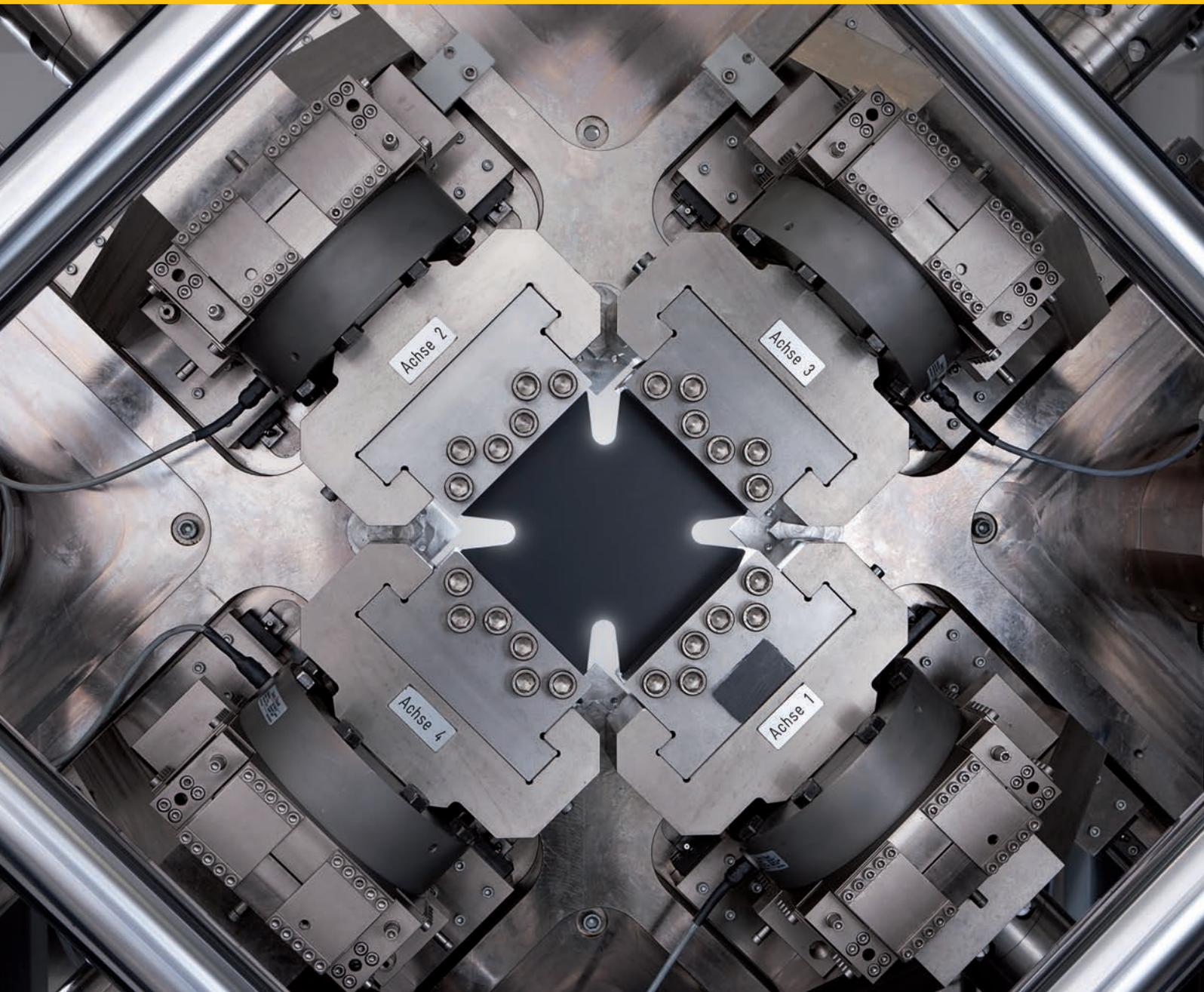


WERKSTOFFPRÜFUNG UND WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG



MECHANISCH- UND THERMISCH-PHYSIKALISCHE WERKSTOFFKENNWERTE

Die Bestimmung relevanter Werkstoffkennwerte, die das Werkstoffverhalten unter realen Prozessbedingungen exakt beschreiben, seien es die bei der Verformung entstehenden oder die verwendeten Umformtemperaturen, die Umformgeschwindigkeiten oder die Umformgrade, hat eine essentielle Bedeutung.

