

Praxisorientierte Schadensvorhersage bei mehrstufiger Kaltmassivumformung von Stählen mit nichtmetallischen Einschlüssen

Trotz des aktuell sehr hohen Stands der Technik im Bereich der Sekundärmetallurgie und der Stranggießtechnologie ist eine absolute Eliminierung von nichtmetallischen Einschlüssen (NE) oxidischer und sulfidischer Natur im Stahl aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen noch lange nicht in Sicht. In einem Forschungsprojekt wurde eine Methode entwickelt, die den Einfluss komplexer Belastungen auf NE bewertbar macht. Damit können bei einem immer gegebenen minimalen Anteil an NE im Stahl sowohl kritische als auch günstige Beanspruchungszustände in Bezug auf die Schadenstoleranz quantifiziert werden.

AUTOREN



Dr. Maksim Zapara

ist Leiter des Teams „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.-Ing. Sergey Guk

ist Leiter der Gruppe „Stahl und Schwermetalle“ am Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg



Dipl.-Ing. Frank Hoffmann

ist stellvertretender Leiter der Gruppe „Stahl und Schwermetalle“ am Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg



Dr.-Ing. Ralf Jenning

ist Leiter der Produktentwicklung Schraubentechnologie bei der RIBE Verbindungstechnik GmbH & Co KG in Schwabach



Prof. Dr.-Ing Ulrich Prah

ist Direktor des Institutes für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg

Bei der Herstellung von hochfesten Kaltumformteilen mit komplexen Formen kann es infolge NE in Extremfällen zu hohen Ausschussquoten von Bauteilen kommen. Dies resultiert aus den sehr unterschiedlichen Verformungseigenschaften von NE und des umgebenden Matrixmaterials, welche während der Kaltverformung zu so hohen lokalen Spannungen führen können, dass die Belastungsgrenze des NE-Materials, des Matrixmaterials oder deren Grenzflächen überschritten wird. Kenntnisse über NE und deren Verhalten unter diversen Anwendungsbedingungen (wie Lebensdauer oder Dauerfestigkeit) sind zum Teil sehr fortgeschritten. Hingegen ist der Einfluss von Umformparametern in den einzelnen Prozessschritten der Bauteilfertigung im Sinne der Schädigungsentwicklung um die NE noch nicht geklärt.

Vor diesem Hintergrund wurde in einem Forschungsprojekt mit Hilfe eingehender experimenteller Untersuchungen eine Methode entwickelt, die das bisher ungelöste Problem des Einflusses von komplexen mehrstufigen Kaltumform-

operationen auf stets vorhandene schädigungsinitiierende NE angeht und diesen bewertbar macht. Die experimentelle Anpassung erfolgte unter anderem anhand einer speziellen Laborschmelze mit reduziertem sulfidischem Reinheitsgrad.

MIKROSTRUKTURELLE CHARAKTERISIERUNG DES SCHÄDIGUNGSVERHALTENS

Für praxisrelevante Belastungsarten wurden zuerst die Schädigungsinitiierung und -entwicklung an den NE nach unterschiedlich weit fortgeschrittener Umformung aus den Zug-, Druck-, Torsions- und kombinierten Zug-Torsions-Versuchen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Die Analyse der jeweiligen typischen Schädigungsmechanismen erfolgte dabei abhängig von der Belastungsart, Belastungsrichtung und dem Belastungsfortschritt (Bild 1).

In der Kaltumformung ist vor allem das Schädigungsverhalten an Mangansulfiden (MnS) in dieser Hinsicht äußerst vielfältig und zudem technisch besonders relevant. Aufgrund

