

Inline-Prüfung von warmgewalzten Stahlknüppeln mittels Wärmeflussthermographie

Stefan KOCH *, Gerhard TRAXLER **

* Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG, Reutlingen

** PROFACTOR GmbH, Steyr-Gleink, Österreich

Kurzfassung. Seit mehr als 30 Jahren wird die induktive Thermographie für die Inline-Prüfung von warmgewalzten Stahlknüppeln industriell eingesetzt [1]. Dabei wird die Knüppeloberfläche zunächst im Durchlauf erwärmt und die resultierende Temperaturverteilung mit Hilfe von Zeilenkameras erfasst. Die gewonnenen Temperaturprofile werden anschließend auf lokale Temperaturüberhöhungen ausgewertet. In den meisten Fällen korrelieren die gefundenen ‚Hot Spots‘ mit Materialfehlern an der Oberfläche.

Heutzutage sind Matrixanordnungen von Infrarotdetektoren (FPA) Stand der Technik. Diese haben den Vorteil, dass jeder Bereich der Knüppeloberfläche im Durchlauf mehrfach erfasst werden kann. Je nach Prüfgeschwindigkeit, Bildwiederholrate und Größe des Gesichtsfelds der Kamera sind bis zu 30 Aufnahmen möglich.

Auf diese Weise lassen sich nicht nur vorhandene ‚Hot Spots‘ detektieren. Darüber hinaus kann das zeitliche Verhalten dieser Temperaturüberhöhungen nach der induktiven Erwärmung verfolgt und ausgewertet werden. Die zusätzlichen Informationen, die durch den einsetzenden Wärmefluss entstehen können genutzt werden, um echte Fehlersignale von Falschanzeigen zu trennen. Diese resultieren typischerweise aus der inhomogenen Verteilung des Emissionsgrades der Stahloberfläche sowie aus ungünstigen Prüfbedingungen, wie sie in der industriellen Umgebung typischerweise vorzufinden sind.

Mit dem Prüfsystem DEFECTOVISION IR wird erstmals das Verfahren der Wärmeflussthermographie für die Fehlerprüfung von warmgewalzten Stahlprodukten industriell eingesetzt. Diese moderne Technologie hat den großen Vorteil, dass falsche Anzeigen minimiert und somit der Anteil unnötiger Nacharbeit erfolgreich reduziert werden kann. Durch die Verbesserung des Nutz/Störabstands ist es möglich Risse ab einer Fehlertiefe von 0,3mm zu detektieren, wobei die minimale Fehlerlänge 10mm beträgt. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von bis zu 1,5 m/s arbeitet das System für ein automatisiertes Inspektionsgerät äußerst schnell. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass das System im Gegensatz zu klassischen Verfahren wie Wirbelstrom- und magnetischer Streuflussprüfung berührungsfrei arbeitet und nahezu jede Teilegeometrie geprüft werden kann.

Einführung

Bei der Herstellung von Stahlhalbzeugen ist das erzeugte Material sehr großen Kräften ausgesetzt. Dies sind thermische Belastungen beim Gießen und dem anschließenden Abkühlen wie auch mechanische Beanspruchungen beim Walzprozess. Insbesondere beim Walzen sorgen neue Produktionsverfahren dafür, dass der Stahl in immer kürzerer Zeit auf das Endmaß reduziert werden kann. Dabei entstehen oftmals Materialfehler, die aufgrund hoher Qualitätsanforderungen der weiterverarbeitenden Industrie bereits im Stahlwerk detektiert und entfernt werden müssen. In Abb. 1 sind Beispiele für Oberflächenrisse gezeigt.

