

Mechanismenbasierte Materialmodelle zur besseren Vorhersage der Schädigung und des Versagens in der Kaltmassivumformung

Ursachen und Einflüsse, die den Werkstoff bei der Massivumformung an dessen Verformungsgrenze bringen, sind zahlreich. Die simulative Prozessauslegung zur Schadensvermeidung spielt daher eine immer größere Rolle. Übliche Versagenskriterien sind oft nicht in der Lage, die Schädigungsentwicklung präzise genug vorherzusagen. Am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg IWM wurde ein Schädigungsmodell entwickelt, welches eine bessere Vorhersage von Schadensort und Versagenszeitpunkt bei Kaltmassivumformprozessen ermöglicht.

AUTOREN



Dr. Maksim Zapara

leitet das Team
Massivumformung am
Fraunhofer-Institut für
Werkstoffmechanik IWM
in Freiburg



Eva Augenstein, M. Sc.

ist wissenschaftliche
Mitarbeiterin des Teams
Massivumformung am
Fraunhofer-Institut für
Werkstoffmechanik IWM
in Freiburg



Dr. Dirk Helm

leitet das Geschäftsfeld
Fertigungsprozesse am
Fraunhofer-Institut für
Werkstoffmechanik IWM
in Freiburg

Die Automobil- und Maschinenbaubranche setzt aufgrund hoher Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit ihrer Produkte häufig kaltmassivumgeformte Bauteile ein und gewährleistet so in Automobilen, Baumaschinen, Flugzeugen oder Schiffen die bestehenden hohen Sicherheitsanforderungen unter anderem in Bezug auf Festigkeit und Lebensdauer. Dabei erfordert die Herstellung komplexer Bauteilformen mehrstufige Umformprozesse, bei denen die Werkstoffe oft an der Grenze der Verformbarkeit umgeformt werden. Zur Auslegung und Optimierung von Umformprozessen kommen standardmäßig Simulationsprogramme auf der Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz. Die im Bereich der Kaltmassivumformung üblicherweise zum Einsatz kommenden Schädigungskriterien werden den speziellen Herausforderungen der Umformprozesse – wie etwa die extrem hohe Umformgrade, die stark wechselnden Belastungsarten und die Materialinhomogenitäten – nicht ausreichend gerecht und sind daher oft nicht in der Lage, die Umformgrenzen infolge duktiler Schädigung zu beherrschen.

PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die Ursache für die duktile Schädigung des Werkstoffs liegt in der Bildung, dem Wachstum und dem Zusammenschluss von Poren (Bild 1). In der industriellen Praxis werden diese tatsächlichen Mechanismen der duktilen Schädigung in der Regel nicht direkt beschrieben, sondern durch einfache phänomenologische Ansätze zur Beschreibung der Umformgrenzen ersetzt, welche ein makromechanisches Schädigungskriterium formulieren, meist in Abhängigkeit des aktuellen Spannungs- oder Verzerrungszustands.

