache Bildverarbeitungsmethoden, wie gradientenbasierende Kantenfilter verwendet, siehe Bild 4b.

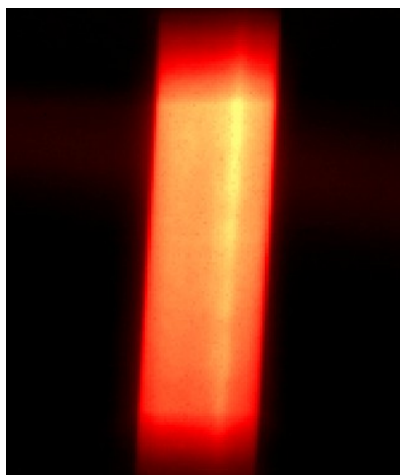


Bild 4a: Infrarot-Aufnahme eines Stahldrahtes mit einem Längsriss nach 0.1 s Heizung mit 1 kW Leistung.

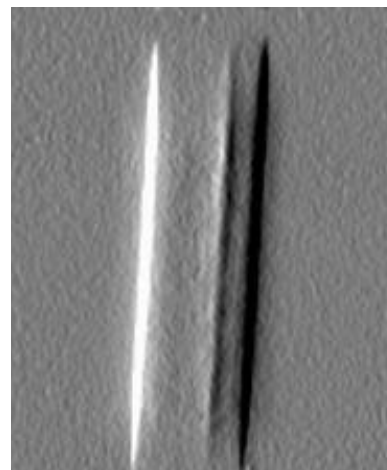


Bild 4b: x-Gradient Bild hergestellt von Bild 4a. Auf der rechten Seite des Drahtes kann man die Position des Risses eindeutig identifizieren.

Modellierung der thermoinduktiven Technik

Der induzierte Wirbelstrom klingt unter der Oberfläche exponentiell ab, dadurch dringt er bei hohen Frequenzen nur in eine dünne Schicht ein. Der Koeffizient der Exponentialfunktion wird als Eindringtiefe bezeichnet und hat bedeutend unterschiedliche Werte für magnetische (z.B. 0.03 mm bei 200kHz für Stahl mit einem relativ Permeabilitätswert von 600) und für nicht-magnetische Materialien (0.8mm bei der gleichen Frequenz). Die Joule-Wärme wird in der Oberflächenschicht generiert, jedoch wird sie aufgrund der thermischen Leitfähigkeit sofort in das Innere des Materials transportiert. Die Wärme dringt in erster Näherung in eine Tiefe ein, die durch den Koeffizienten der thermischen Diffusionslänge bestimmt wird. Z.B. im Stahl dringt die Wärme etwa 2mm innerhalb von 0.1 s ein, was bedeutend größer ist, als die Eindringtiefe des Wirbelstromes. Deswegen wird für magnetische Materialien und für nicht sehr dünne Werkstücke der Prozess durch die thermische Diffusion dominiert. Diese Tatsache erlaubt es, die Eindringtiefe des Wirbelstromes zu vernachlässigen und die Wärmezufuhr so zu modellieren, als ob sie direkt auf der Oberfläche entstehen würde.

Numerische Simulationen wurden mit dem Wärmetransport-Modul des Finite Element Simulators ANSYS durchgeführt. Dabei wurde der Oberflächenriss als ein sehr dünner Spalt geometrisch modelliert, siehe Bild 5a. Die Wärme wird einheitlich der gesamten Mantelfläche und auch den drei Seiten des Risses zugeführt. Bild 5b zeigt die berechnete Temperaturerhöhung, die in sehr guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten ist.

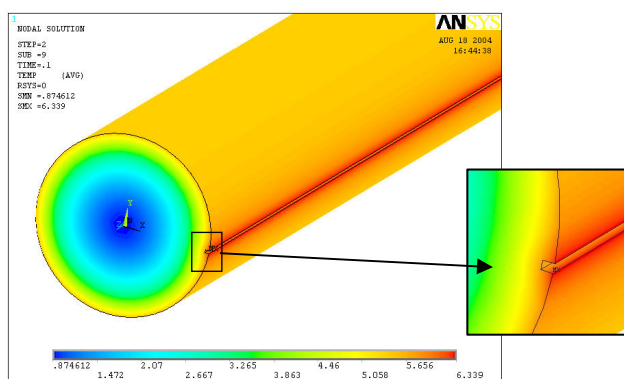


Bild 5a: Finite Element Model eines Drahtes mit einem Durchmesser von 4.5mm und mit einer Risstiefe von 0.1mm. Das Bild zeigt die Temperaturverteilung nach 0.1 s Erwärmung.

