

PROJEKTBERICHT

Standardisierung der mechanischen Charakterisierung und Quantifizierung von Materialkennwerten zur Modellierung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Halbzeugen aus hochleitfähigen Cu-Legierungen

Hersteller von stromleitenden Bauteilen, wie zum Beispiel Steckverbinder, sind bestrebt, immer kleinere Geometrien umzusetzen, um die gewünschten Funktionen zu erfüllen. Durch die Miniaturisierung der Elemente können Bauraum und Gewicht eingespart werden, aber das leitende Material muss dadurch mit immer kleineren Querschnitten elektrische Ströme und mechanische Kräfte übertragen. Damit steigen die Stromdichte und die mechanische Spannung. Eine Vorhersage des Werkstoffverhaltens unter gesteigerten Anforderungen an das Material wird immer häufiger über die Simulation des Werkstoffverhaltens getroffen. Gerade bei Steckverbindern spielt dabei die Spannungsrelaxation eine entscheidende Rolle, denn die Erwärmung durch die Umgebungsbedingungen bspw. im Motorraum und die Eigenerwärmung durch die Leitung hoher Ströme durch kleine Querschnitte führen dazu, dass Spannungsrelaxation in Steckverbindern auftritt und die kraftschlüssige Verbindung mit der Zeit nachlassen kann. Die Zuverlässigkeit von Steckverbindern kann aber nur dann über eine Werkstoffsimulation beurteilt werden, wenn die einfließenden Werkstoffkennwerte mit hoher Genauigkeit und standardisiert ermittelt werden. Derzeit gibt es für Kupferwerkstoffe in Deutschland noch keinen einheitlichen Standard, mit dem branchenübergreifend Werkstoffkennwerten wie quasistatische Zugversuchsdaten und Relaxationsdaten ermittelt werden.

Das gemeinsam von fem und IWM durchgeführte Forschungsprojekt IGF 18597 N hat Werkstoffkennwerten für den Beispielwerkstoff CuNi1.5Si erhoben, aus denen am Fraunhofer IWM das Werkstoffmodell, das im Vorgängerprojekt IGF 17278 N erstellt worden ist, weiterentwickelt wurde. Validiert wurde die aus den Arbeiten abgeleitete Simulation der Spannungsrelaxation in einem Validierungsversuch, für den der weit verbreitete Cantileverversuch herangezogen wurde. Zusammen mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde aus den im

Projekt erarbeiteten Ergebnissen und der validierten Vorgehensweise ein Entwurf für ein Prüfmerkblatt erarbeitet, mit dem die standardisierte Werkstoffdatenerhebung auf alle gängigen Kupferlegierungen übertragbar sein wird und die an die branchentypischen Herstellverfahren von Kupferhalbzeug angepasst ist. Der Richtlinienentwurf orientiert sich dabei an der Vorgehensweise, die in der Stahlbranche bereits validiert ist.

Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojektes sind:

- > Die Eigenspannungen wurden nach mehreren Prozessschritten auch über die Tiefe ermittelt. Die gemessenen Eigenspannungen sind allgemein sehr niedrig, sodass ein geringer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu erwarten ist
- > TEM-Untersuchungen zeigten Ni-Si-Partikel in allen untersuchten Probenzuständen. Der Probenzustand ausgelagert bei 400°C über 10h zeigt Partikel mit einem mittleren Durchmesser von ca. 20 nm
- > In umfangreichen mechanischen Tests wurde das Verformungsverhalten der Cu-Legierung unter Zugbeanspruchung charakterisiert. Es konnte der Einfluss der Dehnrates (Dehngeschwindigkeit), der Temperatur sowie der Orientierung zur Walzrichtung auf das Verformungsverhalten gezeigt werden. Die Versuche lieferten außerdem eine Datenbasis für die Anpassung des IWM-Modells zur Abbildung des Relaxationsverhaltens
- > Zur Berechnung der Phasenbildung in CuNiSi-Legierungen wurden die thermodynamischen und kinetischen Parameter in eine Datenbank überführt, die in Thermocalc und Matcalc eingelesen werden kann. Der Einfluss der Versetzungsdichte auf die Ausscheidungskinetik lässt sich mittels Matcalc gut abschätzen. So bilden sich mit zunehmender Verformung/Versetzungsdichte beim Auslagern Ausscheidungen in größerer Anzahl und in kürzerer Zeit
- > Es wurde ein neues Modell zur Abbildung der experimentell beobachteten Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehung vorgestellt. Mit diesem ist es möglich, die quasistatischen mechani-

