

Zum Einfluss der Fertigungsparameter auf die mechanischen
Eigenschaften von Schweißverbindungen höherfester Stähle

On the influence of process parameters on the mechanical properties
of welded joints of high-strength steels

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

An der Fakultät Bauingenieurwesen der

Technischen Universität Dresden

eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thoralf Kästner

Geboren am 20.02.1991 in Burgstädt

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Eingereicht am: 09.12.2021

Verteidigt am: 23.05.2022

Kurzdarstellung

Bei Beurteilung der Tragfähigkeit von Schweißverbindungen werden werkstoffliche und konstruktionsbedingte Einflussgrößen bisher nicht ausreichend differenziert betrachtet. Die Bestimmung des Bemessungswiderstands erfolgt auf Basis der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes oder einer phänomenologisch nicht begründbaren gewichteten Kumulation der Zugfestigkeiten von Grundwerkstoff und Schweißzusatz. Zudem werden Korrelationsbeiwerte verwendet, in denen eine Vielzahl von Einflussfaktoren in einem einzigen Wert subsumiert werden. Eine differenzierte Betrachtung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung und der konstruktionsbedingten Anforderungen an diese erfolgt nicht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Grundlagen für die Bewertung des Einflusses des Schweißprozesses auf die Festigkeiten des Schweißgutes und der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe und deren Herstellungsverfahren sowie einer damit einhergehenden Trennung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung von den konstruktionsbedingten Anforderungen an diese geschaffen.

Aufbauend auf einer Beschreibung metallurgischer und verfahrenstechnischer Grundlagen sowie aktueller Bemessungsregeln von Schweißverbindungen höherfester Stähle werden Modelle zur Bestimmung der Tragfähigkeit von durchgeschweißten Stumpfstößen mit lokaler Entfestigung und Versuchsergebnisse vorangegangener Forschungsvorhaben diskutiert. Dabei werden materielle und geometrische Einflussfaktoren auf die Verbindungstragfähigkeit beschrieben und evaluiert. Anschließend werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Bestimmung der Schweißgut- und Wärmeeinflusszoneneigenschaften von zwei thermomechanisch gewalzten und zwei vergüteten höherfesten Feinkornbaustählen vorgestellt. Es werden die Einflüsse der Materialkombination von Grundwerkstoff und Schweißzusatz, Nahtöffnungswinkel, Lagigkeit und Abkühlzeit $t_{8/5}$, repräsentativ für die Fertigungsparameter, quantifiziert. Weiterführend werden Regressionsmodelle zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der $t_{8/5}$ -Zeit und für die Wärmeeinflusszone zusätzlich in Abhängigkeit der Spitztemperatur T_{\max} entwickelt. Zudem werden die Versuchsergebnisse der Schweißgutuntersuchungen statistisch ausgewertet, um charakteristische Zugfestigkeiten für die Bemessung von Schweißverbindungen festzulegen.

Zur Untersuchung materieller und geometrischer Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit durchgeschweißter Stumpfstöße mit lokaler Entfestigung in der Wärmeeinflusszone und/oder einem Zugfestigkeits-Undermatching des Schweißgutes werden strukturmechanische Parameterstudien mit dem FE-Programm *ANSYS* durchgeführt. Diese bilden die Grundlage für die Entwicklung eines neuen Bemessungsmodells unter Berücksichtigung des Softenings der Wärmeeinflusszone und des Zugfestigkeits-Mismatchings des Schweißgutes sowie deren Breiten. Im Sinne einer einfachen Anwendung werden für ausgewählte Werkstoffe und Abkühlzeiten untere Grenzwerte der Eingangsgrößen des Bemessungsmodells definiert.

Abstract

Material and construction-related parameters have so far been insufficiently differentiated in the assessment of the load-bearing capacity of welded joints. The design resistance is determined on the basis of the tensile strength of the base material or a weighted cumulation of the tensile strengths of the base material and the filler metal that cannot be justified phenomenologically. In addition, correlation coefficients are used that subsume a large number of influencing factors into a single value. There is no differentiated consideration of the mechanical properties of the connection and the construction-related requirements for it. Within the scope of the present work, basic principles are established for the evaluation of the influence of the welding process on the strengths of the weld metal and the heat-affected zone as a function of the materials used and their manufacturing processes. This forms the basis for separating the mechanical properties of the joint from the construction-related requirements.

Based on a description of metallurgical and process engineering fundamentals as well as current design rules for welded joints of high-strength steels, models for determining the load-bearing capacity of fully penetrated butt joints with local softening and test results from previous research projects are discussed. Material and geometric factors influencing the joint load-bearing capacity are described and evaluated. Subsequently, the results of experimental investigation to determine the weld metal and heat-affected zone properties of two thermomechanically rolled and two quenched and tempered high-strength fine-grained structural steels are presented. The influences of the material combination of base material and filler metal, weld opening angle, number of weld layers and cooling time $t_{8/5}$, representative for the manufacturing parameters, are quantified. Further, regression models are developed to describe the mechanical properties as a function of the $t_{8/5}$ -time and for the heat-affected zone additionally as a function of the peak temperature T_{\max} . In addition, the test results of the weld metal examinations are statistically evaluated in order to specify characteristic tensile strengths for the design of welded joints.

In order to examine material and geometric influences on the load-bearing capacity of fully penetrated butt joints with local softening in the heat-affected zone and/or a tensile strength undermatching of the weld metal, structural-mechanical parameter studies are carried out with the FE program *ANSYS*. These form the basis for the development of a new design approach taking into account the softening of the heat-affected zone and the tensile strength mismatching of the weld metal as well as their dimensions. In the sense of a simple application, lower limit values of the input variables of the design model are defined for selected materials and cooling times.