



Aachener Berichte aus dem Leichtbau

The Influence of Ionizing Radiation on the Mechanical Properties of Structural Adhesive Joints in Space

Jannik Zimmermann



Institut für
Strukturmechanik
und Leichtbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

The Influence of Ionizing Radiation on the Mechanical Properties of Structural Adhesive Joints in Space

Der Einfluss von ionisierender Strahlung auf die mechanischen Eigenschaften von strukturellen Klebungen im Weltraum

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Jannik Zimmermann

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisinger

Tag der mündlichen Prüfung: 07. April 2022

Aachener Berichte aus dem Leichtbau
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 2/2022

Jannik Zimmermann

**The Influence of Ionizing Radiation
on the Mechanical Properties of
Structural Adhesive Joints in Space**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8605-8

ISSN 2509-663X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen im Zeitraum vom November 2016 bis zum April 2022.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder. Ich danke für die vielen konstruktiven und fachlichen Diskussionen, die eingebrachten Ideen, für die stetige Förderung und Forderung auf fachlicher und menschlicher Ebene, den gegebenen Freiraum zur Umsetzung meiner Ideen und das damit verbundene Vertrauen.

Weiterhin möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen für die Übernahme des Ko-referats sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitz bedanken.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen danke ich für ihre Unterstützung. Der Austausch und die Diskussionen unserer wissenschaftlichen und sicherlich auch gelegentlich weniger wissenschaftlichen Thesen waren höchst ergiebig und haben mir viel Freude bereitet. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Zamaan Sadeghi, welcher mir wissenschaftlich ein Vorbild war, sowie die Herren Tobias Meinert und Lars Moosdorf.

Zuletzt gilt mein Dank meiner Familie und meinen Freunden dafür, dass sie mir meinen beruflichen Weg ermöglicht und mich nach allen Kräften unterstützt haben.

Aachen, April 2022
Jannik Zimmermann

Abstract

The utilization of structural adhesives in the space sector has expanded significantly in recent years. Adhesively bonded joints offer many advantages compared to traditional joining techniques like welding, screws, bolts and rivets. Nevertheless, the space environment imposes a major challenge in terms of durability on structural adhesives. Existing handbooks and guidelines lack information regarding the effect of ionizing radiation on the mechanical properties of structural adhesive joints. In fact, there are contradicting statements, whether the effect of ionizing radiation should be considered in an early design phase or not. Therefore, in this thesis, a design framework is developed which enables the consideration of radiation induced degradation of structural epoxy adhesives for space applications. For this purpose, radiation simulations are conducted for a variety of target orbits to obtain the total ionizing dose that the adhesive joint is exposed to. Using radiation interaction simulation, the absorbed dose is determined for each position within the adhesive layer. Irradiation experiments of bulk adhesive specimens are conducted for a 20 year low earth orbit mission. For higher dose levels that represent 20 year geostationary missions, radiation damage test data from literature is considered. A novel analytical calculation scheme for determining the stiffness of single-lap joints is developed. This approach takes the out of plane deformation of the adherends into account and enables parametric investigations of radiation-induced stiffness degradation of single-lap joints. The method is validated with experimental tests and FE calculations. With the proposed model a significant improvement of the accuracy is achieved when compared to existing analytical approaches. Using the cohesive zone model, the effect of ionizing radiation on the strength of single-lap joints is evaluated. Here, the cohesive zone parameters are degraded depending on the previously determined dose-depth curve. With this approach, for the first time, a single-lap joint is virtually exposed to an actual radiation spectra that corresponds to a certain orbit. The analysis shows that for overlap lengths below 10 mm the ionizing radiation has an effect on the single-lap joint strength which could be compensated by increasing the overlap length or the joint width in the design process. For overlap lengths above 10 mm the effect of ionizing radiation can be neglected.