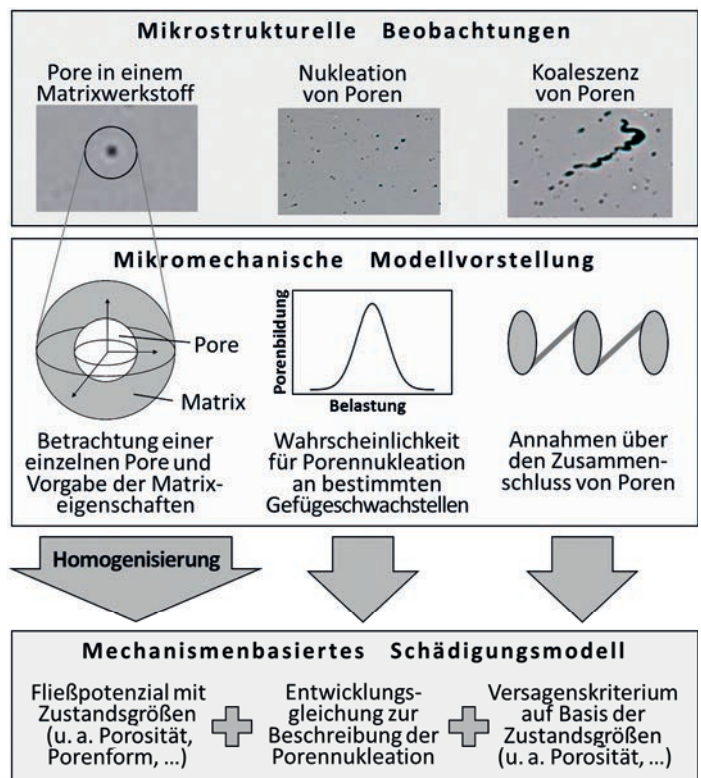


Bild 1: Modellierungskonzept zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung und des Versagens mittels mechanisembasierter Materialmodelle

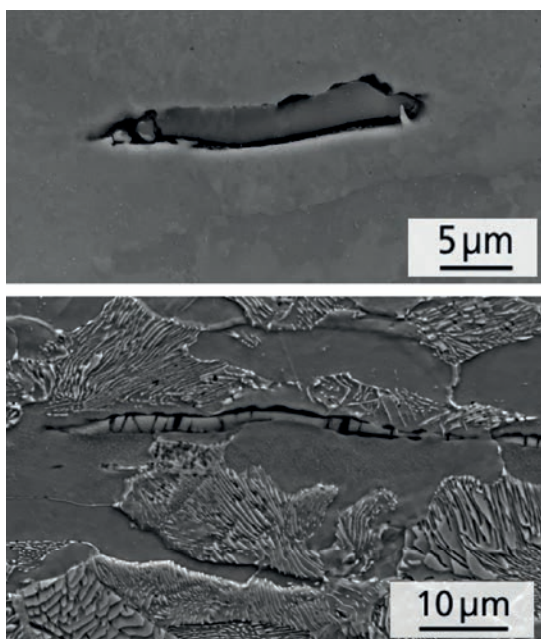


Bild 2: Rasterelektronenmikroskopie an geschädigten Proben aus 20MnCr5, oben: Porennukleation durch Dekohäsion zwischen Teilchen und Stahlmatrix, unten: Porennukleation durch mehrfachen Bruch des Mangansulfids in ferritisch-perlitischer Stahlmatrix

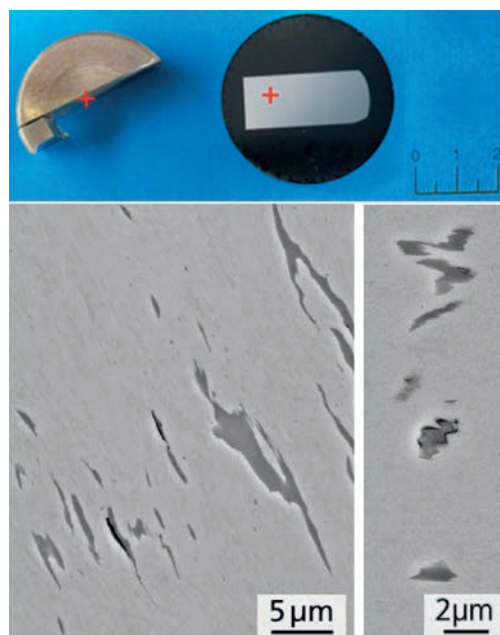


Bild 3: Rasterelektronenmikroskopie an geschädigten senkrecht gestauchten Druckproben aus 20MnCr5 im Längsschliff: Porennukleation bei positivem hydrostatischem Druck durch Dekohäsion zwischen Teilchen und Stahlmatrix infolge kritischer lokaler Belastungen in der Umgebung des Mangansulfids

Im Gegensatz zu diesen Ansätzen werden in der Klasse der mechanischen Schädigungsmodelle die physikalischen Ursachen der duktilen Schädigung direkt modelliert, sodass im Allgemeinen eine höhere Vorhersagefähigkeit gegeben ist. Die bekannten Ansätze von Gurson [1], Gologanu und Leblond [2] oder Ponte Castañeda [3] basieren auf der Annahme, dass in einer Matrix sich eine einzelne Pore befindet: Auf Grundlage der Plastizitätstheorie werden makromechanische Fließpotenziale hergeleitet, welche den Einfluss der Porosität und gegebenenfalls der Porenform auf das plastische Fließen abbilden. Diese Einflüsse werden berücksichtigt und die Wechselwirkung zwischen mechanischem Verhalten und Schädigungszustand ist gegeben. Durch Hinzunahme einer Entwicklungsgleichung zur Beschreibung der Porennukleation wird die Schädigungsinitiierung beschrieben und durch ein Kriterium zur Modellierung der Porenkoaleszenz beziehungsweise der Rissinitiierung wird abschließend das Werkstoffversagen beurteilt (Bild 1).