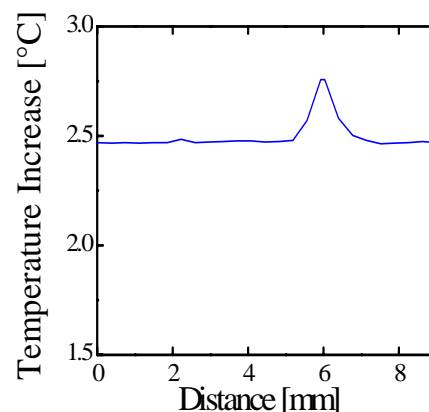


Bild 5b: Berechnete Erwärmung auf der Oberfläche. Die Rissposition ist eindeutig durch die Temperaturerhöhung erkennbar.

Das analytische Modell wurde mit den folgenden drei Schritten aufgebaut [5]:

1. Berechnung der Erwärmung an der Oberfläche eines idealen, rissfreien Werkstückes nach einem ideal kurzen Heizimpuls (sogenannte Dirac-Delta).

2. Berechnung der Erwärmung des rissfreien Werkstückes nach beliebiger Heizung.
3. Modellierung des Risses.

Der Oberflächenriss wird geometrisch als ein dünner Spalt modelliert, wobei zu jeder Seite des Spaltes eine Wärmezufuhr angenommen wird [6]. Dies ist durch die Tatsache begründet, dass der Wirbelstrom bei geringer Eindringtiefe um den Riss herumfließen muss und dadurch die Joule-Wärme auch an den Seiten des Risses auftritt. Bild 6a zeigt die, auf diese Weise berechnete Temperaturverteilung um Risse mit einer Tiefe von 0.1-1mm nach 0.1s Heizung. Bild 6b zeigt, wie die Temperaturerhöhung von der Risstiefe abhängt. Die Kurven wurden für verschieden lange Heizimpulse berechnet. Man kann erkennen, je tiefer ein Riss ist, desto höhere Temperaturen treten auf. Aber die Temperaturerhöhung ist nicht proportional zur Risstiefe, sondern sie sättigt bei einem Wert, welcher etwa der thermischen Diffusionslänge entspricht (etwa 2mm bei 0.1 s und 0.9mm bei 0.02 s Heizdauer).

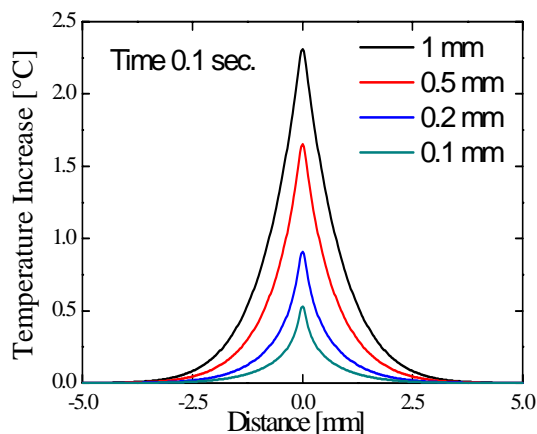


Bild 6a: Analytisch berechnete Temperaturerhöhung um Risse mit verschiedenen Tiefen.

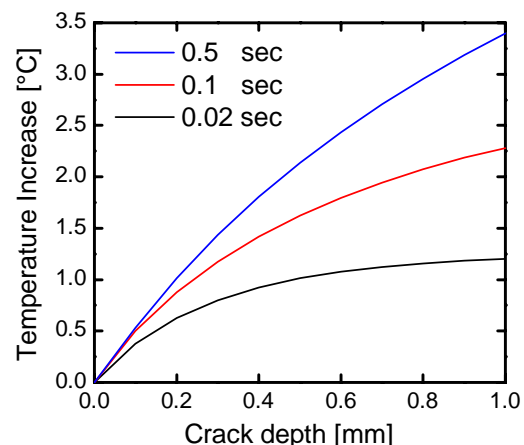


Bild 6b: Temperaturerhöhung abhängig von der Risstiefe für verschiedene Heizdauer.