Für eine realitätsgetreue Abbildung der Umformvorgänge in der FE-Simulation müssen neben den das Umformvermögen des Blechwerkstoffs beschreibenden Kennwerten auch die den Prozess beeinflussenden Kennzahlen wie Reibwerte, Wärmeübergangszahlen, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Wärmeausdehnungskoeffizienten für den Werkstück- und Werkzeugwerkstoff bestimmt werden. Nur die gewissenhafte Ermittlung aller den Umformvorgang charakterisierenden Parameter ermöglicht eine präzise Vorhersage der Ergebnisse durch die FE-Simulation.

Am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU wurde ein Konzept zur ganzheitlichen Betrachtung des Umformvorganges unter Berücksichtigung der für die FE-Simulation relevanten Kennwerte entwickelt. In diesem Konzept werden eingeführte Testmethoden und neue innovative Charakterisierungskonzepte zur Beschreibung der Phänomene Rückfederung, Anisotropie und Bauschinger-Effekt zusammengeführt. Darauf aufbauend können die Wechselwirkungen zwischen Blechwerkstoff, Schmierstoff und Umformwerkzeug mit Hilfe der FE-Simulation präziser beschrieben werden.

Für Werkstoffuntersuchungen steht modernstes Equipment aus standardisierten und speziell entwickelten Prüfaufbauten zur Verfügung. Die vorhandene Ausstattung und die langjährige Erfahrung im Bereich der Werkstoffprüfung erlauben es uns, flexibel auf Kundenanfragen zu reagieren und mit maßgeschneiderten Versuchseinrichtungen auch komplexe Belastungssituationen für die Komponentenprüfung zu realisieren.

Im Folgenden werden einige der am Institut eingesetzten Standard-Prüfmethoden vorgestellt. Bei der Auswahl, der Modifikation oder der Neuentwicklung eines geeigneten Verfahrens für Ihren spezifischen Belastungs- oder Anwendungsfall unterstützen Sie unsere kompetenten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gern.

Am Fraunhofer IWU werden zur experimentellen Ermittlung von mechanisch-physikalischen Werkstoffkennwerten moderne PC-gesteuerte Prüfmaschinen verwendet. Auf der Grundlage von Zug- und Druckversuchen an Flachproben, Probestäben bzw. Stauchproben können Umformkennwerte sowie Umformcharakteristiken bestimmt werden:

- Elastische Kennwerte (E-Modul, Poisson-Zahl)
- Plastische Kennwerte (Gleichmaßdehnung, Verfestigungsexponent, Bruchdehnung)
- Festigkeitskenngrößen (Streckgrenze, Zugfestigkeit)
- Spannungs-Dehnungs-Diagramme
- Anisotropiekennwerte (r-Werte)
- Kaltfließkurven
- Warmfließkurven (RT bis 1100 °C)

Richtlinien für die Durchführung der Zugversuche bilden die Normen EN ISO 6892-1 für Raumtemperatur und EN ISO 6892-2 für erhöhte Temperaturen. Die Dehngeschwindigkeiten während des Versuches werden durch eine optische ortsauflösende Dehnungsmessung gesteuert. Zur exakten Ermittlung des Fließbeginns wird die durch eine Thermokamera detektierbare Temperaturänderung (Joule-Thomson-Effekt) ausgenutzt.

Mit speziell entwickelten Prüfaufbauten ist darüber hinaus die Ermittlung mechanischer Kennwerte im Zug- und Druckversuch bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten möglich.

