

FE-Simulation von Prozessketten mit Berücksichtigung der Mikrostrukturentwicklung

Die Vorausberechnung von mehrstufigen Prozessketten gewinnt immer mehr an Bedeutung. Eine hinreichend genaue Vorhersage der Produkteigenschaften und Umformkräfte verlangt die Berücksichtigung von Mikrostrukturänderungen während und zwischen den einzelnen Umformprozessen. Dafür wurde eine Softwarelösung entwickelt, die in diesem Beitrag vorgestellt wird.

AUTOREN

**Anna Back, M.Sc.**

ist Projektingenieurin
Umformsimulation bei
der SMS group GmbH
in Mönchengladbach

**Dr.-Ing.
Koos van Putten**

ist Gruppenleiter
Umformsimulation bei
der SMS group GmbH
in Mönchengladbach

**Alexander Krämer, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Institut für
Bildsame Formgebung (IBF)
der RWTH Aachen

**Ranjeet Kumar, M.Sc.**

ist Entwicklungsingenieur
bei der simufact engineering
GmbH in Hamburg

Der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen, beispielsweise im Bereich der Luft- und Raumfahrt, erfordert die Einhaltung enger Toleranzen der Produkteigenschaften. Zur Vermeidung einer Vielzahl kostenintensiver Versuche zur Prozessführung werden Finite-Elemente (FE)-Simulationen eingesetzt. Für einzelne Prozesse ist die Vorhersage von Produkt- und Prozesseigenschaften in der Warmumformung (zum Beispiel Spannungsverteilung, Umformkräfte) bereits zuverlässig möglich. Bei mehrstufigen Prozessketten spielt neben der Verfestigung auch die Entfestigung durch Rekristallisation eine übergeordnete Rolle zur verlässlichen Berechnung der Umformkräfte. Diese Entfestigungsprozesse können nur durch eine Berücksichtigung der Entwicklung der Mikrostruktur beschrieben und auf Grundlage eines Mikrostrukturmodells berechnet werden. Koppelt man nun die Berechnung der Fließspannung in der FE-Simulation mit dem Mikrostrukturmodell, können Entfestigungsprozesse berücksichtigt werden. Zusätzlich werden hierdurch Informationen über Korngröße und rekristallisierte Anteile im gesamten Bauteil zur Verfügung gestellt.

Eine Kopplung zwischen der kommerziellen FE-Software Simufact Forming und dem Materialmodul wurde inklusive des Mikrostrukturmodells StrucSim des IBF realisiert und anhand einer industriellen Prozesskette zur Herstellung einer Turbinenscheibe validiert. Dies erfolgte in Kooperation zwischen der SMS group GmbH, der simufact engineering GmbH sowie dem Institut für Bildsame Formgebung (IBF) der RWTH Aachen unter dem Forschungscluster AMAP (Advanced Metals and Processes). Die Durchführung der Prozesskette im industriellen Maßstab erfolgte in Zusammenarbeit mit Leistritz Turbinen-

technik GmbH und Kind&Co, Edelstahlwerk, GmbH & Co. KG. Es konnte gezeigt werden, dass die berechnete Korngröße innerhalb einer Standardabweichung mit der gemessenen Korngröße übereinstimmt. Mithilfe der Berücksichtigung der Entfestigungsvorgänge konnten die Kräfte während der gesamten Prozesskette mit einer Genauigkeit von 5 bis 10 Prozent vorhergesagt werden. In Zukunft können damit Prozesse mit größerer Sicherheit hinsichtlich der Einhaltung von Anlagengrenzen und Produkttoleranzen ausgelegt werden.

SOFTWARE-KOPPLUNG

Die Kopplung zwischen Simufact Forming und StrucSim ist in Bild 1 schematisch dargestellt [1]. Simufact Forming berechnet zunächst die Umformhistorie, also Temperatur, Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit, für jeden Integrationspunkt jeder Iteration jedes Inkrements. Diese Werte werden anschließend an StrucSim übergeben. StrucSim berechnet daraus die Korngröße, den rekristallisierten Anteil und die aktuelle Fließspannung. Alle relevanten Informationen werden nun an Simufact Forming zurückgegeben und beeinflussen die Simulationsergebnisse über die Fließspannung. Insgesamt kann mit dieser Kopplung neben den Ergebnissen der FE-Simulation auch die Entwicklung der Mikrostruktur über das gesamte Bauteil berechnet werden.

