

(12) Wirtschaftspatent

(11) DD 270 450 C2



Korrigiert gemäß § 23 Absatz 2 der Anordnung
über die Verfahren vor dem Patentamt
beim Rechtsschutz für Erfindungen
in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

4(51) G 01 N 23/20

DEUTSCHES PATENTAMT

(21) DD G 01 N / 295 087 2

(22) 08.10.86

(45) 24.10.90

(45) 02.08.89

(71) Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, PSF 408, Karl-Marx-Stadt, 9010, DD

(72) Kämpfe, Bernd, Dr. sc. techn.; Hübner, Wolfgang, Dr. rer. nat.; Schürer, Klaus, Dipl.-Ing.; Zenker, Rolf, Dr.-Ing., DD

(54) Verfahren zur röntgenographischen Bestimmung von Scherspannungen

(55) Röntgendiffraktion; Scherspannungsbestimmung; Beugung; Röntgenstrahl; Kristallgitterebene; Reflexionswinkel

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Scherspannungen, insbesondere in oberflächennahen Bereichen von Prüflingen aus kristallinen Werkstoffen, unter Verwendung der Röntgendiffraktion, wobei ein Röntgenstrahl durch einem bestimmten Kippwinkel zugeordnete Kristallgitterebenen des Prüflings gebeugt und der abgebeugte Sekundärstrahl zur Ermittlung des Reflexionswinkels aufgefangen wird. Die Erfindung ist vorrangig anwendbar zur Scherspannungsbestimmung in metallischen Prüflingen nach spanender oder spanloser Formgebung, erosiv-korrosiver Beanspruchung oder Elektronen- bzw. Plasmastrahlbehandlung. Gemäß der Erfindung wird bei unverändertem Kippwinkel der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel zunächst bei mindestens zwei Drehwinkeln, so dann bei zu diesen um 180° veränderten Drehwinkeln gemessen und daraus die Differenz der Kristallgitterdehnungen in Richtung beider komplementärer Drehwinkel ermittelt, woraus die Scherspannungskomponenten bestimmbar sind.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Bestimmung von Scherspannungen, insbesondere in oberflächennahen Bereichen von Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, unter Verwendung der Röntgendiffraktion, wobei ein Röntgenstrahl durch einem bestimmten Kippwinkel zugeordnete Kristallgitterebenen des Prüflings gebeugt und der abgebeugte Sekundärstrahl zur Ermittlung des Reflexionswinkels aufgefangen wird, unter Verwendung verschiedener Drehwinkel, welche die Lage des Prüflings zur von Röntgen- und Sekundärstrahl aufgespannten Ebene bestimmen, **dadurch gekennzeichnet**, daß bei konstantem Kippwinkel (ψ) der einer Art ($h; k; l$) von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel ($\vartheta_{11}; \vartheta_{21}$) bei einem Anfangs-Drehwinkel (φ_{11}) und bei einem zu diesem um 180° geänderten Komplementär-Drehwinkel (φ_{21}) vermessen wird, anschließend dieser Meßzyklus mindestens einmal bei einem veränderten Anfangs-Drehwinkel (φ_{12}) wiederholt wird, nunmehr die Differenz ($\Delta\epsilon_1$) zwischen den Kristallgitterdehnungen in der ersten Meßstellung, die durch den Anfangs-Drehwinkel (φ_{11}), und der zweiten Meßstellung, die durch den Komplementär-Drehwinkel (φ_{21}) definiert sind, bestimmt wird, und weiterhin die Differenz ($\Delta\epsilon_2$) zwischen den Kristallgitterdehnungen in der dritten Meßstellung, die durch den veränderten Anfangs-Drehwinkel (φ_{12}), und der vierten Meßstellung, die durch den zugehörigen Komplementär-Drehwinkel (φ_{22}) definiert sind, bestimmt wird, und abschließend die Scherspannungskomponenten in den Meßrichtungen, die durch die erste und zweite sowie die dritte und vierte Meßstellung definiert sind, aus der Proportionalität zwischen den ermittelten Differenzen ($\Delta\epsilon_1; \Delta\epsilon_2$) der Kristallgitterdehnungen und den Scherspannungen nach an sich bekannten Verfahren der linearen Elastizitätstheorie bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Ermittlung der Differenz ($\Delta\epsilon$) der Kristallgitterdehnungen der Reflexionswinkel (ϑ_0) des spannungsfreien Zustandes durch den Mittelwert ($\bar{\vartheta}$) der den Drehwinkeln ($\varphi_{11}; \varphi_{21}$) zugeordneten Reflexionswinkel ($\vartheta_{11}; \vartheta_{21}$) ersetzt wird.