Kurzfassung

Der Einsatz von strukturellen Klebungen im Raumfahrtsektor hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Klebverbindungen bieten viele Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Füge-techniken wie Schweißen oder die Verwendung von mechanischen Verbindungselementen wie Schrauben, Bolzen und Nieten. Dennoch stellt die Weltraumumgebung eine große Herausforderung in Bezug auf die Alterung von Strukturklebstoffen dar. In den einschlägigen Handbüchern und Richtlinien zur Auslegung für Klebungen im Weltraum, fehlen Informationen über die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf die mechanischen Eigenschaften von strukturellen Klebstoffen. Vielmehr sind widersprüchliche Aussagen darüber zu finden, ob die Wirkung ionisierender Strahlung in einer frühen Entwurfsphase berücksichtigt werden sollte oder nicht. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, welche die Berücksichtigung strahlungsinduzierter Degradation von strukturellen Epoxidklebstoffen für Raumfahrtanwendungen ermöglicht. Zu diesem Zweck werden Strahlungssimulationen für eine Vielzahl von Zielorbits durchgeführt, um die kumulierte ionisierende Strahlungsdosis zu ermitteln, der die Klebverbindung ausgesetzt ist. Mit Hilfe einer Simulation der Strahlungswechselwirkung wird die absorbierte Dosis für jede Position innerhalb der Klebstoffschicht bestimmt. Des Weiteren werden Bestrahlungsexperimente an Klebstoffproben für eine 20-jährige Mission in einer niedrigen Erdumlaufbahn durchgeführt. Für höhere Dosen, die einer 20-jährigen geostationären Mission entsprechen, werden Strahlungstests aus der Literatur verwendet. Ebenfalls wird ein neues analytisches Berechnungsschema zur Bestimmung der Steifigkeit von einschnittig überlappenden Klebungen entwickelt. Dieser Ansatz berücksichtigt die Verformung der Füge-teile normal zur Zugrichtung und ermöglicht parametrische Untersuchungen der strahleninduzierten Steifigkeitsdegradation von einschnittig überlappenden Klebungen. Die Methode wird mit experimentellen Tests und Finite Elemente Berechnungen validiert. Mit dem vorgeschlagenen Modell wird eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit im Vergleich zu bestehenden analytischen Ansätzen erreicht. Mit Hilfe des Kohäsionszonenmodells wird die Auswirkung ionisierender Strahlung auf die Festigkeit von einschnittig überlappenden Klebungen untersucht. Dabei werden die Kohäsivzonenparameter in Abhängigkeit von der zuvor bestimmten Dosis-Tiefen-Kurve degradiert. Mit diesem Ansatz wird erstmals eine einschnittig überlappende Klebung virtuell einem realen Strahlungsspektrum ausgesetzt, welches einem bestimmten Orbit entspricht. Die Analyse zeigt, dass bei Überlappungslängen unter 10 mm die ionisierende Strahlung einen Einfluss auf die Festigkeit der einschnittig überlappenden Klebung hat, der durch eine Vergrößerung der Überlappungslänge oder der Klebfugenbreite im Entwurfsprozess kompensiert werden könnte. Bei Überlappungslängen über 10 mm kann der Einfluss der ionisierenden Strahlung auf die Festigkeit vernachlässigt werden.

Contents

Nomenclature	xi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 State of the art	2
1.3 Objectives and scope of this thesis	6
2 Orbit dependent dose calculation	9
2.1 Radiation environment	9
2.2 Radiation simulation I: Dose determination	14
2.3 Radiation simulation II: Interaction with adhesive joints	20
3 Epoxy adhesives in ionizing radiation environment	25
3.1 Chemical composition of epoxy adhesives	25
3.2 Polymer degradation on a molecular level	26
3.3 Synergies in polymer degradation	27
3.4 Beneficial effects of radiation treatment	28
3.5 Radiation damage testing	30
4 Irradiation of bulk epoxy specimen and characterization	39
4.1 Specimen manufacturing	39
4.2 Radiation facility	42
4.3 Tensile loading fixture	43
4.4 FTIR spectroscopy	45
4.5 Tensile Test	46
4.6 Results and discussion of experimental work	48
5 Stiffness determination method	53
5.1 Model derivation	54
5.2 Model validation	62
5.3 Study on model behaviour	71
5.4 Comparison of 2D and 3D FE model	76
6 Strength determination of irradiated adhesive joints	81
6.1 Cohesive zone model	81
6.2 Experimental data	87

6.3	Degraded CZM	89
6.4	Degradation of cohesive parameters	94
6.5	Electron particle radiation	97
7	Conclusions and outlook	115
7.1	Summary and concluding remarks	115
7.2	Future works	117
A	Radiation damage test data	119
B	Closed form solution of integrals in context of energy determination in single-lap joints	133
C	Coefficients for curvature determination	135
D	Procedure of stiffness determination of a single-lap joint	137
E	Degraded Cohesive zone parameters	141
	Literature	147