Die Kopplung ist ganzheitlich integriert, das heißt sie unterstützt alle gängigen „Verfahren“ wie zum Beispiel paralleles Rechnen, Restart, Ergebnisübertragung von 2D- auf 3D-Simulation und anders herum, sowie die automatische Ergebnisübertragung bei Prozessketten (stage-control).

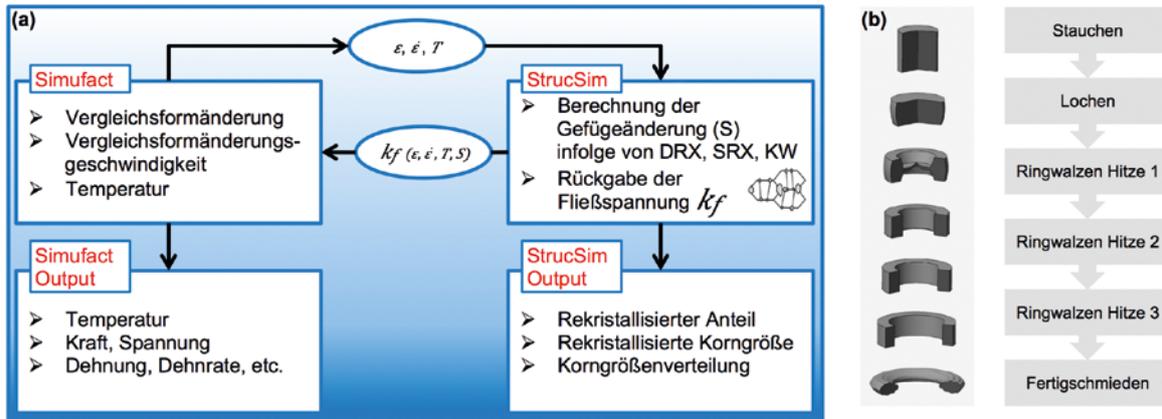


Bild 1: (a) Schematische Darstellung der Software-Kopplung zwischen der FE-Software Simufact Forming und dem Materialmodul StrucSim, inklusive Mikrostrukturmodell, (b) Umformtechnische Prozesse zur Herstellung einer Niederdruckturbinenscheibe.

INDUSTRIELLE PROZESSKETTE

Die Validierung der Software-Kopplung erfolgt anhand einer industriellen Prozesskette zur Fertigung einer Niederdruckturbinenscheibe aus der Nickelbasislegierung Inconel 718. Die Turbinenscheibe wird bei den Firmen Leistriz Turbinentechnik GmbH und Kind&Co., Edelstahlwerk, GmbH & Co. KG. gefertigt. Die Fertigungsschritte sind in Bild 1 dargestellt: Ein abgetrennter Block von geschmiedetem Stangenmaterial wird im ersten Schritt auf einem Gegenschlaghammer zu der ungelochten Vorform gestaucht. Anschließend wird die Vorform auf einer hydraulischen Presse gelocht. Aus dem so entstandenen Ringrohling wird auf einer Radial-Axial-Ringwalzmaschine ein größerer Ring in drei Hitzen gewalzt. Darauf folgend wird der Ring auf einem Gegenschlaghammer profiliert und fertig geschmiedet. Abschließend erfolgen eine Wärmebehandlung und mechanische Nachbearbeitung. Zwischen den einzelnen Umformprozessen wird der Ring aus logistischen Gründen auf Raumtemperatur abgekühlt, abgesehen vom Nachwärmen zwischen den Hitzen des Ringwalzens.

Mit Ausnahme des Ringwalzens werden alle Prozesse auf den Aggregaten der Firma Leistriz durchgeführt. Das Ringwalzen erfolgt bei der Firma Kind&Co auf einer RAW 160(200) / 125(160).

Im Folgenden werden die Umformprozesse Stauhen, Lochen, Ringwalzen und Fertigschmieden, inklusive der Zwischenschritte, betrachtet.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die industrielle Prozesskette wird mit der Finite-Elemente-Software Simufact Forming berechnet [2]. Abhängig vom Prozess werden die Simulationsmodelle als zwei- oder dreidimensionale thermisch-mechanisch gekoppelte FE-Modelle aufgebaut. Die Prozesskette wird durchgehend betrachtet, das bedeutet, dass neben den Umformprozessen auch die Zwischenschritte, wie beispielsweise Ofen- und Transportzeiten, berücksichtigt werden. Zwischen den einzelnen Prozessen werden die mechanischen, thermischen, sowie die Mikrostrukturinformationen übertragen. Die initiale Korngröße zu Beginn der Prozesskette liegt bei 10 µm.

