

DISS. ETH Nr. 20680

**Simulation des Presshärteprozesses und  
Vorhersage der mechanischen  
Bauteileigenschaften nach dem Härten**

A B H A N D L U N G  
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

**Bernd Hochholdinger**

Dipl.-Ing., Universität Stuttgart

geboren am 13. Februar 1975

von Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Hora, Referent

Prof. Dr. K. Wegener, Korreferent

2012

# Kurzfassung

Für die realitätsnahe, virtuelle Abbildung des Presshärteprozesses müssen das thermische und das mechanische System in der Simulation gekoppelt betrachtet werden. Die Kopplung der beiden Systeme erfolgt dabei mit einer gestaffelten Vorgehensweise. Auf Basis umfangreicher, experimenteller Untersuchungen erfolgt die Charakterisierung des Fließverhaltens im austenitischen Zustand für den borlegierten Vergütungsstahl 22MnB5 in Abhängigkeit der Temperatur, Dehnrates und der plastischen Dehnung. Die Parameter verschiedener mathematischer Fließmodelle werden mit Hilfe von Simulationen invers ermittelt. Darüber hinaus werden auf Basis von Dilatometerversuchen der temperaturabhängige Wärmeausdehnungskoeffizient für die Erwärmungs- und die Abkühlphase sowie ein ZTU-Diagramm bestimmt. Die Temperaturverteilung und -geschichte im Blech ergeben sich im Wesentlichen aus der thermomechanischen Interaktion des Blechs mit den Werkzeugen. Die Quantifizierung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Blech und Werkzeug in Abhängigkeit der Höhe des Luftspalts und in Abhängigkeit des Kontaktdrucks erfolgt sowohl analytisch als auch mit Hilfe einer inversen Parameteridentifikation. Ausserdem werden die Parameter zur Definition der Wärmekonvektion und der Wärmestrahlung mit Hilfe empirischer Ansätze und aus Versuchsdaten abgeschätzt. Der temperaturabhängige COULOMBSche Reibkoeffizient für den Kontakt zwischen dem untersuchten zinkbeschichteten Blech und den Werkzeugen wird mit Hilfe von Pin on Disk Versuchen ermittelt. Des Weiteren wird die adäquate Modellierung des Blechs und der Werkzeuge in der thermomechanisch gekoppelten Simulation untersucht. Als Resultat dieser Untersuchungen werden unterschiedliche Modellierungsansätze für das Blech und die Werkzeuge im thermischen und mechanischen Teil empfohlen. Zur effizienten Simulation des gesamten Presshärteprozesses wird dieser in einzelne Prozessschritte unterteilt. Für jeden dieser Schritte wird eine spezifische Simulationsstrategie vorgeschlagen. Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise werden die Simulationsergebnisse aller Prozessschritte, sowohl für das direkte als auch das indirekte Presshärteverfahren, am Beispiel eines Demonstratorbauteils

dargestellt. Die realitätsnahe Abbildung des gehärteten Bauteils in nachfolgenden Disziplinen, wie beispielsweise der Crashsimulation, erfordert die Vorhersage der Verteilung der Fliesseigenschaften im Bauteil. Die mechanischen Eigenschaften im Bauteil werden durch die beim Presshärten im Blech erzeugte Mikrostruktur festgelegt. Die quantitative Bestimmung der Gefügezusammensetzung erfolgt entweder mit Hilfe des ZTU-Diagramms für 22MnB5 oder durch Verwendung eines von ÅKERSTRÖM entwickelten, inkrementellen Modells zur Zerlegung des Austenits in die Phasen Ferrit, Perlit, Bainit und Martensit. Für die Vorhersage der Fliesseigenschaften wird ein einfaches, phänomenologisches Modell auf Basis eines HOCKETT-SHERBY Ansatzes vorgeschlagen. Mit Hilfe dieses Modells können, ausgehend von den Gefügeanteilen und den Abkühlgeschwindigkeiten, die resultierenden Fließkurven bestimmt werden. Die Modellparameter werden mit Hilfe von Zugproben, die unterschiedlich schnell abgekühlt wurden, ermittelt. Mit dem vorgeschlagenen Modell werden die Fließkurven für drei Bereiche in einem Versuchsbauteil prognostiziert. Die gute Übereinstimmung zwischen der Prognose und den Messergebnissen unterstreicht das Potential des Modells.

# Abstract

For a reliable virtual assessment of the press hardening process, thermo-mechanically coupled simulations have to be conducted. In this work a staggered solution procedure is employed for the coupling of the thermal and the mechanical system. Based on extensive experimental studies, the plastic flow behavior of the boron-alloyed steel 22MnB5 in the austenitic regime is characterized. Different mathematical models for the definition of the yield stress as a function of temperature, strain rate and plastic strain are examined. The parameters of these flow stress models are determined by inverse analysis. The coefficient of thermal expansion for the heating and the cooling phase is identified by dilatometry. Also based on dilatometer tests a CCT diagram for 22MnB5 is assembled. The temperature distribution and history within the blank are mainly determined by the thermomechanical interaction of the blank with the tools. Therefore the heat transfer coefficient between the blank and the tools is investigated for different contact scenarios. It is either defined as a function of the height of the air gap between the contact partners or as a function of the contact pressure. The determination of the heat transfer coefficient is carried out analytically as well as by inverse analysis. Furthermore input values for the convection coefficient as well as the radiation to the environment are estimated using empirical approaches and experimental data. The temperature dependent COULOMB friction coefficient for contact of the zinc-coated blank with the tools is determined with pin on disc tests in a tribometer. In addition to that the adequate modeling of the blank and the tools for the thermomechanically coupled simulation of the press hardening process is examined. As a result of these investigations, different modeling approaches are recommended for sheet and tools in the thermal and mechanical part of the simulation. To be able to efficiently simulate the complete press hardening process it is broken up in several process steps. For each of these process steps a specific simulation strategy is proposed. In order to illustrate this approach, the direct as well as the indirect press hardening process is simulated for a test part. The simulation results are in good agreement

with the experimental data. In order to correctly consider the strength of a press hardened part in subsequent disciplines, such as crashworthiness analysis, the knowledge of the distribution of the flow stress within the part is required. The mechanical properties of the part are determined by the microstructure, which has evolved during the hardening process. The prediction of the volume fractions of the different phases can be achieved in two ways. The simple way is to evaluate the volume fractions by using the CCT diagram of 22MnB5. The more advanced approach is to employ an incremental model, developed by ÅKERSTRÖM, for the decomposition of austenite into its daughter phases ferrite, pearlite, bainite and martensite. For the prediction of the plastic flow stress a simple phenomenological model, which is based on a HOCKETT-SHERBY approach, is proposed. The model predicts the yield curves based on the phase fractions and the cooling rate. The parameters of the model are determined from tensile tests. The tensile specimens were quenched at various cooling rates. The proposed model was used to predict the flow in different locations of a test part. The good agreement between the prediction and the measured yield curves demonstrates the potential of the proposed model.