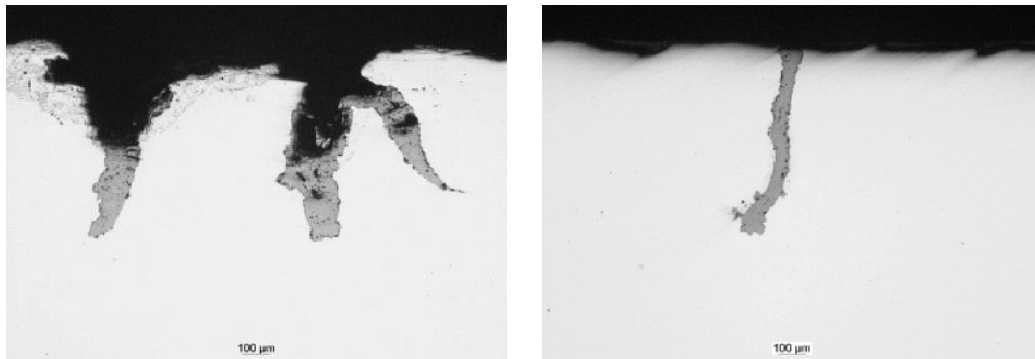


Abb. 1. Risse an einer Stahloberfläche. Zum Teil sind diese Risse mit Zunder gefüllt (grau).

Neben längsgerichteten Rissen gehören unter anderem auch Schalen, Überwalzungen, eingewalzter Zunder sowie Kantenaufbrüche zu den am meisten auftretenden Materialfehlern.

Die zerstörungsfreie Prüfung kennt eine Reihe von Verfahren wie Wirbelstrom, Streufluss und Magnetpulver, die zur Detektion von solchen Defekten grundsätzlich geeignet sind. Jedoch gibt es Einschränkungen in Hinsicht auf die Größe und Form der Prüflinge sowie aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit des Materials und der Automatisierbarkeit des Verfahrens.

Die induktive Thermographie hat demgegenüber die Vorteile, dass es sich um ein berührungsloses Verfahren handelt, das sich sehr gut für die Automatisierung bei hohen Geschwindigkeiten eignet und nahezu unabhängig von der Form der Prüflinge ist.

Wie bei anderen Technologien spielt nicht nur deren Prüfempfindlichkeit, sondern auch der erreichbare Nutz-/Störabstand zwischen den Anzeigen realer Materialfehlern und sogenannter Pseudofehler aufgrund von externen Störeinflüssen eine entscheidende Rolle.

Zu diesem Zweck wurde die induktive Thermographie um die Betrachtung des einsetzenden Wärmeflusses erweitert. Durch die Analyse des zeitlichen Verhaltens der Temperaturverläufe ist es möglich empfindlicher zu prüfen, während gleichzeitig die Anzahl von Pseudoanzeigen reduziert werden kann. Dies wiederum minimiert den Zeitaufwand für notwendige Reparaturen sowie den Verbrauch von Schleifmitteln.

Prüfaufbau

Um einen Stahlknüppel mittels der induktiven Wärmefluss thermographie zu prüfen durchläuft er folgende Prozedur (Abb. 2). In einem ersten Schritt wird die Oberfläche mit einem Wasserfilm fein benetzt, um deren Emissionsgrad ε zu homogenisieren und gleichzeitig auf einen hohen Wert zu bringen. In einem zweiten Schritt wird die Knüppeloberfläche beim Durchlaufen einer Induktionsspule erwärmt, die von großen Hochfrequenzströmen (100kHz bei bis zu 1000V) durchflossen wird. Auf der Knüppeloberfläche bilden sich innerhalb der Eindringtiefe von Bruchteilen von mm

Wirbelströme aus. Befinden sich Risse oder andere strukturelle Fehler an der Materialoberfläche wirken diese wie Hindernisse für die erzeugten Wirbelströme. Es ergeben sich dort höhere lokale Stromdichten und somit höhere Wärmeverluste als auf der fehlerfreien Stahloberfläche.