PROZESSCHRITT ERSTE HITZE RINGWALZEN

Am Beispiel der ersten Hitze Ringwalzen werden die berechneten Ergebnisse den Messdaten gegenübergestellt. Bild 2a zeigt beispielhaft Ergebnisse, die aufgrund des angebundnen Materialmoduls zusätzlich zu den Größen der Umformsimulation (zum Beispiel Temperatur, Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit) ausgegeben werden können. Zu sehen ist ein

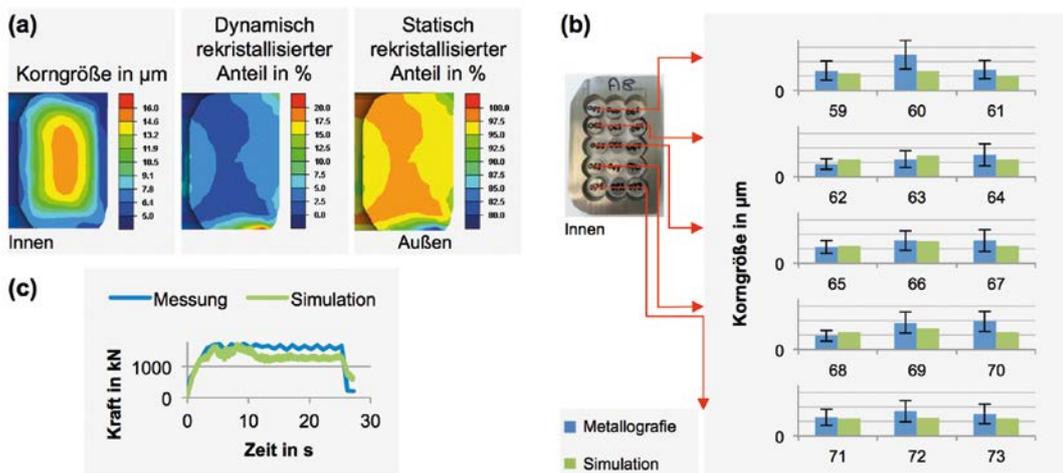


Bild2: Prozessschritt Ringwalzen Hitze 1: Korngrößenverteilung nach Ringwalzen und Abkühlen auf Raumtemperatur (a) Beispiel für zusätzliche Mikrostrukturergebnisse; (b) Vergleich Metallografie (blau, inklusive Standardabweichung) versus Simulation (grün) (c) berechnete Radialkraft

Schnitt durch den Ring, die Ergebnisgrößen werden also über den Ringquerschnitt dargestellt. Abgebildet sind die Korngröße sowie statisch und dynamisch rekristallisierte Anteile nach dem Ringwalzen und Abkühlen auf Raumtemperatur. In Abhängigkeit der thermo-mechanischen Vorgeschichte (Temperatur, Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit) bildet sich für dieses Beispiel die abgebildete Verteilung der Korngröße sowie der rekristallisierten Anteile aus. In der Ringmitte liegen die größten Korngrößen vor, während die Randbereiche kleinere Korngrößen aufweisen.

In Bild 2b sind die berechneten Korngrößen den metallografischen Messungen inklusive Messunsicherheit gegenübergestellt. Das Mikrostrukturmodell wurde auf Grundlage von Laborversuchen (Glühversuche, Stauchversuche, Spannungsrelaxationsversuche) erstellt und validiert (Doppelstauchversuche). Unter Anwendung des Mikrostrukturmodells liegen die berechneten Korngrößen tendenziell einige Mikrometer unterhalb der Messwerte, aber dennoch innerhalb der Messunsicherheit der metallografischen Messung.

