



(10) **DE 10 2021 106 829 A1** 2022.09.22

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2021 106 829.0**

(22) Anmeldetag: **19.03.2021**

(43) Offenlegungstag: **22.09.2022**

(51) Int Cl.: **G01M 7/02 (2006.01)**

C23C 4/12 (2016.01)

(71) Anmelder:

**Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft,
80809 München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2019 / 0 061 058	A1
US	2019 / 0 234 908	A1

(72) Erfinder:

**Hoevelmeyer, Andre, 84028 Landshut, DE;
Anasenzl, Manuel, 84048 Mainburg, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Überwachen thermisch gestützter Schichten**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Überwachen thermisch gespritzter Schichten, umfassend die Schritte:

- Beschichten eines Bauteils, insbesondere mittels eines thermischen Beschichtungsverfahrens;
- Erfassen von Schwingungen, welche beim Beschichten des Bauteils entstehen, zum Erzeugen eines Schwingungssignals;
- Auswerten des Schwingungssignals zum Erkennen von Schäden der Beschichtung.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prozesskontrolle oder Prozessüberwachung, insbesondere zum Überwachen thermisch gespritzter Schichten bzw. deren Qualität sowie eine Verwendung des Verfahrens beim Beschichten von Bauteilen.

[0002] Bei Beschichtungsprozessen, wie beispielsweise beim thermischen Spritzen, kann es in der erzeugten Schicht aufgrund von beispielsweise Spannungen innerhalb der Schicht zu Rissen kommen. Diese beeinflussen die Qualität der Beschichtung negativ bzw. können in nachgelagerten Prozessschritten zu Problemen führen. Oftmals sind derartige Risse so klein, dass sie nicht ohne weiteres detektiert werden können.

[0003] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Prozessüberwachung bzw. zum Überwachen thermisch gespritzter Schichten sowie eine Verwendung anzugeben, welche ermöglichen die Bauteil- bzw. Prozessqualität zu erhöhen.

[0004] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie durch eine Verwendung gemäß Anspruch 11 gelöst. Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus den Unteransprüchen sowie der Beschreibung.

[0005] Erfindungsgemäß umfasst ein Verfahren zum Überwachen thermisch gespritzter Schichten die Schritte:

- Beschichten eines Bauteils, insbesondere mittels eines thermischen Beschichtungsverfahrens;
- Erfassen von Schwingungen, welche beim Beschichten des Bauteils entstehen, zum Erzeugen eines Schwingungssignals;
- Auswerten des Schwingungssignals zum Erkennen eines Schadens an oder der Beschichtung.

[0006] Beim Beschichten wird ein formloser Stoff auf die Oberfläche des Bauteils zum Aufbringen einer festhaftenden Schicht aufgebracht. Beschichtungsverfahren können nach dem Ausgangszustand des Beschichtungsmaterials - gasförmig, flüssig, gelöst oder fest - unterschieden werden. Das erfindungsgemäße Verfahren ist nicht auf ein bestimmtes Beschichtungsverfahren festgelegt. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform handelt es sich bei dem Beschichten allerdings um ein thermisches Beschichtungs-/Spritzverfahren. Als besonders bevorzugtes Verfahren ist hierbei das Kaltgasspritzen zu nennen. Bei dem in Rede stehenden Bauteil handelt es sich gemäß einer bevorzugten Ausfüh-

rungsform um ein Gussbauteil, insbesondere um ein Gussbauteil aus einem Leichtmetall, wie insbesondere Aluminium. Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das Bauteil ein Druckgussbauteil, welches, zumindest bereichsweise oder lokal, mit einer Funktionsschicht, bevorzugt erzeugt mittels Kaltgasspritzen, beschichtet wird. Mit Vorteil wird vorliegende der Umstand ausgenutzt, dass Materialreaktionen Geräusche verursachen, welche aufgezeichnet und ausgewertet werden können. Diese Geräusche werden zweckmäßigerweise vorliegend genutzt, etwaige Schäden in der Beschichtung erkennen zu können. Hierbei wird zweckmäßigerweise parallel zum Beschichten bzw. während des Beschichtungsprozesses das Schwingungssignal messtechnisch erfasst. Zweckmäßigerweise ist hierzu am Bauteil zumindest ein Sensor, insbesondere ein Beschleunigungssensor, angeordnet, um den Körperschall zu detektieren.