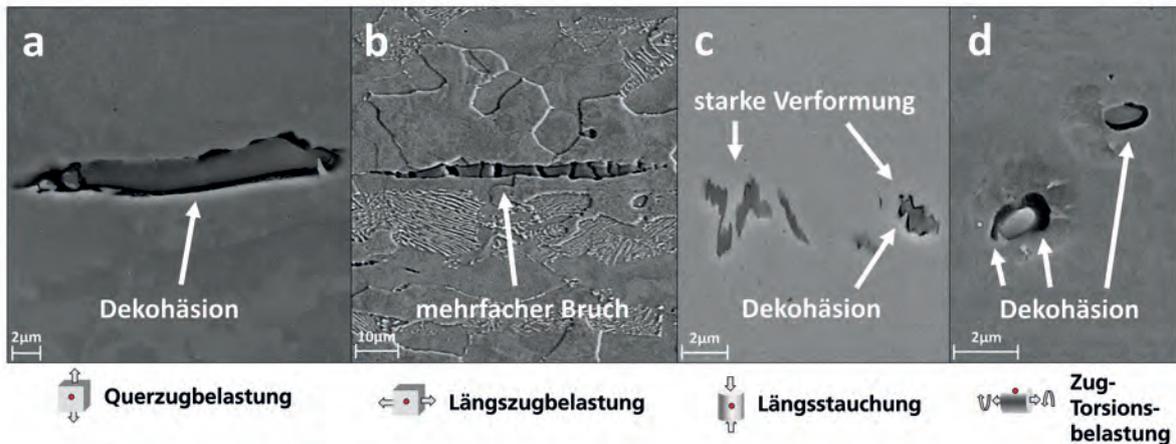


Bild 1: REM-Aufnahmen typischen Schädigungsverhaltens an Mangansulfiden (MnS) in Stahl: Dekohäsion (a), mehrfacher Sprödbbruch (b), starke duktile Verformung mit teilweise lokaler Dekohäsion (c) und Verzerrung in Bildnormalenrichtung aus ursprünglich horizontaler Lage mit allseitiger Dekohäsion (d)

des positiven Einflusses auf die Zerspanbarkeit von Erzeugnissen sind diese in der Regel in verhältnismäßig großer Anzahl vorhanden. Bekanntlich unterliegen sie wegen ihrer mit steigender Temperatur zunehmenden Duktilität oft einer starken Streckung entlang der Umformrichtung bei der Halbzeugherstellung. Daher spielt die Belastungsrichtung während der Weiterverarbeitung bei MnS im Gegensatz zu den nicht verformbaren oxidischen NE eine wichtige Rolle. Ein umfassendes Verständnis dieses komplexen Schädigungsverhaltens basierend auf den experimentellen Ergebnissen aus unterbrochenen und in situ-Versuchen stellte letztlich die Grundlage für dessen simulative Abbildung dar.

ENTWICKLUNG EINES PLATTFORMÜBERGREIFENDEN POSTPROZESSORS

Basierend auf den mikrostrukturellen Beobachtungen wurde ein Bewertungstool entwickelt, welches Zellmodelle verschiedener NE mit realen kritischen Lastpfaden der Bauteilherstellung beansprucht und dann die Schädigung bewertet (Bild 2).

Dazu wird ausschließlich freie Software verwendet: Das Bewertungstool besteht aus einem Framework von Python-Skripten, die eine Serie von Zellmodell-Simulationen mit dem nichtkommerziellen FE-Solver CalculiX starten und anschlie-

ßend deren Ergebnisse auswerten und hinsichtlich einer Schädigung bewerten. Verschiedene in der Mikrostruktur anzutreffende Größen, Formen, Orientierungen und Gruppierungen der NE können die Skripte weitgehend automatisiert erzeugen. Mit einem Skript werden Belastungspfade ausgewählter Finite-Elemente aus zuvor durchgeführten, makroskopischen Umformsimulationen auf verschiedene Zellmodelle aufgebracht. Anschließend findet die Bewertung der resultierenden Schädigung an den unterschiedlich gearteten Einschlüssen statt. Mithilfe des entwickelten Tools können unabhängig von der für die Bauteilsimulation verwendeten FE-Software folgende Fragestellungen simulativ beantwortet werden: „Wie kann der Umformprozess optimiert werden, um bestimmte kritische Belastungen zu verringern?“ und „Kann ein Weichglühen des Materials die Umformeigenschaften so weit verbessern, dass das Bauteil auch mit größeren NE-Clustern schadensfrei gefertigt werden kann?“

