



Doctoral Thesis

Anwendung der Methode der Schattenoptik zur Untersuchung der Rissausbreitung in faserverstärkten Laminaten

Author(s):

Moor, Ernst

Publication Date:

1992

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000692877> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9906

**Anwendung der Methode der Schattenoptik
zur Untersuchung der Rissausbreitung
in Faserverstärkten Laminaten**

ABHANDLUNG
Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

ERNST MOOR
Diplom-Physiker, Universität Bern
geboren am 6. Juni 1951
von Vorderwald AG

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. M. Sayir, Referent
Dr. H. J. Schindler, Korreferent

1992

Zusammenfassung

Die vorliegende Abhandlung ist Teil eines von Prof. Dr. M. Sayir geleiteten Forschungsprojektes "Dynamische Bruchmechanik der Verbundwerkstoffe, Einfluss des Materialverhaltens auf das schnelle Risswachstum", welches vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unterstützt wurde. Das Hauptziel des Projektes bestand in der Entwicklung des physikalischen Verständnisses für schnelle Bruchvorgänge in Verbundwerkstoffen. Die vorliegende Arbeit deckt hauptsächlich die experimentelle Seite ab, während die theoretische Seite in der Dissertation von M. Veidt, "Studien zum bruchmechanischen und strukturdynamischen Verhalten von Faserverbundplatten", [Diss. ETH Nr. 9424] behandelt wird.

Ausgangspunkt für den detaillierten Forschungsplan waren **Vorversuche** an gekerbten, plattenförmigen Zugproben aus symmetrischen cross-ply Laminaten mit Kohlefasern in Lastrichtung und senkrecht dazu. Es wurde ein spontaner, sehr schneller Bruchvorgang mit Rissgeschwindigkeiten im Bereich 800 bis 1200 m/s beobachtet. Es breitete sich ein einziger Riss senkrecht zur Belastung aus, und die Bruchflächen waren nahezu glatt. Das Hauptziel der experimentellen Studien bestand in der Untersuchung dieser schnellen Rissausbreitung durch Anwendung der Methode der Schattenoptik. Ergänzend wurden Dehnungsmessungen in unmittelbarer Nähe der Risstrajektorie und Bestimmungen der Rissgeschwindigkeit mit Rissmessgittern durchgeführt. Die Untersuchungen wurden abgeschlossen mit Mikroschliffen von gebrochenen, sowie nur teilbelasteten Proben.

Die Bereitstellung der Versuchseinrichtungen, sowie die Übertragung der Methode der Schattenoptik auf faserverstärkte Kunststoffe, insbesondere die Entwicklung einer Beschichtungstechnik, waren sehr zeitaufwendig. Eine Besonderheit der umgebauten Cranz-Schardin Kamera besteht darin, dass das Funkenlicht bis in den Bereich des nahen UV (230 nm) ausgenützt wird. Aus den **Untersuchungen** ergaben sich folgende **Erkenntnisse**:

Bei Belastungen bis ungefähr 15% der Bruchlast der gekerbten Probe wird eine Kaustik, ähnlich wie bei isotropen homogenen Werkstoffen beobachtet. Die Form der Kaustik ist allerdings stark abhängig von der Grösse des Schubmoduls im Vergleich zu der Grösse der Plattensteifigkeiten E_{11} und E_{22} ausgedrückt durch das Verhältnis $2 G_{12} / (E_{11} + E_{22})$. Numerisch konstruierte Schattenbilder [Veidt 1991], basierend auf linear elastischem Materialverhalten und einem in Dickenrichtung homogenisierten Laminat zeigten, insbesondere bezüglich der Form, eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

Bei einer Erhöhung der Belastung bis zum Bruch entstehen bei den cross-ply Laminaten ausgehend vom Kerbgrund in allen 0°-Schichten, genau übereinanderliegend, intralaminare Matrixrisse. Bei einigen Laminattypen konnten auch Faserbrüche in den 90°-Schichten beobachtet werden. Die ursprüngliche Kaustik verschwindet zunehmend, und das Schattenbild, meistens mit ausgeprägter Kaustik, wird bestimmt durch die Schädenvorgänge

im Laminat. Diese Schadenentwicklung ist mit irreversiblen Strukturveränderungen verbunden. Eine homogenisierte Modellierung müsste diese Schadenbildung berücksichtigen, damit die neu entstandenen Schattenbilder erklärt werden können.