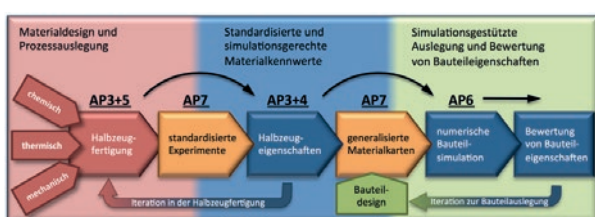


Abb. 1 | Arbeitspakete und -abläufe des Forschungsprojekts

schen Werkstoffeigenschaften der Anfangsfließspannung und der Verfestigung infolge einer plastischen Verformung in Abhängigkeit von der Ausscheidungsmikrostruktur in hoher Genauigkeit abzubilden (Abb. 2). Zudem wurde die Temperaturabhängigkeit der Verfestigung für verschiedene Auslagerungszustände analysiert und modellhaft beschrieben

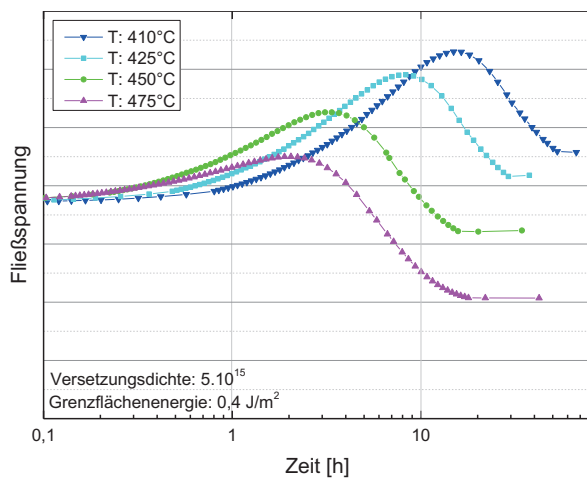
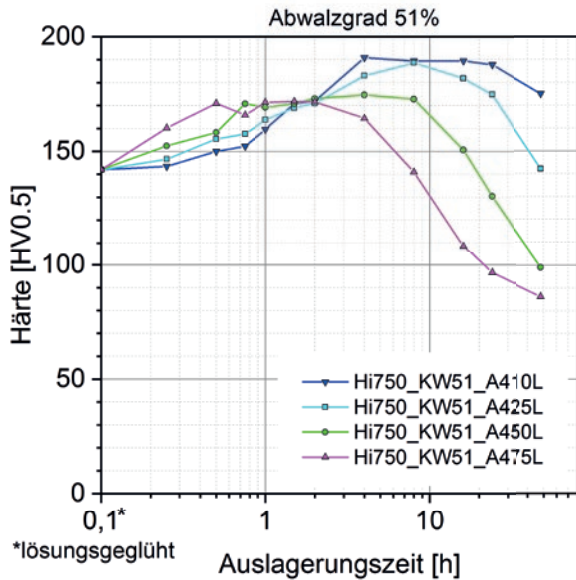


Abb. 2 | Entwicklung der Härte (oben), simulierte Fließspannung (unten) mit zunehmender Auslagerungsdauer für unterschiedliche Temperaturen

- > Die Anisotropie des Verformungsverhaltens (Fließkurven und r -Werte) von ausscheidungshärtbaren gewalzten Cu-Legierungen wurde charakterisiert. Darüber hinaus wurden im Projekt die Materialparameter des im IWM-Modell implementierten Hill'48-Modells bestimmt, mit denen das anisotrope Verformungsverhalten der Cu-Legierungen in guter Näherung abgebildet werden kann
- > Das Relaxationsverhalten der ausscheidungshärtbaren gewalzten Cu-Legierungen wurde mit dem im IWM-Modell implementierten Perzyna-Ansatz über den gesamten untersuchten Temperaturbereich insbesondere im Bereich niedriger Dehnraten (quasistatische Belastung) sehr gut und in bisher nicht erreichter Genauigkeit abgebildet

> Die sehr gute Abbildungsgenauigkeit bezüglich des Relaxationsverhaltens nimmt für steigende Dehnraten oder Temperaturen sukzessive ab, liegt dabei allerdings durchgängig über der Genauigkeit vergleichbarer Modelle. Das Gleiche gilt für die Abbildung der Langzeitrelaxation: diese kann mit dem IWM-Modell im Vergleich zu anderen Modellansätzen besser abgebildet werden

> Für die Übertragung von identifizierten Parametern in FE-Simulationen wurde ein Format für eine generalisierte Materialkarte erstellt. Mit diesem Dateiformat ist es möglich, in einer allgemein und direkt nutzbaren Form die in isothermen Versuchen temperaturabhängig identifizierten Materialparameter für CAE-Simulationen von Bauteilen und Prozessen programmübergreifend zur Verfügung zu stellen

> In numerischen Studien wurde gezeigt, dass nach Abzug des spontanen Kraftverlusts zu Beginn der Experimente mit dem IWM-Modell und den validierten Modellparametern das in den Cantilever-Versuchen gemessene Relaxationsverhalten sehr gut vorhergesagt werden konnte. Dabei wurde außerdem festgestellt, dass es weiteren Aufklärungsbedarf für die Ursache des Kraftverlusts im Experiment gibt, da der Verlauf des spontanen Kraftverlusts des Experiments in den Simulationen erst durch die Berücksichtigung einer begrenzten Steifigkeit vom Versuchsaufbau qualitativ reproduzierbar war

