

Wettbewerbsvorteile durch simulationsgestützte Werkstoff- und Prozessentwicklung

U. Diekmann, P. Becker, Kamen, Deutschland

1 Einleitung

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Legierungselemente und des breiten Spektrums an möglichen Phasen sind die Eigenschaften von Aluminium in weiten Bereichen gezielt einstellbar. Dazu ist jedoch die genaue Kenntnis der entstehenden Phasen sowie des relevanten Temperaturbereiches notwendig.

Auch für Experten ist die Beherrschung dieser komplexen Systeme experimentell in der Praxis nicht möglich.

Die stabilen und metastabilen Phasengleichgewichte auch von komplexen Legierungen mit mehr als 10 Legierungselementen können allerdings mit der CalPhaD (Calculation of Phase Diagrams) Methode berechnet werden.

MATPLUS bietet mit den Systemen JMatPro und MatPlus JM gezielt Werkzeuge für die industrielle Praxis an, mit denen die vielfältigen Möglichkeiten moderner Aluminium-Legierungen schneller erschlossen werden können. Durch einfache Bedienbarkeit und zuverlässige Ergebnisse werden die Systeme gern auch in der Lehre an Hochschulen eingesetzt.

Bild 1 zeigt das Ergebnis einer realitätsnahen 3D-FEM Simulation des Strangpressvorganges für ein Profil aus einer speziellen Aluminiumlegierung. Die Werkstoffdaten hierfür wurden mit JMatPro berechnet – völlig ohne den Einsatz der Werkstoffprüfung.

2 Grundlagen der Werkstoffsimulation

Basis der Berechnungen in JMatPro ist die Verwendung der etablierten CalPhaD Methode zur Ermittlung von Phasengleichgewichten [1], die auch in anderen Werkstoffsimulationsprogrammen zur Anwendung kommt. Bei der Entwicklung von JMatPro wurde von vornherein auf einfachste Bedienbarkeit sowie den Einsatz von schnellen und robusten Algorithmen geachtet. Als thermodynamische Datenbanken kommen die etablierten CalPhaD Datenbanken der Fa. ThermoTech zum Einsatz, die im wissenschaftlichen Umfeld fest etabliert sind.

Diese theoretischen Berechnungen liefern Antworten auf eine Reihe von praktischen Fragestellungen [2]:

- Welche Phasen sind bei welcher Temperatur stabil?
- Wie sind die einzelnen Phasen zusammengesetzt?

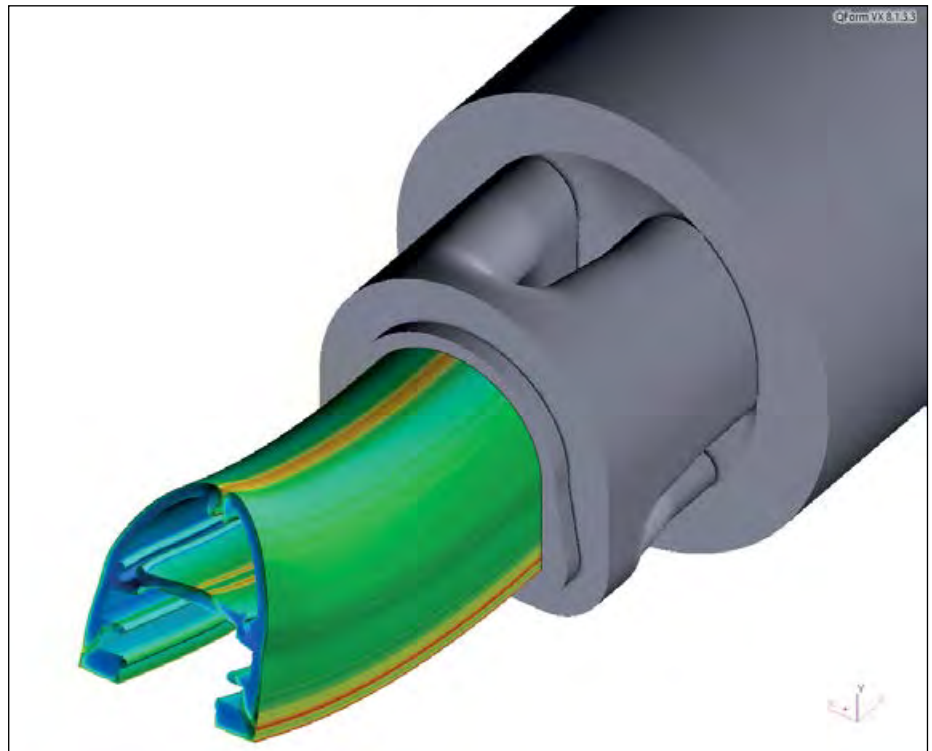


Bild 1: Simulation des Pressvorganges eines Aluminiumprofils

(Quelle QForm Extrusion)

- In welchen Phasen sind wie viele Legierungselemente gelöst?