Bei der dynamischen Rissausbreitung wird bei vielen Proben wieder ein auf die Umgebung der Risssspitze beschränkter Schattenfleck beobachtet. Die dynamischen Schattenflecken mit Kaustik sind in Belastungsrichtung wesentlich länger als in Richtung der Rissausbreitung. Die Schlibbilder der gebrochenen Proben zeigten in der Umgebung der Risstrajektorie sowohl in den 0°-, als auch in den 90°-Schichten viele, mehrheitlich feine, intralaminare Risse in der Matrix. Bei einigen Laminattypen wurden auch Delaminationen beobachtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses "Rissnetz" eine Reduktion des Schubmoduls bewirkt. Berechnungen mit einem homogenisierten Laminat mit global kleinerem Schubmodul als ein entsprechendes schadenfreies Laminat, ergeben einen zu den Beobachtungen ähnlichen Schattenfleck. Die Schadenentwicklung im Fall der dynamischen Rissausbreitung ist vollständig verschieden von der Schadenentwicklung in der Umgebung einer quasi statisch belasteten scharfen Kerbe.

Die **ergänzenden Untersuchungen** zeigten, dass die Rissgeschwindigkeit in cross-ply Laminaten vom Typ der Kohlefasern abhängig ist. In Laminaten mit HS-Kohlefasern wurden Rissgeschwindigkeiten im Bereich 800 bis 900 m/s und bei HM-Kohlefasern im Bereich 1100 bis 1200 m/s beobachtet. Bei Dehnungsmessungen in unmittelbarer Umgebung der Risstrajektorie wurde bei Laminaten mit HS-Kohlefasern ein im Vergleich zu Berechnungen schnellerer Abfall der Dehnung beobachtet. Diese Beobachtungen unterstützen die oben erläuterte Hypothese der Schubmodulreduktion durch die Entstehung eines "Rissnetzes" in der Umgebung der Risstrajektorie. Weitere interessante Erkenntnisse sind: Gekerbte Zugproben aus quasi isotropen Kohlefaserlaminaten versagen nahezu spontan. Anhand der beobachteten Bruchdauer kann auf Schadenausbreitungsgeschwindigkeiten zwischen 400 und 800 m/s geschlossen werden. Bei Kohlefaserlaminaten mit cross-ply und quasi isotropem Aufbau konnte keine Abhängigkeit der Bruchlast vom Kerbradius beobachtet werden. Gleiche Probenabmessungen vorausgesetzt, versagen gekerbte Laminte mit HM-Kohlefasern bezüglich der theoretischen Festigkeit der Fasern bei niedrigeren Werten als die entsprechenden Lamine mit HS-Fasern.

Die **Methode der Schattenoptik** stellt auch für faserverstärkte Kunststoffe ein hoch empfindliches Verfahren zur Beobachtung der Dehnungsverteilung in der Umgebung einer Risssspitze dar. Dies gilt sowohl bei stationären Rissen als auch bei dynamischer Rissausbreitung. Bei quasistatischer Lasterhöhung eignet sich die Methode ausgezeichnet zur Beobachtung der Schadenentwicklung in Laminaten. Die erfolgreiche Anwendung der Schattenoptik wurde ergänzt durch Mikroschliffe und einfache Werkstoffmodellierungen. Dadurch konnte ein markanter Beitrag zum phys. Verständnis der schnellen Rissausbreitung in faserverstärkten Kunststoffen geleistet werden.