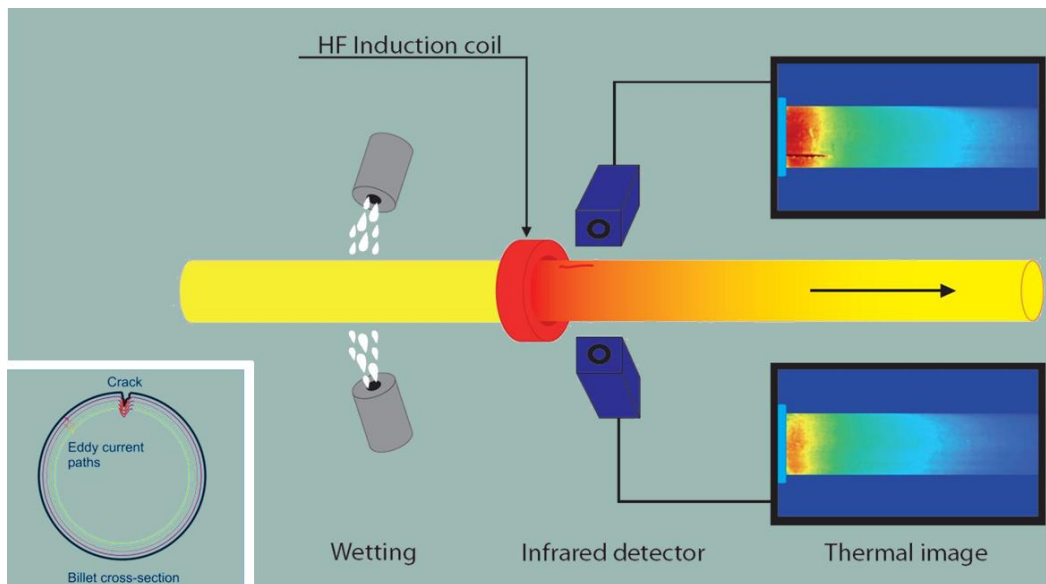


Abb. 2. Prinzipschaubild: Induktive Wärme-fluss-thermographie.

In einem dritten Schritt werden die resultierenden Temperaturverteilungen mit mehreren Hochgeschwindigkeits-Infrarotkameras erfasst. Spezielle Auswerteroutinen überprüfen die gewonnenen Daten auf Temperaturüberhöhungen, und ob deren zeitliches Verhalten mit einem Materialfehler korreliert. Detektierte Risse werden anschließend mit Hilfe einer Farbmarkiereinrichtung gekennzeichnet und die Stahlknüppel entsprechend der Fehlerklasse sortiert, um sie z.B. einem Reparaturprozess (Schleifen) zuzuführen.

Abb.3 zeigt die technische Realisierung des vorgestellten Prüfprinzips. Es sind insbesondere die Induktionsspule (rot) und eine der vier Infrarotkameras (unten rechts) zu erkennen.

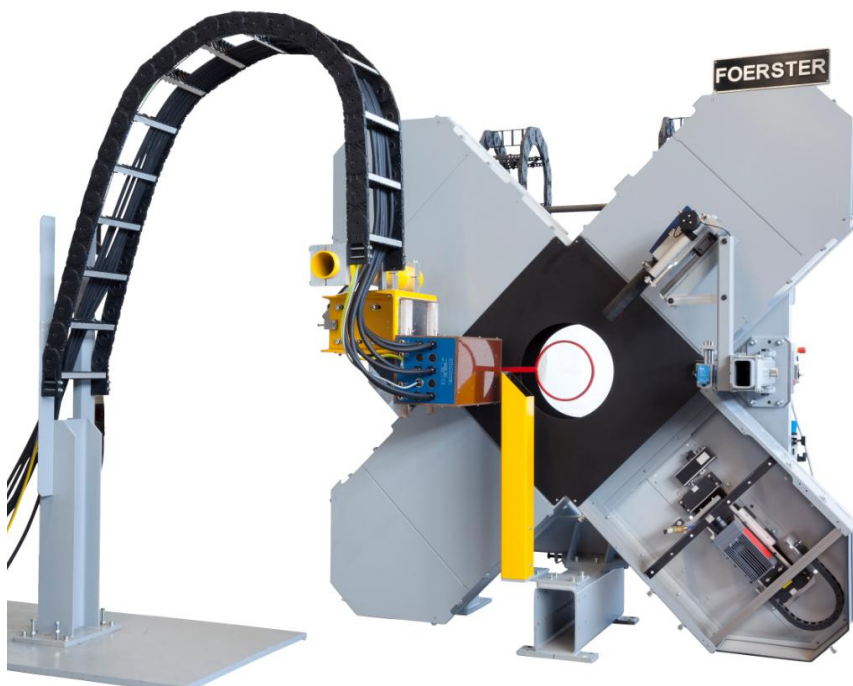


Abb. 3. Prüfaufbau DEFECTOVISION IR.