Die Härtebestimmung an Werkstücken und Bauteilen kann durch verschiedene Härteprüfverfahren mit statischer Krafterwirkung erfolgen. In Abhängigkeit vom zu prüfenden Werkstoff werden Härtewerte nach Brinell, Vickers oder Rockwell im Mikro- und Kleinlastbereich ermittelt. Des Weiteren können Härteverläufe (zum Beispiel Härtetiefen wärmebehandelter Teile) aufgenommen sowie Umwertungen von Härtewerten vorgenommen werden.

- 1 *Warmzugversuch mit Hochtemperaturextensometer*
- 2 *Versuchsdurchführung am Dilatometer*



Zur Ermittlung von thermisch-physikalischen Werkstoffkennwerten steht am Fraunhofer IWU eine Vielzahl von Prüfeinrichtungen zur Verfügung, die letztendlich der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nach $\lambda(T) = a(T) \cdot c_p(T) \cdot \rho(T)$ dienen. Mit den nachfolgend aufgeführten Prüfeinrichtungen können diese prozessunabhängig für eine thermomechanisch gekoppelte Simulation gewonnen werden.

Dilatometer

Diese Messgeräte finden Anwendung bei der Ermittlung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten, dem Nachweis von Phasenumwandlungen, der Bestimmung von Umwandlungstemperaturen, dem Nachweis von Relaxationsvorgängen und der Bestimmung des Einflusses von Beimischungen auf Materialeigenschaften. Sie bilden die Basis für die Erstellung von Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern. Zur Messung der Ausdehnung einer Probe in Abhängigkeit der Proben temperatur durch induktive Wegaufnehmer bieten wir mit der Differenz- und der Absolutdilatometrie zwei Messvarianten an.

Technische Daten

- Temperaturbereich von RT bis 1600 °C
- Heizraten von 0,1 bis 50 K/min
- Regelbare Anpresskraft von 15 bis 45 cN
- Messweg $\pm 2,5$ mm
- geschlossener, wärmeisolierter, evakuierbarer Probenraum

Probengeometrie

- Zylindrische Probenform (Länge: max. 25 mm; Durchmesser: 6 mm)

Laser-Flash-Apparatur

Zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Werkstoffen und Mehrschichtsystemen werden Laser-Flash-Apparaturen verwendet. Die Vorderseite der scheibenförmigen Probe wird durch einen kurzen und energiereichen Laserimpuls gleichmäßig erwärmt. Der zeitliche Verlauf der Erwärmung der Pro-

benrückseite wird mit einem Infrarot-Detektor aufgezeichnet. Aus dem zeitlichen Temperaturverlauf und der Probengeometrie wird anschließend die Temperaturleitfähigkeit berechnet.

Technische Daten

- Temperaturleitfähigkeitsmessungen im Bereich von 0,01 bis 1000 mm²/s
- Temperaturbereich RT bis 1500 °C
- Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit bis 100 K/min
- Nd-YAG SW 40 Laser (Leistung: max. 20 Joule/Puls, Pulsdauer: 0,3 bis 1,2 ms; Wellenlänge: 1064 nm)
- InSb IR-Sensoren mit Flüssigstickstoffkühlung
- Messungen unter Schutzatmosphären

Probengeometrie

- Scheibenförmige Probenform (Durchmesser: 12,7 mm; Höhe: 2,0 mm)

Dynamisches Differenz-Kalorimeter

Zur Analyse energetischer Effekte, die in einem Festkörper bzw. in einer Flüssigkeit bei Ablauf eines kontrollierten Temperaturprogramms auftreten, kommen dynamische Differenz-Kalorimeter zum Einsatz. Beim Durchlaufen dieses Programms von Probe und Referenz werden die tatsächliche Proben temperatur und die Temperaturdifferenz erfasst. Daraus kann anschließend die Wärmestromdifferenz ermittelt werden. Diese Vorgehensweise wird bei der Untersuchung zum Schmelzverhalten von Werkstoffen, bei Glasübergängen sowie bei der Ermittlung der spezifischen Wärme mit hoher Genauigkeit genutzt.