PRAKTISCHE VALIDIERUNG

Anhand des im Labor speziell erschmolzenen Werkstoffs 16MnCrS5-4-10 wurde ein Drahthalbzeug in Form von warmgewalzten Stäben erzeugt. Die gewalzten Stäbe wurden anschließend vorgezogen und in den Lieferzustand U(+AC)+C+AC+LC überführt, um abschließend zu Schraube M6 mit Innensechsrund verarbeitet zu werden. Als Referenzwerkstoff fungierte dabei der

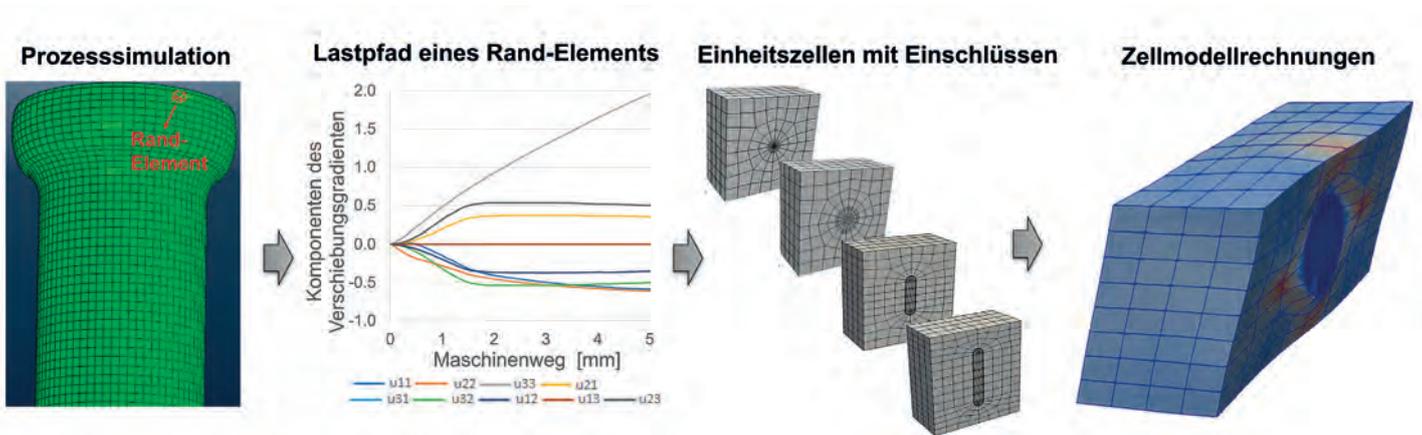


Bild 2: Simulative Bestimmung der Schädigungsentwicklung bei verschiedenen Einschlussmorphologien und Werkstoffeigenschaften in einem kritischen Rand-Element aus der Prozesssimulation

industrielle Stahl 19MnB4, der im gleichen Wärmebehandlungszustand zur Abpressung der Validierungsbauteile zur Verfügung stand. Die Auswertung des makroskopischen Reinheitsgrades mit dem K-Verfahren nach DIN EN 10247:2017-09 ergab, dass die Summenkennwerte bei $K1 \leq 11 / K6 = 0$ für 16MnCrS5-4-10 beziehungsweise $K1 \leq 1 / K5 = 0$ für 19MnB4 liegen. Daraus ist abzuleiten, dass die Anzahl der sulfidischen Einschlüsse mit zirka 11 Stück pro 1 mm² bei der Laborschmelze kritisch für die Weiterverarbeitung sein kann, wobei größere, besonders schädliche Einschlüsse der Größenklasse 5 im Gefüge zu verzeichnen sind. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl der sulfidischen Einschlüsse des industriellen Stahls äußerst gering. Weiterhin sind größere, besonders schädliche Einschlüsse der Größenklasse 5 und größer darin nicht vorhanden.

Die Herstellung einer Schraube M6 mit Innensechsrund erfolgte an zwei unterschiedlichen Pressen: einer Doppeldruckpresse sowie einer Mehrstufenpresse. Während die Doppeldruckpresse eine einzige Matrize aufweist und mit zwei Schlägen arbeitet, weist die Mehrstufenpresse zwei Matrizen auf und produziert mit drei Schlägen. Die Anzahl von abgepressten Bauteilen pro Werkstoff betrug jeweils zirka 500 Stück an jeder Presse. Das Ergebnis der Abpressung lässt sich in Bild 3 erkennen: Während Teile aus dem Referenzwerkstoff an den beiden Pressen hergestellt werden konnten, hing die Qualität der Teile aus der Laborschmelze maßgeblich von der Auswahl der Presse ab. Dabei traten Versagensfälle in Form von Kopfrissen dar, die meist vom Kraftangriff (ISR) ausgingen.