Wärmeﬂussthermographie

Die Auswertung, ob ein Riss vorhanden ist, erfolgt zunächst durch die Suche nach lokalen Auffälligkeiten im Temperaturprofil. Bei Überschreitung eines voreingestellten Schwellwerts klassifiziert das Auswertesystem diese Position als Teil eines Risses. In der Praxis treten jedoch durch Einfluss der Prüfumgebung oder durch variierende Oberﬂächeneigenschaften Signale auf, die große Ähnlichkeit mit echten Rissignalen haben. Die an sich meist sehr gute Sensitivität muss daher häufig reduziert werden, um das Auftreten von Pseudoanzeigen zu verhindern.

Ohne Verlust bei der Sensitivität können Risse mit der weiterentwickelten Auswertetechnik durch Miteinbeziehung des zeitlichen Aspektes, bzw. des Wärmeﬂusses erkannt werden. Im Wesentlichen erwärmen sich beim Durchlauf des Knüppels durch die Induktionsspule die Rissﬂanken. Bereits während der Erwärmung, aber insbesondere im Zuge der nachfolgenden Abkühlung breitet sich die Wärme im umgebenden Material aus, was an der Oberﬂächentemperatur abgelesen werden kann, wenn die zeitliche Historie Berücksichtigung findet (Abb. 4).

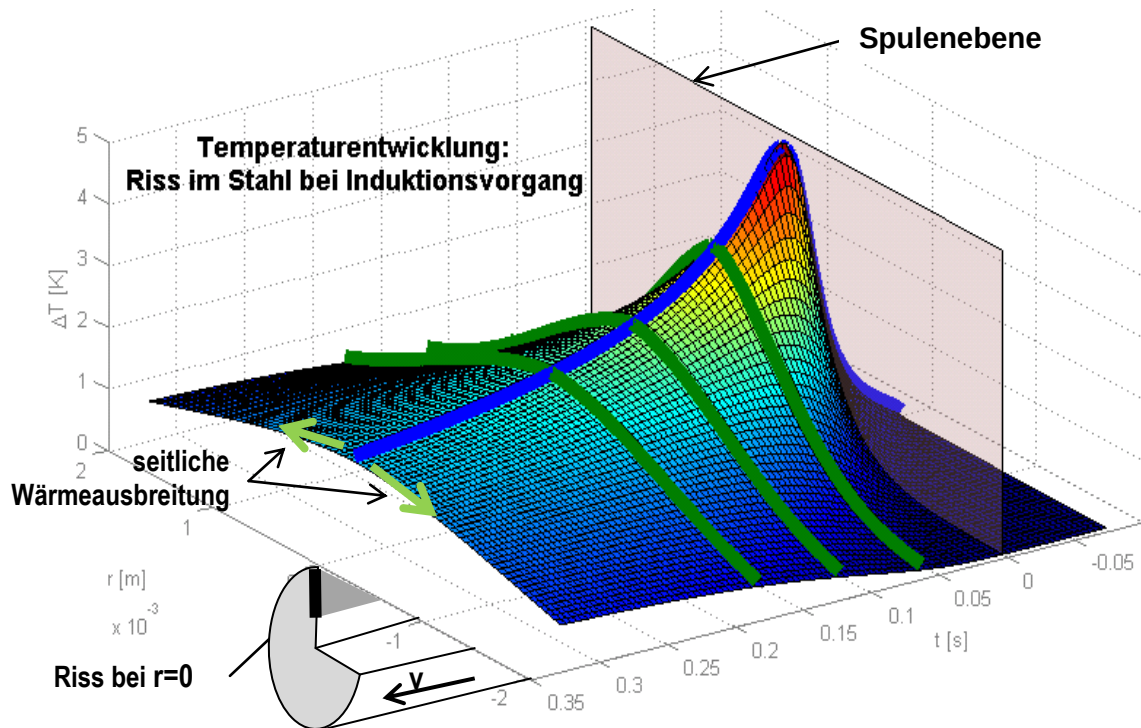


Abb. 4. Abkühlung eines Risses. Darstellung der räumlichen und zeitlichen Temperaturverteilung.