Technische Daten

- Temperaturbereich von RT bis 1650 °C
- Heizraten von 0,1 bis 50 K/min
- geschlossener, wärmeisolierter, evakuierbarer Probenraum

Probengeometrie

- Scheibenförmige Probenform (Durchmesser: max. 5,6 mm; Höhe: max. 4,0 mm)

TECHNOLOGISCHE WERKSTOFFKENNGRÖSSEN

Maxi-Bulge-Test

Zur Bestimmung des Fließverhaltens oberhalb der Gleichmaßdehnung werden hydraulische Tiefungsversuche (Bulge-Tests) durchgeführt. Um die Nachteile des konventionellen Bulge-Tests zu vermeiden, wurde am Fraunhofer IWU ein Maxi-Bulge-Test mit einem Matrizendurchmesser von 500 mm entwickelt.

Mit Hilfe eines aus vier Kameras bestehenden optischen Systems erfolgt die in-process-Messung der Formänderungen und Krümmungen am Pol der Bulge-Probe. In Abhängigkeit vom jeweils zu prüfenden Werkstoff kann eine Niederhalterkraft bis zu 50 000 kN eingestellt werden. Damit wird sichergestellt, dass kein Material aus dem Klemmbereich nachfließt. Die Steuerung des gesamten Prüfablaufs erfolgt über einen übergeordneten Rechner, der eine synchrone Datenaufnahme von Dehnung und Krümmung am Pol sowie Druck und Niederhalterkraft gewährleistet.

Sowohl das automatisierte optische Messsystem als auch die Druckmessung liefern hochgenaue Messdaten, die in den weiteren Berechnungen für die Fließkurvenermittlung benötigt werden. Die Bestimmung der Krümmungsradien, Dehnungen und Blechdicken am Pol erfolgt mit einer Messgenauigkeit von einem Prozent, die Druckmessung mit einer Genauigkeit von 0,15 bar.

Durch die Realisierung eines sehr kleinen Verhältnisses von Blechdicke zu Matrizendurchmesser ($< 0,003$) wird ein wichtiges Gültigkeitskriterium der Membrantheorie voll erfüllt, so dass die darauf beruhenden Berechnungsbeziehungen für die Ermittlung von Kaltfließkurven der zu untersuchenden Blechwerkstoffe mit hinreichender Genauigkeit angewandt werden können.

Tribologie- und Reibungsverhalten

Zur Ermittlung von belastungsäquivalenten, die tribologischen Verhältnisse zwischen Blechwerkstoff, Schmierstoff und Werkzeugoberfläche widerspiegelnden Kennwerten und der Charakterisierung der Oberflächenveränderungen von Blech- und Werkzeugwerkstoff während des Umformprozesses wird eine Streifenziehanlage genutzt.

Diese erlaubt die Durchführung von Reib- und Verschleißuntersuchungen an Blechwerkstoffen zur Bestimmung von experimentell abgesicherten Reibwerten für die numerische Simulation von Tiefzieh- und Streckziehoperationen. Dabei können variierende Tribosysteme (Schmierstoffe, Blech- und Werkzeugoberflächen, Blech- und Werkzeugbeschichtungen) untersucht werden.

Folgende Leistungsmerkmale kennzeichnen die Anlage:

| | |
|-------------------------------------|------------|
| Zugkraft F_{zug} | = 100 kN |
| Gegenhalterkraft F_{gegen} | = 100 kN |
| Niederhalterkraft F_{Nied} | = 50 kN |
| Ziehweg s_{Zug} | = 500 mm |
| Blechtemperatur T_{B} | = 1000 °C |
| Werkzeugtemperatur T_{W} | = 800 °C |
| Geschwindigkeit v_{max} | = 300 mm/s |
| Streifenbreite b_{max} | = 100 mm |
| Ziehkantenradius R_{min} | = 3 mm |

Die Temperatur für Ober- und Unterwerkzeug ist getrennt regelbar. Die Anlage erlaubt in Bezug auf die Gegen- bzw. Niederhalterkraft und die Geschwindigkeit sowohl eine stetige als auch eine stufenweise fallende/steigende Arbeitsweise.