Werkstoff	Doppeldruckpresse	Mehrstufenpresse
Laborschmelze 16MnCrS5-4-10		
Industrieller Referenzwerkstoff 19MnB4		

Bild 3: Gegenüberstellung von einzelnen abgepressten Teilen; Vergleich Doppeldruck-/Mehrstufenpresse

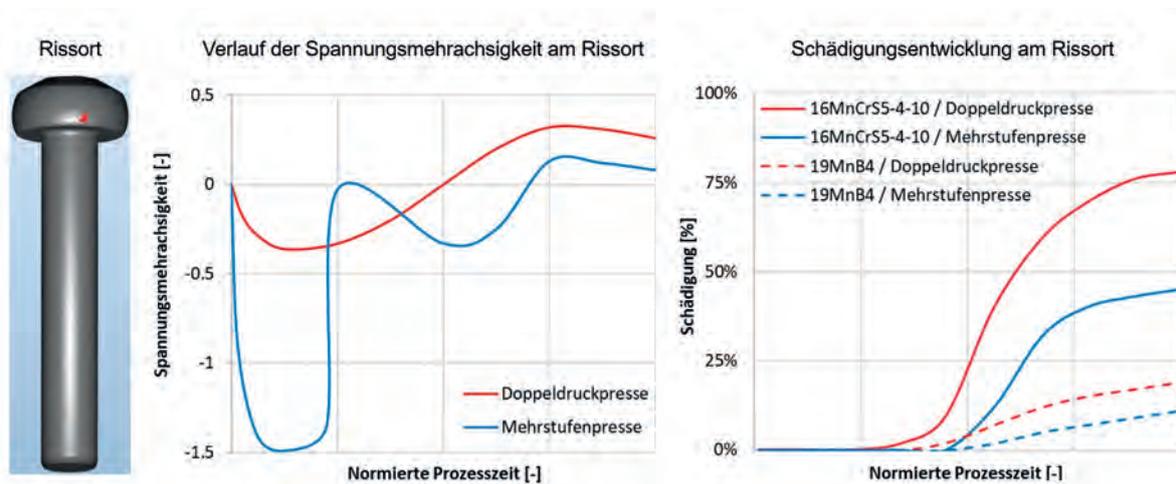


Bild 4: Simulierter Verlauf der Spannungsmehrachsigkeit und Gesamtschädigung am potenziellen Rissort im Schraubenkopf (siehe den roten Punkt) bei Validierungsversuchen an der Doppeldruckpresse und der Mehrstufenpresse, Bilder Autoren

Nach der Fertigung werden die Risse als tolerabel angesehen, wenn sie die Grenzwerte nach DIN EN 26 157 Teil 3 nicht überschreiten und keine massiven Öffnungen an der Bundaußenkante auftreten, die den Montageprozess beeinträchtigen. An der Mehrstufenpresse traten zulässige Oberflächenfehler bei der Laborschmelze vereinzelt auf. Im Gegensatz dazu zeigten die an der Doppeldruckpresse gefertigten Teile überwiegend nicht zulässige Oberflächenfehler im Kopfbereich. Um die Unterschiede in den Versagensfällen zu verdeutlichen, sind in Bild 3 die Ergebnisse anhand stereomikroskopischer Aufnahmen wiedergegeben. Daraus wird erkennbar, dass für ein unregelmäßiges Auftreten von Kopfrissen beim Kopfstauchen meist die Drahtqualität, und zwar die hohe Einschlussdichte verantwortlich ist. Wie lichtmikroskopische Aufnahmen zeigen, erstreckt sich bei den Kopfrissen keine Längsriefe über die Drahtlänge, sodass kein negativer Einfluss von beispielsweise randnahen Schlacken zu verzeichnen ist. Außerdem stellt eine Erweiterung der Umformung um wenigstens eine Stufe mehr insbesondere bei hohen Umformgraden und in Verbindung mit dem Kaltumformvermögen des Werkstoffs oft eine valide Option dar, den Prozess hinsichtlich dieses Fehlerbildes robuster zu gestalten.