Vereinfacht dargestellt sucht die Auswertesoftware sich „bewegende“ Temperaturprofile, und trennt diese von stationären Auffälligkeiten, die zwingenderweise nicht durch Wärmeﬂussphänomene, sondern durch Störeinflüsse verursacht sind. Damit ist es gelungen, nicht nur oberﬂächenbedingte und umgebungsbedingte Störungen, sondern auch Kanteneffekte derart zu unterdrücken, dass eine robuste Risserkennung bei maximaler Sensitivität im praktischen Prüfbetrieb die Folge sind (Abb. 5).

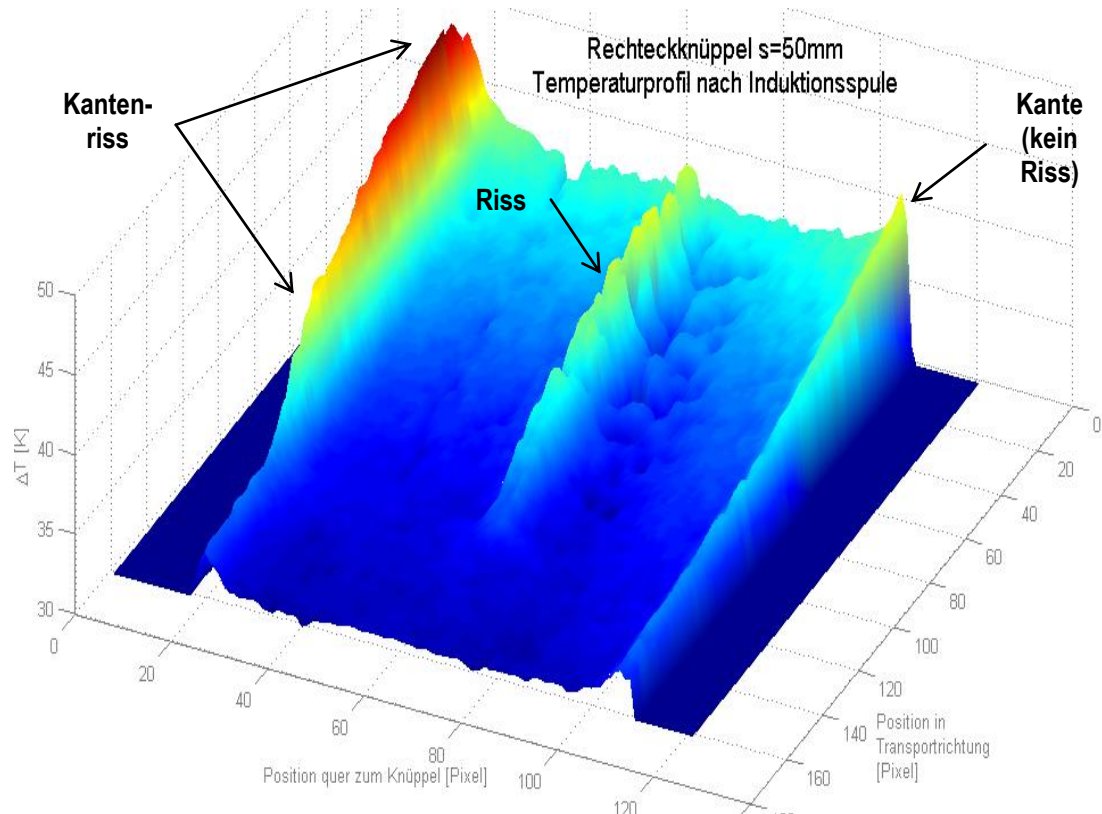


Abb. 5. Temperaturverteilung auf der Oberfläche eines Vierkantknüppels (50mm) mit scharfen Kanten. In der Kante links sowie in die Flächenmitte wurde jeweils ein Sägeschnitt eingebracht.