Formänderungsanalyse

Die Formänderungsanalyse findet Anwendung bei der FE-Simulation zur Optimierung von Umformprozessen und Bauteilgeometrien. Zur Visualisierung der Formänderungsverteilung an Blechprüfproben einschließlich der Bestimmung von Grenzformänderungen im Bereich der Einschnürung und des Risses stehen hochmoderne optische Messsysteme (ViALUX, GOM, Dantec) zur Verfügung. Diese ermöglichen eine in-process- oder stufenweise Messung des Formänderungszustandes. Im Detail können damit die Formänderungen in der Blechebene sowie die Blechdickenverteilung ermittelt und dargestellt werden, wodurch sich kritische Bereiche an komplexen Blechformteilen lokalisieren lassen.

Die in Formänderungsanalysen ermittelten Grenzwerte werden in werkstoffspezifische Schaubilder übertragen, anhand derer Umformprozesse bewertet werden.



Mit Hilfe moderner Berasterungstechnik für eine Vielzahl von Werkstoffen können in Abhängigkeit von der Auswertetechnik sowohl Kreis- als auch Quadratraster mit unterschiedlichen Abmessungen aufgebracht werden. Außerdem besteht die Möglichkeit der Berasterung von Rohren zur Auswertung von Rohrberstversuchen an innenhochdruck-umgeformten Teilen.

Grenzformänderungsanalyse

Auf Basis der experimentellen Bestimmung von Grenzformänderungskurven anhand von Tiefungsversuchen mit unterschiedlichen Platinen- und Stempelgeometrien können werkstoffspezifische Grenzen der Umformbarkeit ermittelt und somit die Vorhersagegenauigkeit bei der numerischen Simulation erhöht werden.

Dazu werden spezielle Blechproben bis zum Eintreten einer Einschnürung bzw. eines Risses umgeformt. Dabei wird der Prüfprozess zeitaufgelöst bis zum Werkstoffversagen mit dem AutoGrid®-System verfolgt, um die maximal ertragbaren Formänderungen zu ermitteln. Diese maximalen Formänderungen werden im Grenzformänderungsdiagramm als sogenannte Forming Limit Curves (FLCs) eingetragen und stellen die Grenzkurve für die Umformbarkeit eines Blechwerkstoffs dar.

Grenzformänderungsanalyse bis zu einer Umformtemperatur von 950 °C

Um höchstfeste Blechwerkstoffe (R_m bis 1800 MPa) im Blechdickenbereich von 0,2 mm bis 8,0 mm bei Werkzeugtemperaturen bis 950 °C prüfen zu können, wurde am Fraunhofer IWU ein Prüfwerkzeug mit einem Stempeldurchmesser von maximal 200 mm zur in-process-Aufnahme der Formänderungen entwickelt. Neben der experimentellen Bestimmung von Grenzformänderungskurven mit Halbkugelstempel können auch Marciniakversuche durchgeführt werden.

Näpfchenziehen und Erichsentiefung

Folgende spezielle Prüfversuche und Prüfverfahren stehen Ihnen für die Ermittlung beanspruchungsabhängiger Kenngrößen zur Verfügung:

- Näpfchen-Tiefziehprüfung (Rund- und Quadratstempel)
- Erichsen-Tiefungsversuch
- Beulversuch mit Halbkugelstempel (FLC)
- LDH-Test
- Hydraulischer Tiefungsversuch (klassischer Bulge-Test; kreisförmig/elliptisch)
- Rohraufweitversuch

Dabei können folgende Umformkenngrößen bestimmt werden:

- Grenzziehverhältnis
- Erichsen-Tiefung
- Grenzformänderungskurve (GFK, FLC)
- Maximale Beulhöhe
- Kaltfließkurve
- Durchmesser aufweitung (Rohr)

Durch die Realisierung unterschiedlicher Umformbeanspruchungen kann zudem das Umformverhalten von beschichteten und strukturierten Blechen sowie von Sandwichblechen ermittelt werden.