Trotz der in der Literatur dokumentierten Vorzüge dieser mechanischen Schädigungsmodelle waren die vor Projektbeginn verfügbaren Materialmodelle nicht in der Lage, das Schädigungsverhalten der relevanten Stähle in Prozessen der Kaltmassivumformung vorherzusagen. Die Arbeitshypothese für das IGF-Forschungsprojekt 17678 N „Mechanismenbasierte Materialmodelle zur Vorhersage der Schädigung und des Versagens in der Kaltmassivumformung von Stählen“ bestand folglich darin, eine bessere Vorhersage der Schädigung in der Kaltmassivumformung entsprechend der besonderen An-

forderungen und der eingesetzten Materialien zu realisieren. Mechanismenbasierte Schädigungsmodelle haben grundsätzlich das Potenzial, das Schädigungsverhalten und das Versagen besser vorherzusagen.

LÖSUNGSWEG UND VORGEHENSWEISE

Ausgehend von einem passenden bekannten mechanischen Schädigungsmodell wurden Modellerweiterungen eingebracht, um die experimentell beobachteten Mechanismen der duktilen Schädigung für die relevanten Materialien und Prozesse abbilden zu können. Dazu waren zunächst systematische Untersuchungen der Ursachen für das vorliegende Werkstoffverhalten und der Schädigungsentwicklung in Kaltmassivumformprozessen erforderlich. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Proben und Bauteile auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene im Hinblick auf die mechanischen Fließeigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur und Dehnrage, sowie auch im Hinblick auf die beobachtbaren Schädigungsmechanismen charakterisiert.

Auf der Basis dieser mikrostrukturellen Beobachtungen der Schädigungsmechanismen konnten mathematische Beschreibungen dieser Phänomene entwickelt und als Erweiterungsterme in das bekannte mechanismenbasierte Materialmodell nach Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) implementiert werden.

Durch diese zusätzlichen Entwicklungsterme werden die Abhängigkeiten verschiedener Modellgrößen komplexer, sodass

zur Lösung ein geeigneter Algorithmus zur Berechnung entwickelt werden musste. Um die Voraussetzungen für die Implementierung des Modells in kommerzielle FE-Software zu schaffen, wurde ein impliziter Algorithmus entwickelt und zunächst zur direkten Verwendbarkeit als Benutzer-Routine UMAT in das FE-Programm ABAQUS/Standard (Dassault Systems – Simulia) umgesetzt.

Damit die industrielle Nutzbarkeit des Modells und eine einfache Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe gegeben ist, erfolgte die Anpassung der Modellparameter über ausgewählte, gut zu realisierende Laborversuche, anhand derer das Fließ- und Schädigungsverhalten analysiert werden kann. Durch vergleichende Simulationen dieser Laborversuche wurden die Parameter für die Porennukleationsterme und die Schädigungsentwicklung angepasst und ein geeignetes Versagenskriterium gefunden. Zur Validierung der Leistungsfähigkeit des entwickelten Modells wurden Simulationen der genannten Laborversuche und einiger exemplarischer, mehrstufiger, industrieller Umformprozesse, bei denen es zur Materialschädigung kommt, durchgeführt und mit entsprechenden Rechnungen verglichen, bei denen die üblicherweise verwendeten Schädigungskriterien eingesetzt wurden.

UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die mikrostrukturellen Untersuchungen der Schädigungsmechanismen ergaben, dass im Hauptuntersuchungswerkstoff 20MnCr5 die vorliegenden zeilenförmigen Mangansulfide maßgeblich für die Schädigungsinitiierung verantwortlich sind. Im Zusammenhang mit den Mangansulfiden wurden im Wesentlichen zwei Porenbildungsmechanismen identifiziert, die je nach Belastungsart separat oder in Kombination auftreten können:

- **Dekohäsion:** Bei Belastungen quer zur Orientierung der zeilenförmigen Mangansulfide kommt es zur Ablösung der umgebenden duktileren Stahlmatrix von dem härteren Teilchen (Bild 2, oben).
- **Teilchenbruch:** Eine zu hohe Längsbelastung des spröden Mangansulfids führt zum Zerschneiden des Teilchens (Bild 2, unten).

Ursache dieser schädigungsinitiierenden Wirkung der Mangansulfide sind die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Matrixmaterial und Teilchenmaterial.

Da die beschriebenen Mechanismen der Porennukleation durch Dekohäsion oder Bruch stets von lokalen, direkt am Teilchen angreifenden Belastungen hervorgerufen werden, kann selbst bei insgesamt negativen Spannungstriaxialitäten (beziehungsweise positivem hydrostatischen Druck) Porenbildung initiiert werden, wenn durch Materialinhomogenitäten entsprechende kritische lokale Spannungs- oder Dehnungszustände entstehen (Bild 3). Diese beobachteten Schädigungsmechanismen gehen über die bisherigen Möglichkeiten der bekannten mechanismenbasierten Schädigungsmodelle hinaus. Daher wurden, basierend auf dem

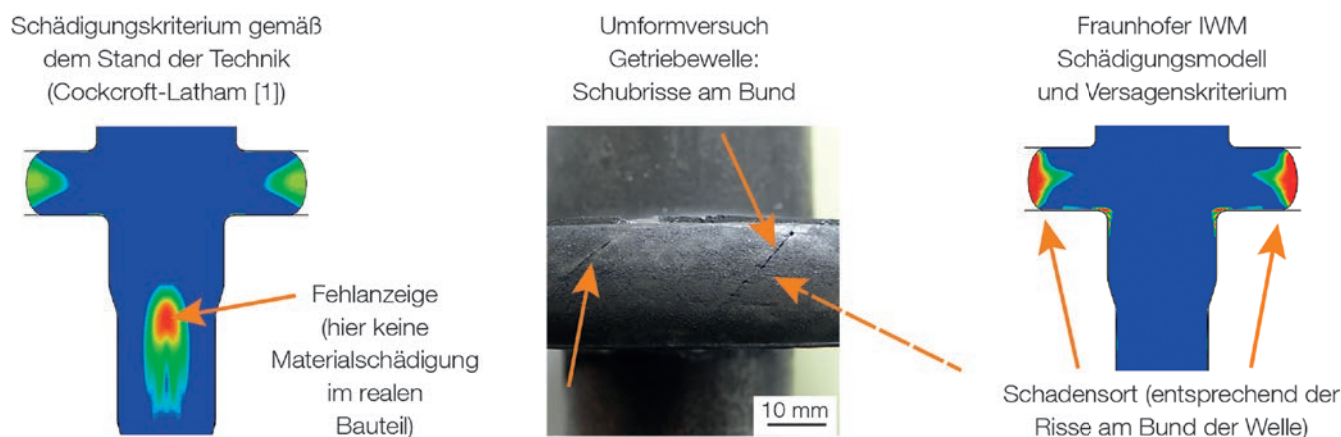


Bild 4: Verbesserung der Schadensvorhersage am Beispiel einer Getriebewelle, mitte: Schadensort im Umformexperiment, links: inkorrekte Schadensvorhersage nach Stand der Technik, rechts: korrekte Schadensvorhersage mit dem Fraunhofer IWM-Modell