Abstract

The work discussed in this thesis is a part of the research project "Dynamic fracture mechanics of composites: The influence of material properties on fast crack propagation." This research project was under the supervision of Professor Dr. M. Sayir and was funded by the Swiss National Science Foundation. A principal goal of the project was to develop a physical understanding of the fast fracture of composite materials. Using two approaches, experimental and theoretical, this was accomplished. In this thesis, attention is focused primarily on the experimental aspects. The theoretical work is discussed in the thesis of M. Veidt [Diss. ETH Nr. 9424] "Studies of the fracture and structural dynamic behaviour of fiber reinforced plates."

The starting point for this research was the study of notched plates under tension. These plates were symmetric, cross-ply laminates with carbon fibres both parallel and perpendicular to the direction of the external tension. A single crack with a smooth crack surface was observed propagating at velocities between 800 and 1200 m/s through these specimens. The principal goal of the experiments reported here was to examine these fast-running cracks using an optical technique, the method of caustics. Strain and crack gauges were used to measure the strains close to the crack trajectory and the crack propagation velocity, respectively. Microscopic examination of the specimens was necessary to obtain the final results.

Preparation of the experimental equipment and the extension of the method of caustics to fiber-reinforced composites were very time consuming. In particular, the optics of a Cranz Schardin camera were re-designed to significantly increase the amount of ultra-violet light incident on the film. Finally the method of caustics could be successfully applied to fiber-reinforced composites. The following results were obtained:

For loads up to 15% of the fracture load of the notched specimens, a caustic similar to that observed in isotropic, homogenous material is observed. The form of the caustic is primarily dependant on the ratio of the in-plane shear modulus G_{12} to the sum of the Young's moduli in the fiber directions ($E_{11} + E_{22}$). With a surface coating technique the picture quality approached that for similar tests on PMMA or Araldit B. Numerically generated caustics which were determined by M. Veidt [Veidt 1991] showed good agreement with these experimental results. These calculations assumed a structural behaviour which is linearly elastic, anisotropic and homogenous.

Increasing the load to fracture, cracks are produced in the matrix of the 0° layers. These cracks start at the notch-tip and propagate in the direction of the external loading. In some laminates, small fiber cracks also were observed in the 90° layers. Photographs of the caustics which are taken as the load is increased show the evolution of the damaged zone. The damage in the specimen produces permanent structural changes. Any attempt to model this behaviour must include these effects.

It must be emphasized that the damage development obtained for dynamic crack propagation is very different to those produced by a static crack. In many specimens, after the onset of dynamic crack propagation a shortening of the caustics at the crack tip is observed. The caustics, however, remain oriented in the direction of the external loading and their dimensions in this direction also remain dominant. Micrographs of the broken specimens show that in the neighborhood of the crack trajectory in the 0° and 90° layers many fine intralaminar cracks in the matrix occur. In certain types of laminates, delamination is also observed. From these experimental results it was conjectured that one possible effect of this "crack net" could be a reduction of the shear modulus of the composite. Support for this conjecture is obtained from numerical calculations on a homogenous undamaged laminate which had a reduced global shear modulus.

Additional results show that the crack propagation speed in cross-ply laminates is dependant on the type of carbon fiber used. For laminates with HS-carbon fibers speeds in the range 800-900 m/s were measured, while those with HM-carbon fibers had crack speeds in the range 1100-1200 m/s. Strain measurements taken close to the crack in HS-carbon fiber reinforced laminates show that the decrease in the strain after the crack has passed the point of measurement is slower in theory than experiment. These differences can however be reconciled by using a lower global shear modulus in the theoretical model.

In quasi-isotropic carbon-fiber laminates failure is almost spontaneous. The damage-propagation velocity is in the range 400-800 m/s. Furthermore for these and cross-ply laminates no dependency of the failure load on the notch-tip radius was observed. The theoretical strength of the laminates is reduced significantly by introducing a notch. This reduction is larger for laminates reinforced with HM-carbon fibers than in those reinforced with HS-carbon fibers.

The method of caustics may be used to observe the strain field near a stationary or moving crack tip in a fiber-reinforced composite material. For their behaviour under quasi-statically varying loads, the method is excellent in determining the evolution of the damaged zone. Supplemented by micrographs and simple continuum models, this optical technique enables also a better physical understanding of fast-propagating cracks in these materials.