3 Werkzeug für den Maxi-Bulge-Test mit Probe

4 Werkzeug zur in-process-Aufnahme der Grenzformänderungskurve



CHARAKTERISIERUNG DES WERKSTOFFVERHALTENS

Zug-Druck-Versuche an Flachproben

Zur Ermittlung des isotrop-kinematischen und gemischt isotrop-kinematischen Fließverhaltens von Blechwerkstoffen können zyklische Zug-Druck-Versuche durchgeführt werden. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Erzeugung einer Zug-Druck-Wechselbeanspruchung in den Blechproben, ohne dass die Probe ausknickt. Die zur Verformung der Blechproben benötigten Kräfte werden mit Hilfe von Kraftmessdosen gemessen. Zur ortsauflösenden Messung der Formänderungen in Längs- und Querrichtung kommt die elektronische Laser-Speckle-Interferometrie zur Anwendung. Hiermit werden Probenbereiche ermittelt, die einen weitgehend homogenen Spannungs- und Verformungszustand aufweisen. Die präzise Bestimmung des Fließbeginns erfolgt berührungslos über eine Thermokamera unter Nutzung des Joule-Thomson-Effektes (dehnungsabhängige Temperaturänderung). Die Auswertung der Messergebnisse des Zug-Druck-Versuches wird mit Hilfe einer Parameteridentifikation vorgenommen. Dabei gehen die gemessenen Spannungen und Dehnungen in die Zielfunktion eines nichtlinearen Optimierungsproblems ein.

Durch den Zug-Druck-Versuch können auf diesem Weg Fließkurveninformationen für zyklische Belastungen einschließlich des Bauschinger-Effekts detektiert werden.

5 Durchführung eines

Biaxialzugversuchs

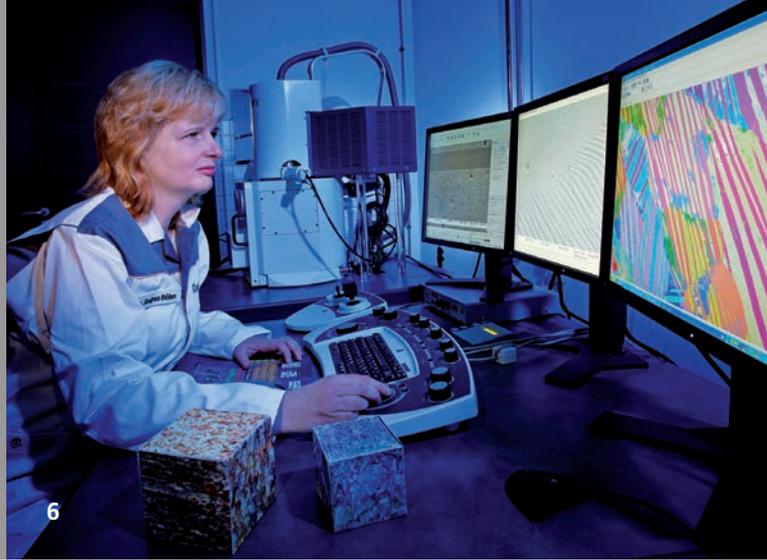
6 Metallografische Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Biaxiale Zugversuche

Mit biaxialen Zugversuchen können Anfangs- und Folgefließortkurven für Blechwerkstoffe im Zug-Zug-Bereich des Spannungsraumes für verschiedene Belastungspfade ermittelt werden, um das tatsächliche mehrachsige Fließverhalten zu charakterisieren. Dazu wird die Probe in zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Achsen über vier separat regelbare Spindeln belastet. Wie beim Zug-Druck-Versuch werden die zur Verformung der Probe benötigten Kräfte mit Kraftmessdosen, das Verschiebungsfeld ortsauflösend mit einem elektronischen Laser-Speckle-Interferometer (ESPI) und der Fließbeginn berührungslos mit einer Thermokamera bestimmt.

Die Herausforderung bei der Bestimmung der Spannungen für den Fließort besteht darin, dass je nach Lage im Spannungsraum ein unterschiedlich großer Querschnitt belastet wird und somit der Einfluss der Genauigkeit der Temperaturmessung auf die Bestimmung des Fließbeginns stark ansteigt. Zur Erfassung des Einflusses der Umformgeschichte werden unterschiedliche mehrachsige Belastungswege abgefahren.

