ETH zürich

ETH Library

Penetration behavior of adhesives into solid wood and micromechanics of the bondline

Doctoral Thesis

Author(s):
Hass, Philipp Friedrich Siegfried

Publication date:
2012

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-007608497

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 N° 20762

PENETRATION BEHAVIOR OF ADHESIVES INTO SOLID WOOD AND MICROMECHANICS OF THE BONDLINE

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

For the degree of

Doctor of Sciences

Presented by

PHILIPP FRIEDRICH SIEGFRIED HASS

Dipl.-Ing., Dresden University of Technology

born April 12, 1978 in Neunkirchen/Saar

Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. P. Niemz (examiner)

Prof. Dr. I. Burgert (co-examiner)

Prof. Dr. Ir. J. W. G. van de Kuilen (co-examiner)

2012

Abstract

Adhesive bonding represents the most important joining technique for the construction of building elements in modern wood structures and timber engineering. Surprisingly, knowledge about the mechanical behavior of the bond, the properties of the bondline and the interactions between wood and adhesive are mainly based on empirical research. On the one hand, this is due to the complexity of the problem describing these interactions, which occur at different hierarchical levels of wood, on the other in the lacking of adequate possibilities for investigating and modeling the processes. The aim of this work was to investigate the bonding process, its implications on the involved materials, and the failure behavior of the joint in a way that allows a universal description and simulation of the actions.

In order to understand the mechanical behavior of adhesive bonds, its complex structure and the properties of the involved constituents and their interactions need to be addressed. By analyzing tomography data of bonded beech wood it was possible to provide fundamental knowledge about the bondline geometry of different adhesive systems with regard to the characteristic wood anatomy of beech. Since the vessel network is the decisive wood factor for the adhesive penetration, the determination of the connectivity and the topology of the network allowed reconstruction of the penetration pathways and of the area for penetration. Due to the high influence of the orientation of the vessel network on bond formation, evaluation and consequently prediction of the bondline morphology became possible, assuming the adhesives' rheology is also known. The characterization of the adhesive distribution with the saturation function also detects bondline imperfections and hence allows for a meaningful physical description of the adhesive penetration, since these imperfections determine the mechanical behavior of the bondline. Additionally, the saturation allows conclusions about the failure behavior of the bonding, as low strength values and predominant adhesive failure in lap-shear tests can be correlated with the adhesive distribution in the bondline. Furthermore, the investigation showed that evaluation of the adhesive properties with the standard lap-shear test is only reasonable in the case of pure adhesive failure. At higher wood fracture percentages, only the wood properties are represented, which can be proven by the correlation between strength and growth ring angle. Due to the combined action of wood and adhesive in the

bondline, an investigation of the individual material properties is insufficient for determining the mechanical situation of the bondline. The presented inverse approach delivers the effective material properties of the zone influenced by the adhesive under real conditions via so-called modal analysis. Additional investigations of the microscopic fracture behavior of bonded spruce wood samples provide the basic failure mechanisms of a mechanically loaded bonding. The influence of the bondline properties was analyzed under various bondline orientations and compared to the failure characteristics of solid wood. In addition to the interpretation of the fracture surface, this also allows for the prediction of the failure process and the fracture path.

The knowledge gained enabled a deeper understanding about the nature of bonding the interactions between participating materials. The proposed investigation techniques and characterization parameters – the three-dimensional pore space analysis, the saturation, the inverse material property identification, and the in-situ failure characterization – describe the main physical properties of the adhesive bond and allow for quantification under realistic conditions. The methods can be used to determine and evaluate the influence of the environmental conditions on the bondline, and to investigate the situation for additional wood-adhesive combinations. Further, this information can be the base for a numerical reproduction of the adhesive joint and be used for the development of adhesive systems and adhesive bonds in due consideration of the respective boundary conditions. Together with the failure prediction, this provides new possibilities to warrant and inspect the safety of wood-adhesive constructions, while exhausting the full potential of the bond and optimizing the consumption of raw materials.

Zusammenfassung

Obwohl die Verklebung eine der wichtigsten Verbindungstechniken im modernen Holzbau darstellt, beruhen viele Erkenntnisse über das mechanische Verhalten, die Eigenschaften der Klebfuge oder die Interaktionen zwischen Holz und Klebstoff auf Erfahrungswerten. Das liegt zum einen daran, dass sich die Beschreibung der Klebfuge und dieser Interaktionen als vielschichtiges Problem darstellt, da mitunter die verschiedenen Strukturebenen des Holzes berücksichtigt werden müssen. Zum anderen fehlen geeignete Untersuchungsmethoden, die eine ausreichende Beschreibung der Eigenschaften der Klebfuge und der Vorgänge in ihr ermöglichen. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, den Verklebungsprozess, seine Auswirkungen auf die Eigenschaften der Verklebungspartner und das Versagen der Verbindung so zu untersuchen, dass eine allgemeine Beschreibung der Vorgänge möglich ist und Parameter bestimmt werden können, die die Möglichkeiten zur Modellierung einer Holzverklebung verbessern.