[0007] Zweckmäßigerweise geht das Erfassen der Schwingungen zeitlich über die Dauer des Beschichtens hinaus. Mit anderen Worten erfolgt die Aufzeichnung des Schwingungssignals auch noch nach dem Ende des eigentlichen Beschichtungs Vorgangs. Damit kann sichergestellt werden, dass Fehler bzw. Schäden sicher erkannt werden können. So entstehen beispielsweise Spannungen, die zu Rissen in der Schicht führen, ggf. erst beim Abkühlen der Schicht, also nach einem gewissen Zeitversatz.

[0008] Gemäß einer Ausführungsform umfasst das Verfahren den Schritt:

- Verwenden der Streuung des Schwingungssignals zum Bewerten, ob ein Schaden vorliegt.

[0009] Es hat sich gezeigt, dass eine Auswertung von Peak- oder Spitzenamplituden des Schwingungssignals nicht zielführend ist, da eine einfache Schwellwertdefinition zur Interpretation von Schäden, wie Spannungsrissen, auf dieser Grundlage nicht möglich ist. So kann eine Amplitude bei einem Bauteil einen Riss andeuten, bei einem anderen Bauteil aber lediglich den normalen Beschichtungs Vorgang charakterisieren. Es hat sich allerdings überraschend gezeigt, dass über eine Auswertung der Streuung des Schwingungssignals bauteilunabhängig ein allgemeingültiger Ansatz auf Basis der Streuung des Schwingungssignals zu sehr guten Ergebnissen führt. Mit anderen Worten kann auf Basis der Streuung des Schwingungssignals mit sehr guter Wahrscheinlichkeit detektiert werden, ob ein Bauteil einen Schaden, wie beispielsweise einen (Spannungs-)Riss, aufweist oder nicht.

[0010] Gemäß einer Ausführungsform umfasst das Verfahren den Schritt:

- Verwenden der Standardabweichung zum Erkennen eines Schadens bzw. von Schäden.

[0011] Die Standardabweichung ist ein Streuungsmaß und beschreibt die durchschnittliche Abweichung aller gemessenen Werte oder Signale vom Mittelwert. Mit anderen Worten beschreibt sie ein Intervall um den Mittelwert und gibt die Streubreite an.

[0012] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren die Schritte:

- Berechnen der Standardabweichung σ ;
- Verwenden der Standardabweichung σ zum Erzeugen eines Toleranzbandes;
- Aufsummieren der Signale, die außerhalb des Toleranzbands liegen;
- Vergleich der Summe mit einem Vergleichswert zum Erkennen eines Schadens.

[0013] Zweckmäßigerweise wird in einem ersten Schritt die Standardabweichung der aufgezeichneten Daten bestimmt. Im Anschluss hieran wird ein Grenzwert bzw. Toleranzband festgelegt. Die Anzahl der Signale, die außerhalb dieses Toleranzbandes liegen, werden aufsummiert. Überraschend wurde festgestellt, dass ab einer gewissen Anzahl von Signalen, die außerhalb des Toleranzbandes liegen, mit großer Wahrscheinlichkeit auf das Vorliegen eines Schadens rückgeschlossen werden kann.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform liegt das Toleranzband zumindest bei $\pm 2 \sigma$. Gemäß bevorzugter Ausführungsformen kann das Toleranzband auch bei $\pm 3 \sigma$, $\pm 4 \sigma$, $\pm 5 \sigma$ oder $\pm 6 \sigma$ etc. liegen.

[0015] Zweckmäßigerweise liegt der Vergleichswert zumindest bei etwa 200. Liegen also mehr als 200 Signale außerhalb des vorgenannten Toleranzbandes, kann mit großer Wahrscheinlichkeit darauf geschlossen werden, dass die Beschichtung zumindest einen Riss oder dergleichen aufweist. Die tatsächliche Größe des Vergleichswerts kann darunter oder typischerweise auch darüber liegen, beispielsweise im Bereich von 300, 400, 500, 600, 700 oder auch höher.

[0016] Gemäß einer alternativen Ausführungsform des Verfahrens umfasst dieses die Schritte:

- Zerlegen des Schwingungssignals in Zeitabschnitte;
- Berechnen der Signalenergie für jeden Zeitabschnitt;
- Normierung der Energiewerte;
- Bestimmen des Variationskoeffizienten;
- Vergleichen des Variationskoeffizienten mit einem Schwellwert zum Erkennen eines Schadens.