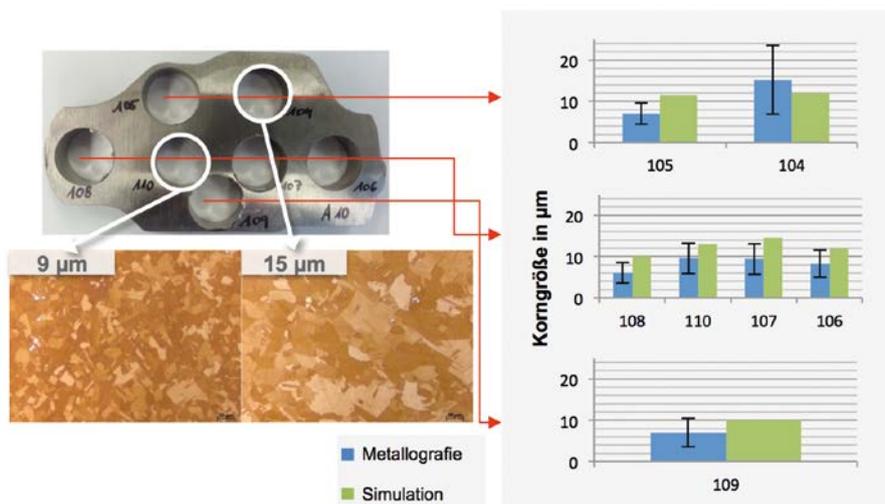


Bild 3: Prozessschritt Fertigschmieden: Korngrößenverteilung nach Schmieden und Abkühlen auf Raumtemperatur Vergleich Metallografie (blau, inklusive Standardabweichung) versus Simulation (grün)

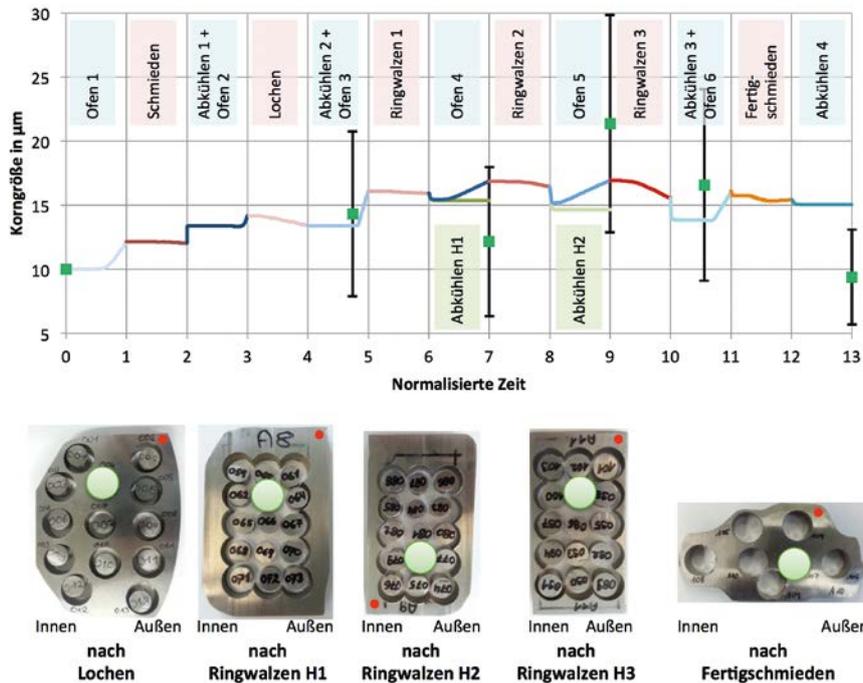


Bild 4: Korngrößenentwicklung entlang der Prozesskette an einem ausgewählten Messpunkt Bilder: Autoren

An der Ringinnenseite liegt eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vor. In der Ringmitte und an der Ringaußenseite hingegen weichen die berechneten Größen um bis zu 10 µm ab. Der Messwert an Position 60 von zirka 24 µm scheint aufgrund der starken Abweichung zu allen umliegenden Messpunkten eine Unsicherheit in der metallografischen Auswertung zu sein. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass besonders an der Ringaußenseite die Korngrößen stark unterschätzt werden, aber innerhalb der Messunsicherheit der Metallografie liegen.