Die Messungen der HV5-Härteprofile im Schraubenkopfbereich belegten, dass unabhängig vom eingesetzten Werkstoff die Doppeldruckpresse eine vor allem größere, aber auch homoge-

nere Verfestigung des Schraubenkopfes im Vergleich zur Mehrstufenpresse herbeiführt. Daraus lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Festigkeit des Kornes vermehrt Korngrenzen und vor allem örtliche Werkstofffehler wie NE aufgrund des niedrigen makroskopischen Reinheitsgrades wie bei 16MnCrS5-4-10 zu Schwachstellen werden. Diese Erkenntnis stimmt sehr gut mit der am Rissort numerisch ermittelten Spannungsmehrachsigkeit (Quotient aus hydrostatischer Spannung und von Mises Vergleichsspannung) überein (Bild 4).

So zeigt die Simulation, dass sich der kritische Bereich im Schraubenkopf bei der Herstellung an der Mehrstufenpresse unter deutlich höherem hydrostatischem Druck befindet als an der Doppeldruckpresse. Dabei liegt die Spannungsmehrachsigkeit beim 1. Schlag an der Mehrstufenpresse bei mindestens -1,5, beim 2. Schlag bei mindestens -0,3 und beim 3. Schlag im positiven Bereich bei maximal 0,15. Im Gegensatz dazu weist die Spannungsmehrachsigkeit bei der Herstellung an der Doppeldruckpresse die Werte von mindestens -0,3 beim 1. Schlag bis maximal 0,3 beim 2. Schlag auf. Das führt im Umkehrschluss zur erhöhten Anzahl an potenziellen lokalen Schädigungsorten, die entweder im Inneren des Schraubenkopfes außerhalb des ISR-Angriffes oder im Bereich des Kopf-Schaft-Übergangs der Schraube liegen. Die Simulationsergebnisse in Bild 4 zeigen, dass bei der Anwendung der Doppeldruckpresse die Gesamt-



Cogne Edelstahl GmbH

ROSTFREIE STAHL SPEZIALITÄTEN AUS DEM AOSTATAL

Hochwertige Stähle für hochwertige Anwendungen: Automobil-, Luftfahrt und Petrochemische Industrie sowie der Maschinen- und Anlagenbau zählen seit Jahren auf unsere Produkte.

- Rohstahl- und Halbzeug
- Stabstahl geschmiedet oder gewalzt
- Walzdraht

Cogne Edelstahl GmbH | Carl-Schurz-Straße 2 | 41460 Neuss | sales.germany@cogne.de

www.cogne.de

schädigung am Rissort für die beiden Stähle fast doppelt so hoch ist wie an der Mehrstufenpresse. Zum Rissort ist noch zu bemerken, dass der Kopf-Schaft-Übergang aufgrund des Faserverlaufs im Kopfbereich von Schrauben und einer dort generell größeren Faserdichte mit zunehmender Sulfidzeiligkeit zu einer ausgeprägten Schwachstelle wird.

FAZIT

Die Machbarkeit der erarbeiteten Methode wurde anhand des Vergleichs des Verhaltens von zwei Werkstoffen mit unterschiedlichem Einschlussgehalt demonstriert. Die Validierungsversuche an Schraube M6 konnten den primären Einfluss des vorliegenden hydrostatischen Spannungsanteils sowie den sekundären Einfluss des Werkstoffes auf die makro- und mikroskopische Schädigung unter industriellen Bedingungen aufzeigen. Es konnte bei den industriellen Versuchen experimentell belegt werden, dass selbst bei Werkstoffen mit sehr niedrigem makroskopischem Reinheitsgrad die optimale Auslegung des Stadienplanes zur Fertigung eines Bauteils durch Kaltmassivumformung zu einer Reduzierung der Ausschussquote beitragen kann.



Das IGF-Vorhaben Nr. 20429 BG der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk
Mittelstand