

Beurteilung der Sprödbruchgefährdung gelochter Stahltragwerke aus Flusstahl

Assessing the risk of brittle fracture of structures with holes made
of old mild steel

An der
Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. LARS SIEBER

geboren am 10. Oktober 1976 in Bautzen

Kurzfassung

Bei der Beurteilung der Sicherheit bestehender Konstruktionen aus altem Baustahl (i. A. Flusstahl) und der Entscheidung über notwendige Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen ist der Nachweis ausreichender Werkstoffzähigkeit (der Sicherheit gegen ein sprödes Versagen) von wesentlicher Bedeutung. Die in DIN EN 1993-1-10 normativ geregelten Nachweismethoden zur Beurteilung der Sprödbbruchgefährdung wurden basierend auf umfangreichen bruchmechanischen Betrachtungen entwickelt. Sie gelten für Schweißkonstruktionen und „Stähle aus neuerer Zeit“ mit in der Regel hohen Zähigkeitswerten. Die Quantifizierung der Werkstoffzähigkeit in DIN EN 1993-1-10 erfolgt durch Kerbschlagbiegeversuche. Die Beziehung zwischen der Übergangstemperatur T_{27J} der Kerbschlagarbeit und der Referenztemperatur T_0 der Bruchzähigkeit wird durch die modifizierte Sanz-Korrelation hergestellt, die nur für diese Stähle abgeleitet wurde.

Das in der Norm verankerte Verfahren ist für alte Flusstahlkonstruktionen mit Lochschwächung durch Niet- und Schraubenverbindungen nicht geeignet. Einerseits unterscheiden sich Kerbwirkung und Eigenspannungszustand von geschweißten und genieteten Konstruktionen und damit die Zähigkeitsanforderungen wesentlich voneinander. Auf der anderen Seite unterliegen die Zähigkeitseigenschaften von Flusstählen deutlich größeren Streuungen.

In der vorliegenden Arbeit werden experimentelle und rechnerische Untersuchungen zum Sprödbbruchverhalten gelochter Konstruktionen aus altem Flusstahl vorgestellt. Wesentlicher Bestandteil sind dabei die umfangreichen Werkstoffanalysen zur Ermittlung der bruchmechanischen Werkstoffzähigkeit im spröduktilen Übergangsbereich nach dem Master-Curve-Konzept (ASTM E1921). Die Auswertungen belegen, dass in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens unterschiedliche Werkstoffgüten definiert werden können. Um den Einfluss des Stanzens von Löchern auf das Sprödbbruchverhalten alter Flusstähle zu beurteilen, werden Gefügeuntersuchungen und Mikrohärtemessungen durchgeführt.

Ausgehend von einer umfassenden Analyse typischer Konstruktionsformen bestehender Tragwerke des Stahlhochbaus erfolgen bruchmechanische FE-Berechnungen an Anschlüssen von Winkelprofilen zur Bestimmung der Zähigkeitsanforderungen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse des Spannungsintensitätsfaktors werden durch Modifikation bekannter Lösungen aus der Fachliteratur für die weitere Anwendung aufbereitet.

Darauf aufbauend wird für die untersuchten Konstruktionsdetails im Rahmen einer bruchmechanischen Sicherheitsanalyse ein praxisgerechtes Verfahren zur Beurteilung der Sprödbbruchgefährdung genieteter und geschraubter Bauteile abgeleitet. Mit Hilfe statistischer Methoden werden Streuungen der Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte der Flusstähle erfasst und nach der Verifizierung durch Bauteilversuche in ein semi-probabilistisches Nachweiskonzept überführt.

Abstract

In the safety assessment of existing structures made of old mild steel and for the decision on necessary repair and reinforcement measures, the verification of sufficient material toughness (safety against brittle failure) is essential. The normatively regulated assessment methods to avoid brittle failure in DIN EN 1993-1-10 were developed based on extensive fracture mechanics investigations. They apply to welded structures and modern steels with generally high toughness. The quantification of the material toughness in DIN EN 1993-1-10 is realised by Charpy impact tests. The relationship between the transition temperature T_{27J} of the notch impact energy and the reference temperature T_0 in fracture toughness is realised by the modified Sanz-correlation which has been derived for these steels.

The method is not suitable for mild steel structures with holes for riveted or bolted joints. On one hand, the stress concentrations and residual stresses of welded and riveted structures and thus toughness requirements are significantly different. On the other hand, the toughness properties of old mild steels have significantly larger variations.

In the present dissertation, experimental, analytical and numerical studies of the brittle fracture behavior of structures with holes made of old mild steel are presented. Extensive material analyses to determine the fracture toughness in the brittle-ductile transition region according to the Master Curve concept (ASTM E1921) are an essential part of this thesis. The evaluations confirm that, depending on the manufacturing process, different grades of steel can be defined. To analyse the influence of punching the holes on the brittle fracture behavior of old mild steels, structural examinations and microhardness measurements are performed.

Based on an extensive analysis of typical construction details of existing structural steelwork, fracture mechanical finite element calculations of connections of angle profiles are performed to determine their toughness requirements. The obtained results of the stress intensity factor are revised for further use by modification of known solutions from the specialised literature.

Based on the studied construction details, a practical method for assessing the hazard of brittle fracture of riveted and bolted components is derived in the framework of fracture mechanics safety analysis. Using statistical methods variations of strength and toughness properties of mild steels are considered and transferred to a semi-probabilistic assessment concept after the verification by component tests.