Das mechanische Verhalten einer Klebfuge wird in erster Linie von der Struktur und den Eigenschaften der beteiligten Materialien – also des Holzes und des Klebstoffes – sowie den Interaktionen zwischen den Materialien beeinflusst. Tomographien von verklebtem Buchenholz erlauben es die Klebfugengeometrie verschiedener Klebstoffsysteme in Abhängigkeit der holzanatomischen Eigenheiten am Beispiel von Buchenholz zu charakterisieren. Da auf der Substratseite das Gefässnetzwerk der Buche von entscheidender Bedeutung für die Gestalt der entstehenden Klebfuge ist, können durch die Analyse dieses Netzwerkes die Eindringwege des Klebstoffes rekonstruiert werden. Somit ist es möglich, bei bekannter Rheologie des Klebstoffes, die Gestalt der Klebfuge nach der Aushärtung des Klebstoffes vorherzusagen. Mit Hilfe einer Sättigungsfunktion, die den vorhandenen Porenraum zum gefüllten Porenraum ins Verhältnis setzt, steht ein neuer Beschreibungsparameter für das Eindringverhalten von Klebstoffen zur Verfügung. Da in diesem Parameter Fehlstellen in der Klebfuge berücksichtigt werden, die von entscheidender Bedeutung für das mechanische Verhalten der gesamten Klebfuge sind, besitzt die Sättigungsfunktion zudem physikalische Aussagekraft, die Rückschlüsse über das Versagensverhalten der Verklebung zulässt. So konnten geringe Festigkeitswerte und Klebstoffversagen in Zugscherprüfungen aufgrund von Fehlstellen in der Klebfuge durch die Sättigungsfunktion beschrieben werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass der

Zugscherversuch nur bedingt dazu geeignet ist, die Eigenschaften der Verklebung zu untersuchen. Bei Versagen im Klebstoff sind Rückschlüsse auf den Klebstoff möglich, während bei einem Versagen im Holz lediglich die Holzeigenschaften widergegeben werden. Aufgrund der Interaktionen zwischen Holz und Klebstoff im Bereich der Klebfuge, reicht die individuelle Untersuchung der Einzelmaterialien für eine Charakterisierung des mechanischen Zustandes der Klebfuge nicht aus. Ein inverser Ansatz über eine so genannte Modalanalyse erlaubt unter Berücksichtigung der realen Aushärtebedingungen die Bestimmung der effektiven Materialeigenschaften der Klebfuge. Das unterschiedliche Versagensverhalten auf mikroskopischer Ebene verschiedener Klebstoffsysteme konnte an verklebten Fichteholz-Proben unter mechanischer Belastung in-situ untersucht werden. Dabei wurde der Einfluss der Klebfuge unter verschiedenen Klebfugenorientierungen bestimmt und mit dem Bruchverhalten von Vollholz verglichen. Es konnten für die Klebstoffe charakteristische Versagensmechanismen bestimmt werden, die neben einer besseren Interpretation des Bruchbildes auch eine Vorhersage des Versagensprozesses ermöglichen.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit tragen dazu bei das Verständnis über das Wesen der Verklebung und die Interaktionen zwischen Holz und Klebstoff zu vertiefen. Mit Hilfe der vorgestellten Untersuchungsmethoden und Beschreibungsparameter, wie der dreidimensionalen Porenraumanalyse, der Sättigungsfunktion, der inversen Materialkennwertbestimmung oder den in-situ Versagensuntersuchungen, können wichtige Eigenschaften der Klebfuge unter realen Bedingungen mit physikalischer Aussagekraft ermittelt werden. Die Techniken können in weiterführenden Arbeiten genutzt werden, um den Einfluss von Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte zu bestimmen, oder um weitere Holz-Klebstoffkombinationen zu untersuchen. Das gewonnene Wissen ermöglicht die numerische Abbildung des verklebten Bauteils und kann in der Entwicklung von Klebstoffsystemen und Klebverbindungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen genutzt werden. In Kombination mit der Versagensvorhersage bieten sich neue Möglichkeiten für die Gewährleistung und Überprüfung der Bauteilsicherheit, bei Ausschöpfung des vollen Potenzials der Verbindung und optimalem Werkstoffeinsatz.