Bild 6a macht einen zusätzlichen Vorteil der thermoinduktiven Methode sichtbar: Auch wenn der Riss nur eine Tiefe von 0.1mm hat, wird die Temperatur in einem Abstand von 4-5mm um den Riss herum an der Oberfläche erhöht. D.h., die Infrarot-Kamera muss keine sehr hohe örtliche Auflösung besitzen, um den Fehler „sehen“ zu können.

Einen thermischen Kontrast kann man mit dem Verhältnis zwischen dem nützlichen Signal (Temperaturerhöhung an der Risskante) und dem Hintergrundsignal (Erwärmung der rissfreien Oberfläche) definieren, siehe Insert in Bild 7. Mit Hilfe der Modellrechnungen kann man auch den thermischen Kontrast für verschiedene Risstiefen und Heizperioden berechnen, siehe Bild 7. Von den Kurven ist ablesbar, je kürzer die Heizperiode ist, desto höher wird der thermische Kontrast.

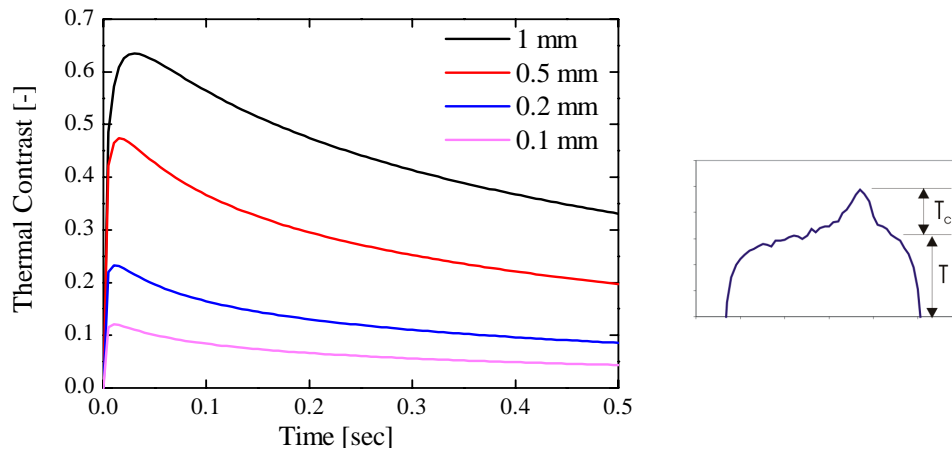


Bild 7: Thermischer Kontrast abhängig von der Heizdauer für verschiedene Risstiefen.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die thermoinduktive Technik für die Detektion von seichten Längsrissen in Stahldraht verwendet werden kann. Experimentelle Ergebnisse, analytische und numerische Rechnungen wurden ebenfalls präsentiert. Die Berechnungen beweisen, dass je tiefer der Riss ist, desto stärker ist die entstehende Temperaturerhöhung um den Riss herum. Dadurch ist die Methode ebenfalls geeignet, die Tiefe des Risses zu bestimmen und nicht nur die Position festzustellen.

Die Technik wurde erfolgreich in einem Drahtwerk getestet, wobei der Draht mit 1-2 m/s durch die Induktionsspule bewegt wurde.

Referenzen

1. G.Busse, "Verfahren zur phasenempfindlichen Darstellung eines effektmodulierten Gegenstandes", Patent No DE4203272, 1992.
2. J.Bamberg, G.Erbeck, G.Zenzinger, „EddyTherm: Ein Verfahren zur bildgebenden Rißprüfung metallischer Bauteile“ *ZfP-Zeitung* 68, p.60 – 62, 1999.
3. T.Sakagami,S.Kubo, "Development of a new crack identification method based on singular current field using differential thermography", *Proceedings of SPIE 3700* 369-376, 1999.
4. K.J.Kremer, W.Kaiser, P.Möller, "Das Therm-O-Matic-Verfahren - ein neuartiges Verfahren für die Online-prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler", *Stahl und Eisen* 105 S.39-44, 1985.
5. B. Oswald-Tranta, G.Wally, "Thermo-inductive investigations of steel wires for surface cracks", *ThermoSense XXVII*, Orlando, 2005.
6. B. Oswald-Tranta, "Thermoinductive Investigations of Magnetic Materials for Surface Cracks", *QIRT Journal Vol.1.*, p.33-46. 2004