Die Zug-Druck-Versuche und die biaxialen Zugversuche liefern die Voraussetzungen für eine wirklichkeitsgetreue numerische Simulation als Basis für die Optimierung von Blechumformprozessen.



WEITERE PRÜFMÖGLICHKEITEN, METALLOGRAFIE UND AUSSTATTUNG

Weitere Prüfmöglichkeiten

- Farbeindringprüfung (Rot-Weiß-Prüfung) zur Erkennung von Oberflächenfehlern (Risse, Poren)
- Magnetpulverprüfung zur Detektion von Fehlern in der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich ferromagnetischer Werkstoffe
- Kerbschlagbiegeversuche zur Bestimmung der Kerbschlagarbeit bzw. der Kerbschlagzähigkeit
- Rauheitsmessung

Metallografie

Das Fraunhofer IWU bietet Ihnen die Herstellung und Präparation von metallografischen Schliffproben zur Beurteilung von Makro- und Mikrogefüge, zur Härteprüfung sowie zur Ermittlung der Schnittflächenkenngrößen an. Unser metallografisches Repertoire umfasst sowohl die Analyse des Werkstoffgefüges hinsichtlich Gefügebestandteilen, Gefügeumwandlungen und Gefügefehlern als auch spezifische Makrogefügeuntersuchungen an Bruch- oder Ätzflächen wie beispielsweise die Untersuchung von Schadensfällen an Bauteilen oder die Darstellung von Faserverläufen in umgeformten Werkstücken. Die Schliffpräparation von verschiedensten Werkstoffen erfolgt mit speziell abgestimmten Kalteinbettmaterialien für unterschiedlichste Anwendungsfälle. Zur Visualisierung der Schliffbilder kommen moderne Stereo- bzw. Auflichtmikroskope zum Einsatz. Für die Auswertung steht die Bildverarbeitungs- und Archivierungsdatenbank Olympus Stream Motion zur Verfügung.

Ausstattung

- Erichsen Blech- und Bandprüfmaschine 145 [600 kN Stempelkraft, 200 kN Niederhalterkraft]
- Zug-Druck-Prüfmaschine WPM 300 [Fmax = 300 kN]
- Materialprüfmaschine Zwick 1475 [Fmax = 100 kN] mit Hochtemperiereinrichtung von Maytec bis 1100 °C
- Materialprüfmaschine Zwick FR 020TN [Fmax = 20 kN]
- Materialprüfmaschine UTS 20 [Fmax = 20 kN] mit Vakuum-Schutzgas-Ofensystem bis 1600 °C
- Pendelschlagwerk [300 J]
- Temperierte Streifenzieheinrichtung mit 90°-Umlenkung
- Biaxialzugprüfmaschine Zwick [Gesamtzugkraft 250 kN]
- Automatische Härteprüfmaschine EMCOTEST M1C 010-DR
- Auflichtmikroskop Nikon Epiphot und Stereomikroskop Olympus SZX10
- Trenn-, Einbett-, Schleif- und Poliertechnik
- 3D Kontur-, Verschiebungs- und Dehnungsmesssystem der Firma GOM
- AutoGrid®-Formänderungsanalyse-Systeme der Firma ViALUX [mobile compact-System und vario-System]
- Laseroptisches Dehnungsmesssystem ESPI Dantec Q-300
- optimiertes Berasterungszubehör zum elektrochemischen Berastern sowie Siebdrucktechnik für die vielfältigsten Anwendungsfälle
- Thermographiekamera InfraTec VarioScan 3021 ST mit Infrarot-Thermografiesoftware IRBIS® professional

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Abteilung Profilbasierte Verfahren und Hochgeschwindigkeitstechnologien

Dr.-Ing. Verena Psyk
Telefon +49 371 5397-1731
Fax +49 371 5397-6-1731
verena.psyk@iwu.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU 2021