

Werkstoffmodelle als Voraussetzung für den breiten Einsatz neuer Stahlsorten

Modellierung und Simulation höher- und höchstfester Stähle

Moderne Stahlsorten erreichen heute hohe Festigkeiten und zum Teil überragende Duktilitäten, die in dieser Kombination noch vor wenigen Jahrzehnten kaum vorstellbar waren. Diese höher- und höchstfesten Stähle bieten zum Beispiel im Automobilbau enormes Leichtbaupotential, da sie mit deutlich weniger Material die gleiche Funktionalität für die Karosseriestabilität und die Energieaufnahme im Crashfall bieten.

Da die computergestützte Simulation heute aus praktisch keinem Bereich der Prozessauslegung und Konstruktion mehr wegzudenken ist, können solche Stähle mittlerweile jedoch nur dann in breiten Einsatz gelangen, wenn ihr Verhalten für die üblichen Simulationswerkzeuge mathematisch beschrieben werden kann. Dafür müssen Werkstoffmodelle entwickelt werden, die den spezifischen Eigenschaften dieser modernen Stähle Rechnung tragen.

Motivation

Aufgrund der intensiven Forschung und Entwicklung im Bereich der Stähle steht dem Konstrukteur heutzutage eine Vielzahl leistungsfähiger Stahlsorten zur Verfügung. In Bezug auf kalt umformbare Stähle seien in diesem Zusammenhang Mehrphasenstähle, niedriglegierte TRIP-Stähle (Transformation Induced Plasticity) sowie hochlegierte Cr-Ni-Stähle (TRIP-Effekt) genannt. Besonders beeindruckende Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften erreichen hochmanganhaltige TRIP/TWIP-Stähle, bei denen je nach Legierungszusammensetzung ein TRIP- oder TWIP-Effekt (Twinning Induced Plasticity) eingestellt werden kann.

Ursache für die hervorragenden mechanischen Eigenschaften moderner Stähle sind entweder ein gezielt eingestelltes oder sich entwickelndes mehrphasiges Gefüge, bestehend aus harten und weichen Phasen, oder die Ausnutzung der dynamischen Mikrostrukturverfeinerung infolge der deformationsinduzierten Entstehung von Phasen- oder Zwillingsgrenzen in TRIP- und TWIP-Stählen.

Die enorme Festigkeitssteigerung von höher- und höchstfesten Stählen in Umformprozessen muss sowohl bei der Auslegung von Fertigungsprozessen, wie zum Beispiel dem Tiefziehen (Stempelkraft, Rückfederung), als auch bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden. Dies setzt die Existenz geeigneter Werkstoffmodelle voraus.

Entwicklung und Anpassung von Werkstoffmodellen

Die Vielfalt an modernen Stählen stellt für den Bereich der Prozess- und Bauteilsimulation eine Herausforderung dar, weil geeignete Werkstoffmodelle benötigt werden, die die grundlegenden Materialeigenschaften abbilden können. Stähle werden normalerweise in polykristalliner Form verwendet; das heißt, sie bestehen aus einer Vielzahl kleiner Kristallite (Körner) in der Größe von wenigen bis etwa 100 µm. Die Orientierungsverteilung der Körner, die Textur, hat entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Polykristalls. Die Textur eines Werkstoffs ändert sich bei plastischer Verformung abhängig von der Belastungsart und den Verformungsmechanismen in den einzelnen Körnern.

Die Unterschiede in der Textur und insbesondere die unterschiedlichen Verformungsmechanismen (Phasenumwandlung, Zwillingsbildung) erfordern daher eine mikrostrukturbasierte Betrachtung der modernen Stahlgüten. Im Wechselspiel mit Experimenten werden daher am Fraunhofer IWM mikro-mechanisch basierte Modelle auf

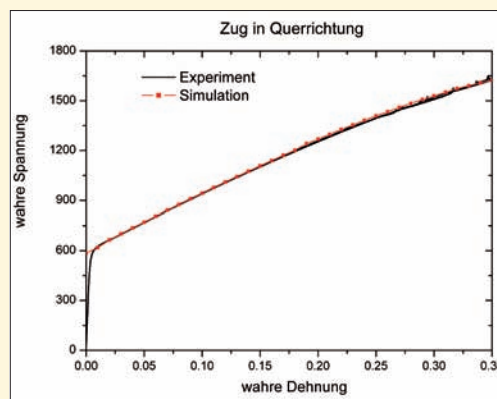


Bild 1

Vergleich zwischen Experiment und Simulation: Zugbeanspruchung nach dem Walzen in Querrichtung.