Hervorzuheben ist, dass diese Fragen heute in der industriellen Praxis durch die Verwendung einer ausgereiften und benutzerfreundlichen Software (JMatPro) beantwortet werden können – ohne dass hierfür spezifische Ressourcen/Stabsstellen geschaffen werden müssen. So können beispielsweise optimale Temperaturen für das Lösungsglühen einer T6 Wärmebehandlung analysengenaue bestimmt werden.

Die Kenntnis, welche Phasen bei welcher Temperatur stabil sind, wiederum ist die Basis für die Festlegung der Wärmebehandlung und Abschätzung der Festigkeiten, sowohl bei Raumtemperatur als auch während der Umformung bei erhöhten Temperaturen (Fließkurven).

Moderne Aluminiumlegierungen erhalten ihre hohe Festigkeit durch Ausscheidungshärtung. Dabei scheiden sich fein disperse Partikel gleichmäßig im Gefüge aus. Die Evolution der Ausscheidungsphasen hängt vom Legierungssystem, der Lösungsglüh- und Abschreckbehandlung sowie von der Auslagerungstemperatur ab. Demzufolge ist die Bestimmung der Ausscheidungskinetik für die Optimierung der Werkstoffeigenschaften erforderlich. JMatPro berechnet kontinu-

ierliche und isotherme Ausscheidungsdiagramme unter Verwendung eines modifizierten Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorow (JMAK) Ansatzes [3]. Bild 3 zeigt ein berechnetes Ausscheidungsdiagramm für eine AlSi10MnMg-Legierung nach Lösungsglühen bei 500 °C.

Für die T5 und T6 Wärmebehandlungen berechnet JMatPro darüber hinaus die Peak-Festigkeiten als Funktion der Auslagerungstemperatur und die Hochtemperaturfestigkeit als Funktion der Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit [4]. Diese Informationen sind die Grundlage für die Berechnung von Fließkurven für die Auslegung von Umformprozessen.

3 Werkstoffdaten für CAE und Fertigung

Für die Auslegung von Produkten und Prozessen mit FEM-Methoden sind physikalisch konsistente und temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften unverzichtbar, wie z.B. Wärmeleitfähigkeit, E-Modul, und Ausdehnungskoeffizienten. Darüber hinaus werden Daten zu Phasenumwandlungen sowie Fließkurven bei unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Temperaturen benötigt.

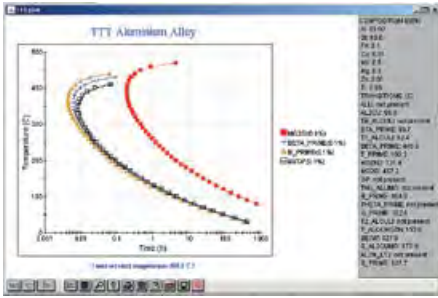


Bild 3: Ausscheidungsdiagramm einer AlSi10MnMg-Legierung (JMatPro)

Konsistente Daten sind jedoch allgemein schwer verfügbar, da eine experimentelle Ermittlung wegen der erforderlichen statistischen Absicherung sehr zeit- und kostenintensiv ist. Dazu kommt, dass bereits ein Werkstoff (eine Werkstoffbezeichnung) in Abhängigkeit von der Spannweite der chemischen Zusammensetzung und der Vorgeschichte der Herstellung deutlich schwankende Eigenschaften haben kann.

Die erforderlichen Daten für unterschiedliche Legierungsvarianten können mit JMatPro in kurzer Zeit analysengenaue berechnet werden. Ergebnis der CalPhAD Berechnung sind die Anteile der verschiedenen Phasen und deren Zusammensetzung als Funktion der Temperatur im Gleichgewicht. Diese Information ist Grundlage für die Berechnung der Gleichgewichtseigenschaften. Für jede Phase sind Eigenschaften als Funktion von Temperatur und Zusammensetzung in der zugrundeliegenden Datenbank vorhanden, so dass die Werkstoffeigenschaften durch Anwendung von Mischungsregeln ermittelt werden können [5].

Diese Daten können dann direkt an die CAE-Zielsysteme exportiert werden [6], z.B. an Magmasoft für die Erstarrungssimulation oder Ansys für allgemeine Berechnungen.

Bild 4 zeigt beispielhaft einen Vergleich von experimentell ermittelten mit von JMatPro gerechneten Fließkurven. Aktuell ist JMatPro das einzige Programm am Markt, das „auf Knopfdruck“ konsistente, analysengenaue Fließkurvenmodelle für andere Simulationsprogramme zur Verfügung stellen kann.

4 Legierungsoptimierung mit MatPlus JM

Als Erweiterung zu JMatPro ermöglicht die neue webbasierte Software Matplus JM eine weitergehende Optimierung von Werkstoffen.

