

Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

Rissdetektion mittels akustischer Emission an höchstfesten Stahldrähten

vorgelegt von

Mathias Lorenz M. Eng.

Einleitung und Motivation

Obwohl eine Schraubenfeder auf den ersten Blick als ein einfaches Bauelement erscheint – im Grunde ein ‚geschickt‘ gewickelter Draht –, erfüllt diese die Aufgabe, mechanische Energie zu speichern oder ggf. auch eine spezifische Vorspannkraft zu erzeugen. Die einfache Bauweise und der vergleichsweise niedrige Preis verleiten dazu, die Feder als untergeordnetes Bauteil anzusehen. Tatsächlich gibt es nur wenige Konstruktionselemente, die hochzyklisch beansprucht werden, z. B. Ventildedern in Motoren, und gleichzeitig hohe Anforderungen hinsichtlich der Oberflächen- und Werkstoffqualität aufweisen. Aus wirtschaftlicher Sicht steht der niedrige Preis der Feder im Kontrast zu den hohen Folgekosten, die der Bruch einer Feder häufig nach sich zieht, durch den es zum Versagen der Funktion oder zur Zerstörung des ganzen Aggregats kommen kann. Somit hat die Detektion der Risse eine hohe Priorität.

Technische Federn werden in einer Vielzahl von Industrieanwendungen eingesetzt, beispielsweise als Ventildedern im Motor, als Achsfedern in Nutz- und Personenkraftfahrzeugen sowie als Schenkelfedern an landwirtschaftlich genutzten Maschinen bzw. Fahrzeugen. Die verwendeten Stähle gehören zu den höchstfesten Stählen (Zugfestigkeiten über $R_m = 2000$ MPa) und sind hochgradig auf die jeweilige Anwendung spezialisiert. Die Herstellung der Federn aus Federstahldraht erfolgt in den meisten Fällen in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Diese Unternehmen bestellen die Federstahldrähte nach DIN EN 10270, Teil 1 bis 3 sowie teilweise nach firmeninternen Spezifikationen bei Stahl- bzw. Drahtherstellern oder Drahthändlern. Bisher wird keine zerstörungsfreie Inline-Überwachung der einzelnen Fertigungsschritte in der Federnproduktion hinsichtlich der Rissbildung durchgeführt. Es gibt hierzu keine technisch sowie wirtschaftlich sinnvolle Lösung.

Beispielsweise werden Druckfedern für die Anwendung im Bahnbereich nach dem Winden und Setzen und vor dem Kugelstrahlen zu 100 % mittels Magnetpulverprüfung (Fluxen) zerstörungsfrei geprüft. Hierbei kann nicht jeder Riss detektiert werden – innenliegende Risse werden z. B. nicht erkannt. Außerdem erfolgt die Prüfung unter einem hohen zeitlichen Aufwand und nach Abschluss des kritischen Herstellungsprozesses. Oftmals wird eine Qualitätskontrolle bei

besonders kritischen Federn innerhalb einer Federgruppe durchgeführt, beispielsweise bei Federn mit hohen Drahtfestigkeiten oder kleinem Windeverhältnis bei großen Drahtdurchmessern. Diese Federn werden nach der Herstellung je nach Kundenanforderung im Schwingversuch (mit relativ geringen Frequenzen, max. 10 Hz) geprüft und müssen bei vorgegebener Beanspruchungsamplitude bestimmte Lastwechsel erreichen. Ist dies gegeben, wird davon ausgegangen, dass unkritischere Federn als in Ordnung bewertet werden können. Damit liegt der Nachteil dieser Vorgehensweise auf der Hand: Sie ist zerstörend, zeitaufwendig und kostenintensiv, zudem ist keine Inline-Überwachung der Prozesse denkbar.

Zielstellung

In der Literatur wird auf das Potenzial der akustischen Emissionstechnik zur Unterscheidung von mikrofraktographischem Risswachstumsverhalten aufgrund der Abhängigkeit und des Einflusses auf die Ausprägung des risstypischen akustischen Signals hingewiesen. Diese Arbeitshypothese soll im Rahmen der Arbeit zur industriellen Serienfertigung von Federn durch statistisch geplante Laborversuche mit unterschiedlichen Einflussparametern untermauert werden. Das akustische Emissionsverfahren ist für die Rissentstehungsdetektion in Werkstoffen während der Umformung des Drahts zu Federn generell geeignet; die Zugfestigkeitswerte der zu untersuchenden Werkstoffe für die Federherstellung liegen weit über dem laut Literatur bestimmten Grenzwert von 550 MPa. Für die Überführung der Technik in die industrielle Anwendung zur Rissdetektion beim Federwinden höchstfester Stähle ist es zielführend die Einflussfaktoren in Bezug auf das akustische Signal und für die zu entwickelnde Messstrategie zu identifizieren, um somit eine automatisierte In-situ-Rissdetektion zu ermöglichen. Die Einflussfaktoren werden durch das Material oder den Prozess bestimmt. Ein weiteres Ziel bei der Entwicklung geeigneter Analyseketten in der anlagenspezifischen Software ist die Detektion und die eindeutige Zuordnung der akustischen Signale zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen.

Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse sowie Erkenntnisse dieser Arbeit werden nachfolgend zusammengefasst:

1. Die detektierten akustischen Emissionssignale mit unterschiedlichen Amplituden können Mikro- und Makrorissen zugeordnet werden.
2. Es wurde innerhalb der umfangreichen labortechnischen Untersuchungen am VDSiCr Draht- und Federmaterial sowie durch die Analyse der Ergebnisse gezeigt, dass Schmelz-

und Materialcharge, Drahtdurchmesser, Beanspruchungsart und -geschwindigkeit keinen Einfluss auf das risstypische akustische Signal haben.

3. Es wurde gezeigt, dass unter einer Ähnlichkeitsbetrachtung von 65 % die risstypischen akustischen Signale für die unterschiedlichen Materialien in der Mustererkennung gleich sind.
4. Die labortechnischen Ergebnisse haben gezeigt, dass die AE-Technik für die Überwachung im Schwingversuch mit einer Feder prinzipiell geeignet ist.
5. Die akustische Emissionsanalytik zur In-situ-Rissdetektion wurde wiederholt an einer Windemaschine unter realen Bedingungen implementiert.
6. Die Übertragung der Erkenntnisse und Implementierung der akustischen Emissionstechnik in den industriellen Einsatz an einer Windemaschine, wurde durch die Detektion von Mikrorissen und korrelativen Analysen aufgezeigt.
7. Der kleinste Riss während der Industrierversuche, der durch die Rasterelektronenmikroskopisch bestätigt wurde, hat eine Länge von 20 μm mit einer Rissöffnung von ca. 0,5 μm .
8. Es wurde gezeigt, dass die akustische Emissionsanalytik zur Untersuchung von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen/Brucharten eingesetzt werden kann und eine Unterscheidung mittels der Mustererkennung bei in situ Anwendungen zwischen interkristallinem Spaltbruch – bei wasserstoffinduzierter Rissbildung –, und transkristallinem duktilen Wabenbruch möglich ist.