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Scherspannungen, insbesondere in oberflächennahen Bereichen von Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, unter Verwendung der Röntgendiffraktion, wobei ein Röntgenstrahl durch einem bestimmten Kippwinkel zugeordnete Kristallgitterebenen des Prüflings gebeugt und der abgebeugte Sekundärstrahl zur Ermittlung des Reflexionswinkels aufgefangen wird, mit unterschiedlicher Einstellung des Drehwinkels, der die Lage des Prüflings zur von Röntgen- und Sekundärstrahl aufgespannten Ebene bestimmt.

Die Erfindung ist vorrangig anwendbar zur Bestimmung von in oberflächennahen Bereichen von metallischen Prüflingen auftretenden Scherspannungen nach spanender oder spanloser Formgebung, erosiv-korrosiver Beanspruchung oder Elektronenstrahl- bzw. Plasmastrahlbehandlung.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Es ist bekannt, parallel zur Oberfläche eines Prüflings auftretende Scherspannungen mit Hilfe der Röntgendiffraktion zu bestimmen. Gemäß H. Dölle und V. Hauk „Röntgenografische Spannungsermittlung für Eigenspannungssysteme allgemeiner Orientierung“, HTM 31 (1976) 3, S. 165–168, ist dies im Rahmen der Bestimmung des vollständigen Spannungstensors möglich. Dazu ist die Durchführung von wenigstens sechs Messungen mit unterschiedlichen Einstellungen des Dreh- und des Kippwinkels erforderlich.

Es ist weiterhin bekannt (V. Hauk und G. Vaessen „Auswertung nichtlinearer Gitterdehnungsverteilungen“, HTM-Beiheft 1982, S. 38–48), eine Scherspannungskomponente parallel zur Prüflingsoberfläche durch Messung mit positivem und negativem Kippwinkel und Bildung der Differenz der ermittelten Dehnungswerte zu bestimmen (s. S. 43).

Beiden Verfahren haften die Nachteile an, daß die Eindringtiefe der Röntgenstrahlung in den Prüfling vom Kippwinkel abhängig ist. Bei der Einstellung unterschiedlicher Kippwinkel werden also unterschiedliche Prüflingstiefen angeregt. Da die Scherspannung in einer Oberflächenschicht an der freien Oberfläche des Prüflings den Wert Null annimmt, muß sie in Richtung der Prüflingstiefe eine Veränderung erfahren. Das heißt, bei Bestimmung der Scherspannung aus Meßwerten mit variablem Kippwinkel treten infolge der unterschiedlich angeregten Prüflingstiefen Fehler auf.

Insbesondere bei der üblichen Verwendung sogenannter ω -Diffraktometer, bei denen die ψ -Kippachse gleichzeitig die Mittelachse des Diffraktometerkreises ist, verursachen unterschiedliche Positionierungen des Prüflings bezüglich des Kippwinkels außerdem systematische Meßfehler.

Es ist weiterhin bekannt, gemäß DD-PS 228 072 den einer Art von Kristallgitterebenen zugeordneten Reflexionswinkel unter einem konstanten Kippwinkel, jedoch unter verschiedenen Drehwinkeln derart zu vermessen, daß der Prüfling innerhalb einer Meßreihe eine vollständige Umdrehung ausführt, d. h. der Drehwinkel von 0° auf 360° , vorzugsweise in konstanten Drehwinkelschritten, ansteigt.