Eine Werkstoffbezeichnung beschreibt keine exakte chemische Analyse – für jedes chemische Element gibt es mehr oder weniger große zulässige Bereiche. Im Rahmen dieser Analysenbereiche kön-

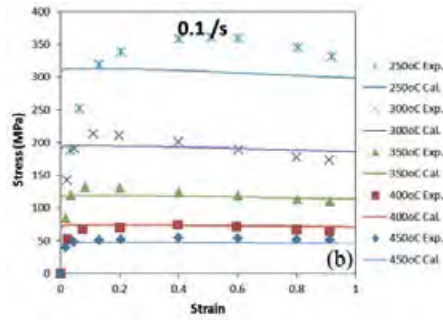


Bild 4: Vergleich von experimentell ermittelten mit gerechneten Fließkurven (JMatPro)

nen Werkstoffe mit verschiedenen Zielsetzungen variiert werden. Zunächst wird da in der Regel an die Kosten gedacht, wobei die teuersten Elemente an das Minimum der Bereiche gelegt werden. Auch Korrosionseigenschaften, Festigkeit und Duktilität sind häufig Eigenschaften, die beeinflusst werden sollen. Dabei stellt sich immer wieder die Frage, welchen Einfluss diese Modifikationen auf die anderen relevanten Eigenschaften und Prozessparameter haben.

Mit dem neuen MatPlus JM besteht erstmals die Möglichkeit, systematisch ein breites Spektrum an chemischen Analysen zu untersuchen und somit Optima in einem größeren Lösungsraum zu identifizieren. So können beispielsweise die thermo-physikalischen Eigenschaften von 1000+ Varianten berechnet und graphisch ausgewertet werden.

In Bild 5 ist dargestellt, wie ausgewählte Eigenschaften mittels MatPlus JM tabellarisch ausgewertet werden können. Dabei werden alle Legierungsvarianten miteinander verglichen und der Minimal- und der Maximalwert für die jeweilige Eigenschaft bestimmt.

Bild 6 zeigt beispielhaft eine Auswertung über 1350 Varianten einer AlZn5,5MgCu-Legierung. Hier wird eine Legierungsvariante mit einem E-Modul > 66 GPa bei 200 °C gesucht. Mit MatPlus JM können die entsprechenden Varianten ermittelt und gleichzeitig kostentechnisch bewertet werden. Analysen, die entsprechende Kriterien erfüllen, werden zu Sets zusammengefasst, die auch in anderen Darstellungen kenntlich gemacht werden können. Durch Verknüpfung mit weiteren Selektionskriterien ist dann die Bestimmung einer optimalen Analyse möglich.

5 Zusammenfassung

Mit JMatPro und MatPlus JM bietet die MATPLUS Herstellern und Anwendern von Aluminium-Legierungen hochentwickelte Software-Werkzeuge für die Optimierung von Produkten und Prozessen. JMatPro erzeugt dabei analysengenaue und konsistente Werkstoffdaten, die für FEM-Simulationen benötigt werden. Mat-

AW7075_1	
1. Liquidus Temperature Max [°C]	680.0
1. Liquidus Temperature Min [°C]	648.0
2. Solidus Temperature Max [°C]	556.0
2. Solidus Temperature Min [°C]	502.0
3. E-Modul (200°C) Max [GPa]	67.70729342
3. E-Modul (200°C) Min [GPa]	63.84460994
4. Th. Conductivity Max [W/m K]	188.6306856
4. Th. Conductivity Min [W/m K]	178.2743135

Bild 5: Tabellarische Auswertung ausgewählter Kriterien in MatPlus JM

Plus JM ermöglicht die systematische Optimierung von Legierungen innerhalb der zulässigen Analysenbereiche und darüber hinaus.

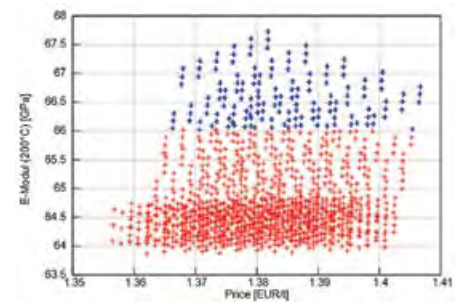


Bild 6: Graphisches Auflösen von Zielkonflikten am Beispiel des E-Moduls in MatPlus JM

6 Schrifttum

- [1]N. Saunders und A. P. Miodownik, CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide. Elsevier, 1998.
- [2]N. Saunders, „The application of calculated phase equilibria to multi-component aluminum alloys“, J.JILM, Bd. 51, Nr. 3, S. 141–150, 2001.
- [3]N. Saunders, „The modelling of stable and metastable phase formation in multi-component Al-alloys“, in Materials Forum, 2004, Bd. 28, S. 96–106.
- [4]Sente Software Ltd., „Calculation of T5_T6 Peak Strengths“, 2012..
- [5]Z. Guo, N. Saunders, P. Miodownik, und J.-P. Schillé, „Prediction of room temperature mechanical properties in aluminum castings“, Proc. ICAA11, Bd. 22, S. 26, 2008.
- [6]Z. Guo, N. Saunders, J. P. Schillé, und A. P. Miodownik, „Material properties for process simulation“, Mater. Sci. Eng. A, Bd. 499, Nr. 1–2, S. 7–13, Jan. 2009.