der Skala der Körner entwickelt. Diese werden mit Homogenisierungsmethoden kombiniert und dann zur virtuellen Bestimmung von Materialeigenschaften verwendet. So kann zum Beispiel der Einfluss der Texturentwicklung auf den Beginn des plastischen Fließens unter wechselnder Beanspruchungsrichtung analysiert werden. An die gewonnenen Daten werden dann geeignete makroskopische Werkstoffmodelle der finiten Elastoplastizität unter Einbeziehung klassischer Verfestigungskonzepte (isotrope und kinematische Verfestigung) angepasst.

Anwendung bei der Prozess- und Bauteilsimulation

Die Anwendung des beschriebenen Konzepts wird im Folgenden anhand hochmanganhaltiger TWIP-Stähle gezeigt: Aufgrund ihrer großen Umformbarkeit bei gleichzeitig hohen Festigkeiten weisen hochmanganhaltige TWIP-Stähle ein großes Potential für innovative Leichtbaukonzepte auf. In diesen Stählen tritt neben der versetzungsbasierten Plastizität zusätz-

lich eine mechanische Zwillingsbildung auf. Diese hat nicht nur einen signifikanten Einfluss auf die Texturentwicklung bereits bei moderaten Dehnungen, sondern beeinflusst auch maßgeblich das Verfestigungsverhalten. Die dynamische Bildung von Zwillingsgrenzen behindert nämlich zunehmend die Bewegung von Versetzungen. Da die Versetzungsbewegung auch im TWIP-Stahl der dominierende Verformungsmechanismus ist, kommt es durch deren Behinderung zu einer beachtlichen Verfestigung.

Autoren

Dr. Dirk Helm
Leiter Formgebungs- und Umformprozesse
Dr. Thomas Hochrainer
Aruna Prakash
Wissenschaftliche Mitarbeiter
Formgebungs- und Umformprozesse
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
Wöhlerstr. 11
D-79108 Freiburg
dirk.helm@iwm.fraunhofer.de
Tel. +49(0)761/5142-158

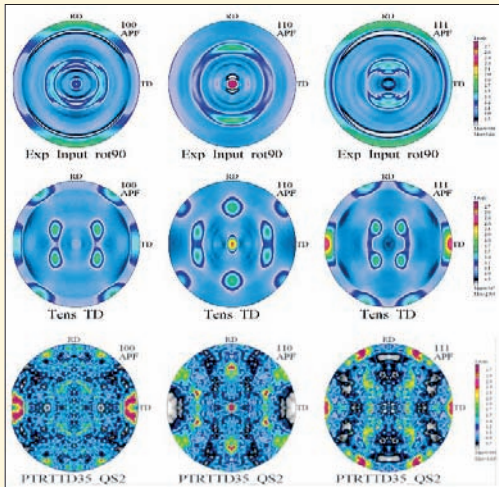


Bild 2

Polfiguren zur Darstellung der Textur. Oben: gemessene Ausgangstextur nach dem Walzen; Mitte: gemessene Textur nach einer zusätzlichen Zugbeanspruchung von 40 % Dehnung; unten: berechnete Textur nach einer zusätzlichen Zugbeanspruchung von 40 % Dehnung.

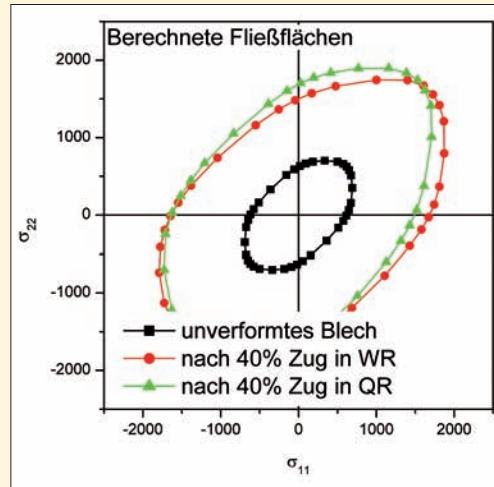


Bild 3

Berechnung der Fließfläche: Ausgangsfließfläche und Fließfläche nach Zugbeanspruchung von 40 % in Walz- und Querrichtung.