Abgesehen von einer abweichenden Verfahrensweise dient dieses bekannte Verfahren jedoch der Bestimmung der Lage der Hauptspannungsachsen eines räumlichen Spannungszustandes, wozu der Verlauf des ausgemessenen Reflexionswinkels aufgetragen und nach dem Kriterium seiner Symmetrie ausgewertet wird. Hinweise auf die Bestimmung von Scherspannungen sind nicht zu entnehmen und auch nicht naheliegend.

In E. Macherauch „Stand und Perspektiven der röntgenographischen Spannungsmessungen – Teil II“, Metall 34 (1980) 12, S. 1087–1094, ist auf S. 1090 die Eigenspannungsbestimmung bei positiven und negativen Kippwinkeln und Drehwinkeln von 0° und 180° beschrieben. Auch hier sind keine Hinweise auf die Ermittlung von Scherspannungen zu entnehmen. Außerdem treten die eingangs erwähnten Nachteile bzw. Ungenauigkeiten infolge der bei unterschiedlichen Kippwinkeln unterschiedlich angeregten Prüflingstiefen auf.

Ziel der Erfindung

Es ist Ziel der Erfindung, ein Verfahren zur Bestimmung von Scherspannungen mittels Röntgendiffraktion anzugeben, wobei in einem einfachen Meßzyklus Ungenauigkeiten und Meßfehler weitgehend vermieden sind.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Bestimmung von Scherspannungen, insbesondere in oberflächennahen Bereichen von Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, unter Verwendung der Röntgendiffraktion, wobei ein Röntgenstrahl durch einem bestimmten Kippwinkel zugeordnete Kristallgitterebenen des Prüflings gebeugt und der abgebeugte Sekundärstrahl zur Ermittlung des Reflexionswinkels aufgefangen wird, unter Verwendung verschiedener Drehwinkel, welche die Lage des Prüflings zur von Röntgen- und Sekundärstrahl aufgespannten Ebene bestimmen, zu schaffen, wobei zwecks Erfassung des gesamten Scherspannungszustandes parallel zur Prüflingsoberfläche alle Messungen des Reflexionswinkels bei der gleichen, durch den Röntgenstrahl angeregten Prüflingstiefe erfolgen.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß bei konstantem Kippwinkel der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel bei einem Anfangs-Drehwinkel und bei einem zu diesem um 180° geänderten

Komplementär-Drehwinkel vermessen wird,

anschließend dieser Meßzyklus mindestens einmal bei einem veränderten Anfangs-Drehwinkel wiederholt wird,

nunmehr die Differenz zwischen den Kristallgitterdehnungen in der ersten Meßstellung, die durch den Anfangs-Drehwinkel, und der zweiten Meßstellung, die durch den Komplementär-Drehwinkel definiert sind, bestimmt wird,

und weiterhin die Differenz zwischen den Kristallgitterdehnungen in der dritten Meßstellung, die durch den veränderten Anfangs-Drehwinkel, und der vierten Meßstellung, die durch den zugehörigen Komplementär-Drehwinkel definiert sind, bestimmt wird,

und abschließend die Scherspannungskomponenten in den Meßrichtungen, die durch die erste und zweite sowie die dritte und vierte Meßstellung definiert sind, aus der Proportionalität zwischen den ermittelten Differenzen der Kristallgitterdehnungen und den Scherspannungen nach an sich bekannten Verfahren der linearen Elastizitätstheorie bestimmt wird.

Um dabei die Ermittlung des spannungs- bzw. dehnungsfreien Kristallgitterabstandes zu vermeiden, ist es zweckmäßig, daß zur Ermittlung der Differenz der Kristallgitterdehnungen der Reflexionswinkel des spannungsfreien Zustandes durch den Mittelwert der den Drehwinkeln zugeordneten Reflexionswinkel ersetzt wird.