[0017] Der Variationskoeffizient bezeichnet das Verhältnis von Standardabweichung zum Mittelwert/Erwartungswert. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform beträgt ein Zeitabschnitt eine Millisekunde. Längere und kürzere Zeitabschnitte sind, insbesondere in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz des Signals, ebenfalls möglich und zielführend. Für die Bewertung des Variationskoeffizienten wird also zweckmäßigerweise die Signalenergie über einen Zeitraum von einer Millisekunde gebildet und im Anschluss normiert. Weiter im Anschluss hieran werden die Standardabweichung σ und der arithmetische Mittelwert x_{quer} für die jeweiligen Energiewerte gebildet. Darüber lässt sich der Variationskoeffizient VarK bestimmen.

Variationskoeffizient $\text{VarK} = \sigma / x_{\text{quer}}$.

[0018] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform liegt der Schwellwert bei etwa 0,4, besonders bevorzugt bei 0,39. Es konnte gezeigt werden, dass mit diesem Schwellwert mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden kann, ob ein oder mehrere Schäden in der Beschichtung vorliegen. Ist der Variationskoeffizient also größer als der Schwellwert, kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein Schaden vorliegt.

[0019] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren den Schritt:

- Aufzeichnen der Schwingungen mit einer Abtastfrequenz von 2 MHz.

[0020] Diese Abtastfrequenz hat sich vorliegend als besonders zielführend erwiesen.

[0021] Weiter betrifft die Erfindung die Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens beim Beschichten von Bauteilen, insbesondere beim thermischen Beschichten. Zweckmäßigerweise wird das Verfahren parallel zum Beschichtungsprozess durchgeführt, wodurch die Beschichtungsqualität zuverlässig überwacht werden kann.

[0022] Gemäß einer Ausführungsform erfolgt eine örtliche Korrelation zwischen dem Erfassen der Schwingungen und dem Schichtauftrag, um zweckmäßigerweise nicht nur zu detektieren, ob überhaupt ein Schaden vorliegt, sondern nach Möglichkeit auch den Ort bzw. die Stelle dieses Schadens (bzw. mehrerer) angeben zu können.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Überwachen thermisch gespritzter Schichten, umfassend die Schritte:
 - Beschichten eines Bauteils, insbesondere mittels eines thermischen Beschichtungsverfahrens;
 - Erfassen von Schwingungen, welche beim Beschichten des Bauteils entstehen, zum Erzeugen

eines Schwingungssignals;
 - Auswerten des Schwingungssignals zum Erkennen eines Schaden an oder der Beschichtung.

Bauteilen, insbesondere beim thermischen Beschichten.

Es folgen keine Zeichnungen

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Erfassen der Schwingungen zeitlich über die Dauer des Beschichtens hinausgeht.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, umfassend den Schritt:

- Verwenden der Streuung des Schwingungssignals um einen Mittelwert zum Bewerten, ob ein Schaden vorliegt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend den Schritt:

- Verwenden der Standardabweichung zum Erkennen eines Schadens.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend die Schritte:

- Berechnen der Standardabweichung σ ;
 - Verwenden der Standardabweichung σ zum Erzeugen eines Toleranzbandes;
 - Aufsummieren der Signale, die außerhalb des Toleranzbands liegen;
 - Vergleich der Summe mit einem Vergleichswert zum Erkennen eines Schadens.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei das Toleranzband zumindest $\pm 2 \sigma$ beträgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 5-6, wobei der Vergleichswert zumindest etwa 200 beträgt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-4, umfassend die Schritte:

- Zerlegen des Schwingungssignals in Zeitabschnitte;
 - Berechnen der Signalenergie für jeden Zeitabschnitt;
 - Normierung der Energiewerte;
 - Bestimmen des Variationskoeffizienten;
 - Vergleichen des Variationskoeffizienten mit einem Schwellwert zum Erkennen eines Schadens.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei der Schwellwert etwa 0,4 beträgt.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend den Schritt:

- Aufzeichnen der Schwingungen mit einer Abtastfrequenz von 2 MHz.

11. Verwenden eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche beim Beschichten von