Bild 1 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurve eines solchen TWIP-Stahls im Zugversuch an einem Blech. Deutlich sichtbar ist die Steigerung der Festigkeit um den Faktor 2 schon bei einer Dehnung von weniger als 20 %; selbst bei 40 % Dehnung zeigte sich noch keine Tendenz zur Einschnürung.

Das für diesen TWIP-Stahl verwendete mikromechanische Konzept basiert auf einem Modell der Kristallplastizität, bei dem neben dem versetzungs-basierten Gleiten auch die Zwillingsbildung berücksichtig

wird. Als Homogenisierungsmethode wird ein Ansatz gewählt (VPSC: Visco-Plastic Self-Consistent), bei dem jedes Korn als Einschluss in einer Matrix betrachtet wird, die die effektiven Eigenschaften aller Körner repräsentiert. Mit diesem Modell kann für vorgegebene Prozesse die Materialantwort für einen Polykristall inklusive der Texturentwicklung berechnet werden.

Zur verbesserten Simulation des TWIP-Stahls wurde am IWM jüngst ein verfeinertes Zwillings-

modell in das VPSC-Modell implementiert, das insbesondere den verfestigenden Effekt der Zwillingsgrenzen besser berücksichtigt als das von der Software bereitgestellte. Nach Anpassen der Modellparameter an einfache Versuche (Bild 1) ermöglicht dieses Modell die Bestimmung der Fließfläche auch für komplizierte Belastungspfade. Die Textur des Blechs vor und nach dem in Bild 1 wiedergegebenen Zugversuch ist in **Bild 2** dargestellt. Trotz der verhältnismäßig kleinen Deformation (klein im Verhältnis zu den üblicherweise texturbestimmenden Verformungen beim Walzen!) kann in den Polfiguren eine deutliche Texturänderung wahrgenommen werden.

Auf Basis des mikromechanischen Modells und der Homogenisierungsmethode können die makroskopischen Eigenschaften von Kornverbänden schnell berechnet werden. Dies macht beispielsweise die Berechnung der Fließfläche möglich (**Bild 3**). Die Fließfläche definiert den Beginn des plastischen Fließens. Sie bildet die Grundlage für die in makroskopischen Plastizitätsmodellen verwen-

dete Fließfunktion. Auf Basis eines anhand virtueller Experimente angepassten makroskopischen Modells können dann das Verhalten in Produktionsprozessen (zum Beispiel beim Tiefziehen, **Bild 4**) und Bauteileigenschaften (zum Beispiel Trag- bzw. Crashverhalten) berechnet werden.

Fazit

Die vorgestellte Methodik zur Entwicklung maßgeschneiderter Werkstoffmodelle kombiniert physikalisch basierte mikromechanische Ansätze (Kristallplastizität und Homogenisierungsmethoden) mit schnellen makroskopischen Werkstoffmodellen. Durch den verwendeten Modellansatz auf der Skala der Körner ist es möglich, zum einen den experimentellen Aufwand zu reduzieren und zum anderen experimentell schwer zugängliche Materialeigenschaften virtuell zu bestimmen. Der Einsatz leistungsfähiger makroskopischer Modelle ermöglicht dann die Simulation von komplexen Fertigungsschritten und Bauteileigenschaften.

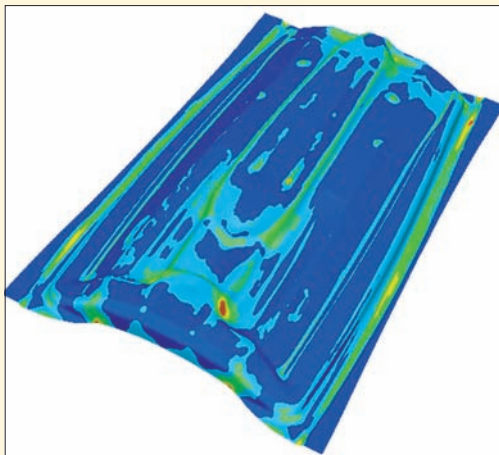


Bild 4

Mehrstufige Tiefziehsimulation eines Dachrahmens einschließlich der Berechnung der Rückfederung.