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird nachfolgend an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Eine Diffraktometer-Einrichtung enthält wie bekannt (vgl. z. B. Fig. 1 in DD-PS 228 072) eine Röntgenstrahlquelle und einen Strahlenempfänger, welche am Umfang eines Diffraktometerkreises verstellbar angeordnet sind. In dessen Mitte ist der zu untersuchende Prüfling von einer Halterung aufgenommen. Der Prüfling besteht aus einem kristallinen Werkstoff, im speziellen Ausführungsbeispiel aus einem Stahl C45 normalisiert, und war einer Schleifbearbeitung unterworfen. Demgemäß besteht das Innere des Prüflings aus Kristallen, die Kristallgitterebenen aufweisen. Richtet man den Röntgenstrahl unter einem bestimmten Winkel zur Oberflächennormalen des Prüflings auf diesen, so wird der Röntgenstrahl von einer Schar (h, k, l) von Kristallgitterebenen als Sekundärstrahl reflektiert, wobei die Schar (h, k, l) von Kristallgitterebenen unter einem (konstanten) Kippwinkel ψ zur Prüflingsoberfläche liegt. Der Sekundärstrahl bestimmt gemäß dem BRAGG'schen Reflexionsgesetz den Reflexionswinkel ϑ . Der Prüfling ist um die Oberflächennormale des Prüflings um einen Drehwinkel φ verschwenk- und einstellbar. Das erfindungsgemäße Verfahren wird wie folgt durchgeführt: Der einem Scherspannungszustand unterliegende Prüfling wird in der Diffraktometer-Einrichtung aufgenommen und vom Röntgenstrahl bestrahlt, daß eine Schar (h, k, l) von Kristallgitterebenen, die unter einem Kippwinkel ψ von 45° verlaufen, angeregt wird. Dieser Kippwinkel ψ wird während des Meßzyklusses konstant gehalten. Außerdem wird der Prüfling so positioniert, daß die auf seiner Oberfläche erkennbare Schleifrichtung einen Drehwinkel $\varphi_{11} = 0^\circ$ bestimmt. In dieser ersten Meßstellung wird der Reflexionswinkel ϑ_{11} bestimmt.

Nun wird die zweite Meßstellung bei einem Drehwinkel $\varphi_{21} = \varphi_{11} + 180^\circ = 180^\circ$ eingestellt, d. h., der Prüfling wird um eine halbe Umdrehung um seine Oberflächennormale verschwenkt. In dieser Stellung wird der Reflexionswinkel ϑ_{21} bestimmt. Dieser Vorgang wird unter Beibehaltung des Kippwinkels ψ mit verändertem Drehwinkel φ_{12} und dementsprechend $\varphi_{22} = \varphi_{12} + 180^\circ$ wiederholt (wobei i Wiederholungen günstig sind), d. h., es werden die Reflexionswinkel ϑ_{12} und ϑ_{22} bestimmt. Vorstehende Verfahrensweise gestattet die Bestimmung der Differenz $\Delta\epsilon_i$ der Kristallgitterdehnungen in Richtung beider Drehwinkelpaare φ_{1i} und φ_{2i} aus dem vollständigen Spannungstensor, wobei nur die Scherspannungskomponenten σ_{13} und σ_{23} (die parallel zur Oberflächenebene des Prüflings liegen) als zunächst unbekannt verbleiben.

Die Differenz $\Delta\epsilon_i$ läßt sich demgemäß nach Gleichung (1) bestimmen:

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon_i &= \epsilon_{(\varphi_{1i}/\psi)} - \epsilon_{(\varphi_{2i}/\psi)} \\ &= \frac{1}{2} S_2 [2 \sin 2\psi (\sigma_{13} \cos \varphi_{1i} + \sigma_{23} \sin \varphi_{1i})]\end{aligned}\quad (1)$$

($\frac{1}{2} S_2$ ist die an sich bekannte röntgenographische Elastizitätskonstante.)

Da die Kristallgitterdehnungen in Richtung der Drehwinkel φ_{1i} und φ_{2i} aus den Reflexionswinkeln ϑ_{1i} , ϑ_{2i} bestimmbar sind, gilt:

$$\Delta\epsilon_i = -\cot \vartheta_0 (\vartheta_{1i} - \vartheta_{2i}) \quad (2)$$

(wobei ϑ_0 der Reflexionswinkel des spannungsfreien Zustandes ist). Wegen den in der röntgenographischen Spannungsmessung üblichen großen Reflexionswinkeln ϑ und den kleinen Winkeldifferenzen zwischen den einzelnen Meßwerten läßt sich der Faktor $\cot \vartheta_0$ in ausreichender Näherung ersetzen durch den Faktor $\cot \bar{\vartheta}$, wobei $\bar{\vartheta}$ den Mittelwert der den Drehwinkeln φ_{1i} , φ_{2i} zugeordneten Reflexionswinkeln ϑ_{1i} , ϑ_{2i} darstellt. Somit kann auf die gesonderte Ermittlung des Reflexionswinkels ϑ_0 verzichtet werden.