Bei Vierkantprofilen erwärmen sich die Kantenbereiche mehr als die restliche Oberfläche, was zu rissähnlichen lokalen Temperaturprofilen führt. Zur Darstellung der Stärke der Wärmeflussanwendung wurde die gleiche Aufnahme eines knapp 4m langen Vierkantknüppels mit 20 künstlich erzeugten Rissen mit Risstiefen von 1mm bis 0.2mm einmal mit, und einmal ohne Berücksichtigung des Wärmeflusses ausgewertet (Abb.6). Die Risspositionen sind bei den Umfangspositionen 0 und 25mm (je 10 Risse).

Im linken Bild (ohne Wärmeflussberücksichtigung) ist eine Vielzahl an Fehleranzeigen erkennbar, die durch den Kanteneffekt noch besonders verstärkt auftreten. Der Riss mit 0.2mm Tiefe wurde gar nicht erkannt (bei 25mm Umfangsposition und 3m Längsposition).

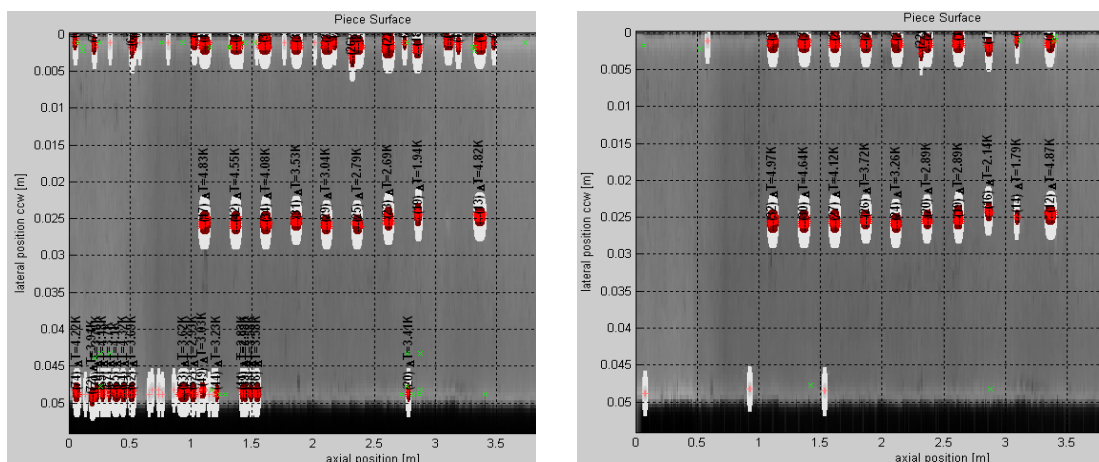


Abb. 6. Komprimierte Darstellung der Prüfergebnisse eines Stahlknüppels. Links: Resultate ohne Berücksichtigung des Wärmeflusses. Rechts: Resultate unter Berücksichtigung des Wärmeflusses.

Mit Wärmeflussberücksichtigung (rechtes Bild) wurden alle Scheinanzeigen eliminiert, und alle 20 Risse erkannt. Die 4 weißen Anzeigen sind einzelne Positionen, die zwar bereits ein Wärmeflussverhalten zeigen, aber aus geometrischen Gründen (zu kurz, Einzelpixel) nicht als Risse zu klassifizieren sind.

Zusammenfassung

Die induktive Thermographie ist bereits eine äußerst hilfreiche Technologie, um kleinste Risse und andere Materialfehler auf Stahlknüppeln zu detektieren. Es handelt sich dabei um ein bildgebendes Verfahren, dass kontaktlos und leicht zu automatisieren ist.

In diesem Manuskript wurde dargestellt, dass die Verlässlichkeit und Stabilität des Prüfverfahrens gesteigert werden, indem das zeitliche Verhalten der Temperatursignale mit betrachtet wird. Die Prüfempfindlichkeit kann erhöht, die Anzahl falscher Anzeigen kann reduziert werden.

Die Wärmefluss thermographie liefert somit die Möglichkeit den Endanwender dahingehend zu unterstützen, seine Ressourcen an Zeit und Material effizient einzusetzen.

Referenzen

[1] M. Storset, 'THERM-O-MATIC Billet inspection system', SCANCONDITIONING, 1st International Conference on Surface Conditioning and Detection of Surface Defects, Proceedings, pp 2:1-2:24, June 1984