Bilder: Autoren

bekanntem GTN-Ansatz, Weiterentwicklungen umgesetzt, welche die Porenbildungsmechanismen insbesondere dann besser beschreiben, wenn Sprödteilchen im Materialgefüge den Auslöser für die Schädigungsinitiierung darstellen.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des entwickelten Schädigungsmodells wurden abschließend Validierungssimulationen mehrstufiger industrieller Umformprozesse und Umformversuche durchgeführt, bei denen es zur Bauteilschädigung kommt. Bild 4 zeigt exemplarisch eine Getriebewelle, bei deren Herstellung Risse an der Außenkante des Bunds auftreten. Der tatsächliche Schadensort im Bund kann mit den bisher industriell etablierten Simulationsansätzen (unter anderem nach Cockcroft und Latham [4]) nicht vorhergesagt werden. Dagegen konnte das entwickelte Materialmodell den Versagensort und den ungefähren Versagenszeitpunkt korrekt vorherzusagen. Das aus den Laborversuchen bestimmte Versagenskriterium in Form eines kritischen Grenzwerts des Porengehalts wird in diesem Beispiel zum tatsächlichen Zeitpunkt der ersten Rissbildung erreicht.

Bei den bekannten Schädigungsmodellen war es bislang im Allgemeinen nicht möglich, nach Anpassen an ausgewählte Versuche beziehungsweise Umformprozesse diese Schädigungskriterien von einem Umformprozess auf den anderen zu übertragen. Es bedurfte stets prozessspezifischer Erfah-

rungen, um Simulationsergebnisse adäquat einschätzen zu können. Das im Rahmen des Projekts entwickelte Modell wurde anhand von Laborversuchen (einfache Zug- und Stauchversuche) angepasst und war bei der Simulation mehrstufiger Umformprozesse in der Lage, sowohl den Schadensort als auch in guter Näherung den Schädigungszeitpunkt vorherzusagen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Motiviert durch die Bedürfnisse der Kaltmassivumformung lag das Hauptziel der Forschungsarbeiten darin, ein praxisgerechtes und zugleich leistungsfähiges Materialmodell zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung und des Versagens zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst eine detaillierte Werkstoffcharakterisierung in Labor- und industriellen Umformversuchen vorgenommen, die eine Aufklärung der Schädigungsmechanismen in relevanten Stählen ermöglichte. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden zur gezielten Weiterentwicklung des bekannten mechanismenbasierten Materialmodells nach Gurson-Tvergaard-Needleman verwendet. Eine Validierung des Materialmodells zur Vorhersage der Schädigungsentwicklung und des Versagens anhand von realitätsnahen industriellen Umformprozessen zeigte, dass das entwickelte Modell in allen betrachteten Versuchen und Umformprozessen den Schadensort oft besser vorherzusagen konnte als die üblichen derzeit verwen-

deten Schädigungskriterien. Außerdem war mit dem entwickelten Schädigungsmodell und angepasstem Versagenskriterium erstmals in guter Näherung eine Vorhersage des Versagenszeitpunkts in den industrienahen mehrstufigen Umformprozessen möglich.

Das entwickelte Material- und Schädigungsmodell wurde als Benutzer-Routine im FE-Programm ABAQUS umgesetzt und wird derzeit auch von Anbietern anderer FE-Software implementiert, um so von kaltumformenden Unternehmen



Die beschriebenen Forschungsergebnisse sind im IGF-Projekt 17678 N der Forschungsvereinigung Stahlverformung erzielt worden, das über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert wurde. Eine ausführliche Dokumentation des Projekts, sowie die Langfassung des Abschlussberichts, inklusive eines Leitfadens zur praxisgerechten Umsetzung der Projektergebnisse in die industrielle Anwendung, können bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

zur Schadensvorhersage und Prozessauslegung verwendet werden zu können.

Ein weiterführendes IGF-Forschungsvorhaben wird mit Fokus auf Vereinfachung der Werkstoffkennwertermittlung durch detailliertere und quantitative Untersuchung der schädigungsinitiierenden Einflüsse gesehen.



[1] Gurson, A. L.: Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Material. *Journal of Engineering Materials Technology* 99 (1977) S. 2–15

[2] Gologanu M.; Leblond, J.-B.: Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids—Case of axisymmetric prolate ellipsoidal cavities. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 41 (1993) S. 1723–1754

[3] Ponte Castañeda; P; Zaidman, M.: Constitutive models for porous materials with evolving microstructures, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 42 (1994) S. 1459–1497

[4] Cockcroft, M. G; Latham, D. J.: Ductility and the Workability of Metals. *Journal of the Institute of Metals*, 96 (1968) S. 33–39