Damit sind die Scherspannungskomponenten σ_{13} und σ_{23} aus den Gleichungen (1) und (2) durch Ausgleichsrechnung bestimmbar:

$$A_{(\varphi_{1i})} = \frac{\Delta\epsilon_i}{\frac{1}{2} S_2 \cdot 2 \sin 2\psi} = \sigma_{13} \cos \varphi_{1i} + \sigma_{23} \sin \varphi_{1i} \quad (3)$$

Besonders einfach wird die Auswertung in den folgenden beiden Fällen:

- a) Weist die Achse $\varphi_1 = 0$ in Richtung der maximalen Scherspannung ($\sigma_{13 \max}$), was praktisch oft realisierbar ist, wenn die Bearbeitungsrichtung (z. B. Schleifen) oder die Beanspruchungsrichtung (z. B. Verschleiß) von vornherein bekannt ist, so gilt

$$\begin{aligned}\sigma_{13} &= \sigma_{13 \max} \\ \sigma_{23} &= 0\end{aligned}$$

d. h. Gleichung (3) vereinfacht sich zu

$$A_{(\varphi_{1i})} = \sigma_{13} \cos \varphi_{1i} \quad (3a)$$

d. h. $i = 1$.

- b) Bei Ermittlung von Wertepaaren der Art $A_{(\varphi_{1i})}$ und $A_{(-\varphi_{1i})}$ (Gleichung 3) führen die Summen bzw. Differenzen zur expliziten Darstellung der beiden Scherspannungskomponenten:

$$A_{(\varphi_{1i})} + A_{(-\varphi_{1i})} = 2 \sigma_{13} \cos \varphi_{1i} \quad (4)$$

$$A_{(\varphi_{1i})} - A_{(-\varphi_{1i})} = 2 \sigma_{23} \sin \varphi_{1i} \quad (5)$$

Mittels bekannter Beziehungen lassen sich aus σ_{13} und σ_{23} Richtung und Größe der maximalen Scherspannung σ_3 bestimmen:

$$|\sigma_3| = \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2} \quad (6)$$

$$\tan \gamma = \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{13}} \quad (7)$$

wobei γ den Winkel zwischen der Achse mit dem Drehwinkel $\varphi_1 = 0$ und der Richtung der maximalen Scherspannung darstellt. Für das spezielle Ausführungsbeispiel gelten nachstehende Werte:

Prüfling C45 normalisiert

Strahlung CrK_α , Reflex (h, k, l): 211

$$\frac{1}{2} S_2 = 5,76 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N} \text{ (HTM-Beiheft 1982, S. 14)}$$

Einstellungen:

$$\psi = 45^\circ$$

$$\varphi_{1i} = 0^\circ \text{ entspricht der Schleifrichtung}$$

$$\text{weitere Drehwinkel } \varphi_{1i+1} = \varphi_{1i} + 15^\circ$$

Meßwerte:

$$\vartheta_{11} = 78,04^\circ \quad \vartheta_{12} = 78,03^\circ$$

$$\vartheta_{21} = 78,14^\circ \quad \vartheta_{22} = 78,15^\circ \text{ usw.}$$

aus der Meßreihe ermittelt:

$$\bar{\vartheta} = 78,19^\circ$$

errechnete Werte:

$$\sigma_{13} = 33,7 \text{ Nmm}^2$$

$$\sigma_{23} = 1,4 \text{ Nmm}^2$$

$$\sigma_3 = \tau_{\max} = 33,72 \text{ Nmm}^2$$

$$\gamma = 2,4^\circ$$