> Es wurde ein Entwurf für ein Prüfmerkblatt erstellt

Schlussfolgerungen und Ausblick

Für die Abbildung des Materialverhaltens in der Simulation sind geeignete Experimente notwendig. Im Vergleich zum Vorgängerprojekt IGF 14129 N wurde am fem die Versuchsführung verbessert, um die Aufzeichnungsgenauigkeit im erforderlichen Maße zu erhöhen, sodass nun wesentlich bessere Versuchsdaten zur Verfügung standen. Das Beispiel der Validierung des Modells im Cantileverversuch zeigt zudem auf, welche Schwierigkeiten aus der Versuchsführung erwachsen können. Für die Simulation des Werkstoffverhaltens ist eine möglichst umfassende Kenntnis des Versuchsablaufs und aller Einflussgrößen notwendig, um diese Experimente in der Simulation nachvollziehen zu können.

In numerischen Studien konnte zudem gezeigt werden, dass im Cantilever-Versuch eine geringe Änderungen der Lagerung (Proben spitze) sich signifikant auf die Messergebnisse der Spannungsrelaxation auswirken kann. Das zeigt die Notwendigkeit, den Cantilever-Versuch bezüglich der erkannten Stör- und Einflussfaktoren weiter zu optimieren, um im Anschluss mit diesem Materialparameter in einer vergleichbaren Genauigkeit bestimmen zu können, wie dies in den aufwendigeren uniaxialen Relaxationstests möglich ist.

Versuche wie der Mandrellversuch oder der Cantileverversuch sind sehr weit verbreitet und mit relativ geringem Aufwand durchzuführen. Es können zudem mehrere Proben gleichzeitig gemessen werden, wodurch der Versuch sehr ökonomisch ist. Im Gegensatz dazu stellt der uniaxiale Relaxationsversuch, wie er hier durchgeführt wurde, hohe Ansprüche an die Messtech-

nik. Es wäre daher begrüßenswert, wenn die Simulation von Relaxationsversuchen auf Basis der einfacheren Versuche (siehe auch ASTM E328) in ähnlicher Genauigkeit gelingen könnte. In dem hier beschriebenen Projekt konnten erste Schritte in diese Richtung vorgenommen werden. Weitere Forschungsarbeit zur Verknüpfung der Relaxationsdaten aus Biegeversuchen (Cantilever, Mandrell, Ringmethode etc.) mit uniaxial ermittelten Messergebnissen kann hier einen Durchbruch zur quantitativen Auswertung der Versuchsergebnisse und Implementierung dieser in Materialmodellen ermöglichen.

Die Forschungsstellen IWM und fem planen Forschungsarbeit zur Verknüpfung der Daten aus Cantilever und Mandrellversuch mit uniaxialen Relaxationsversuchsdaten. Dabei sollen Methoden des Machine Learning genutzt werden. Die Cantileverversuche sollen in diesem Fall vor allem am fem in einem eigenen Versuchsstand generiert werden, wodurch eine Kontrolle der Einflüsse auf die Versuchsführung vor Ort ermöglicht wird.

In zukünftigen Arbeiten ist geplant, die Abbildungsgenauigkeit für höhere Dehnraten und längere Zeiträume als die im Projekt untersuchten Versuchszeiten bis 100 h weiter zu verbessern. Hierzu ist der maßgebende Mechanismus, der zu einer abnehmenden Genauigkeit bei hohen Dehnraten und hohen Temperaturen führt, im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten zielgerichtet zu untersuchen. Gegebenenfalls und aufgrund neu gewonnener Erkenntnisse wäre das IWM-Modell um die bisher noch nicht erfassten Abhängigkeiten mit Auswirkung auf das zeitabhängige Materialverhalten zu erweitern.

Den vollständigen Abschlussbericht erhalten Sie auf Anfrage.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18597N der Forschungsvereinigung Verein für das Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie (fem) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PROJEKT: IGF 18597 N

LAUFZEIT: 1.12.2015 – 31.5.2018

Projektbegleitender Ausschuss

Herborner Drahtbüro | Wieland Werke AG | Robert Bosch GmbH | DMA Sundwiger Messingwerk GmbH & Co. KG | Gebrüder Kemper GmbH & Co. KG | Lumberg Connect GmbH | Schaltbau GmbH | Berkenhoff GmbH | KMD Group | KME Germany GmbH & Co.KG | Aurubis Stolberg GmbH & Co. KG | DKI Deutsches Kupfer Institut | Multi-Contact | Stepper GmbH & Co.KG | Sensoplan GmbH | Feindrahtwerk Adolf Edelhoff GmbH & Co. KG

Forschungspartner

IWM | Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik | Wöhlerstraße 11 | 79108 Freiburg

Ansprechpartner

fem | Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie | Katharinenstraße 17 | 73525 Schwäbisch Gmünd
Dr. Miriam Eisenbart, eisenbart@fem-online.de, T +49 7171 1006-704