Ebenso wie die Korngrößen wird auch die berechnete Radialkraft bei der ersten Hitze Ringwalzen unterschätzt (Bild 2c). Die um maximal 10 Prozent geringere Kraft im Vergleich zu den Messwerten resultiert vermutlich aus nicht optimalem Wärmeübergangskoeffizienten und Reibwert. Aus Sicht eines Anlagenbetreibers ist diese Genauigkeit der Kraftabschätzung absolut ausreichend und aufgrund des zeitlichen Aufwands der Berechnungen (3D-FE-Modell) wurde an dieser Stelle auf eine weitere Optimierung des Modells verzichtet. Inwiefern diese Abweichung die Unterschätzung der gemessenen Korngröße bedingt, lässt sich nur schwer beurteilen. Da aber die Korngröße gerade an der Ringaußenseite, an der Reibwert und Wärmeübergang den größten Einfluss haben, stark unterschätzt wird, liegt die Vermutung nahe, dass ein Zusammenhang besteht.

Im Vergleich zu den Veröffentlichungen [3 – 6], die Zwischenergebnisse aus dem laufenden Forschungsprojekt zeigen, liegen die berechneten Korngrößen in Bild 2 etwas höher. Hier sind die finalen Ergebnisse nach Anpassungen am Mikrostrukturmodell basierend auf fortschreitenden Erkenntnissen abgebildet.

PROZESSSCHRITT FERTIGSCHMIEDEN IM GESENK

Der gewalzte Ring wird auf einem Gegenschlaghammer im Gesenk in 20 Hieben zu einer Turbinenscheibe fertiggeschmiedet

und anschließend an Luft auf Raumtemperatur abgekühlt. Während des Schmiedens und Abkühlens auf Raumtemperatur entwickelt sich die Korngröße und es liegt die in Bild 3 dargestellte Korngrößenverteilung vor.

Im Vergleich zu den gemessenen werden die berechneten Korngrößen leicht überschätzt: Sie liegen bei drei von sieben Messpunkten innerhalb der Messunsicherheit der Metallografie und bei drei Messpunkten leicht außerhalb. Der Messpunkt 105 liegt zirka 1,5 µm außerhalb der Messunsicherheit. Tendenzen von Bereichen mit größeren oder kleineren Korngrößen im Verhältnis zueinander werden korrekt abgebildet.

KORNGRÖSSENENTWICKLUNG ENTLANG DER PROZESSKETTE

Anhand eines ausgewählten Messpunkts (grüne Markierung in Bild 4) wird die Korngrößenentwicklung entlang der Prozesskette unter Berücksichtigung des Mikrostrukturmodells dargestellt (Bild 4). Die Zeitachse wurde normalisiert, sodass jeder Umformprozess die Länge eins hat und die Prozesse zwischen zwei Umformprozessen (Abkühlen, Erwärmen) zusammengefasst und ebenso auf die Länge eins normiert sind. Der rote Punkt kennzeichnet eine äußere Ecke des Rings; dieser wird nach jeder Hitze Ringwalzen gedreht, um die Dorndurchbiegung auszugleichen.

Die Korngröße liegt am Anfang bei 10 µm, und steigt im Laufe der Umformprozesse am dargestellten Messpunkt auf bis zu 17 µm an. Die abzweigenden Pfade (grüne Linien) nach der ersten und zweiten Hitze Ringwalzen wurden eingefügt, um die Korngröße bei Raumtemperatur zu vergleichen; dieses Abkühlen wird in Realität nicht durchgeführt. Im Vergleich zu den Messdaten liegen die berechneten Korngrößen teilweise oberhalb und teilweise unterhalb der Messwerte, aber dennoch innerhalb der Messunsicherheit aus der Metallografie und die Tendenzen

werden gut abgebildet. Einzige Ausnahme bildet der Messpunkt nach dem Fertigschmieden. Alle Korngrößen werden jedoch mit einer Abweichung von maximal 6 µm vorhergesagt. Durch gezielte Prozessführung wird erreicht, dass die Korngröße sich nur wenig ändert und kein starkes Kornwachstum auftritt. Für eine so präzise Prozessführung kann die Simulation inklusive Mikrostrukturberechnung von ausschlaggebender Bedeutung sein, um die Korngrößenentwicklung im Vorfeld zu berechnen und so die Anzahl von zeit- und kostenintensiven Versuchen zu reduzieren.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Es wurde eine Softwarelösung entwickelt und validiert, die unter Berücksichtigung der Mikrostrukturentwicklung Prozessketten aus der Umformtechnik abbilden kann. Entlang einer komplexen, bei zwei Industriepartnern durchgeführten industriellen Prozesskette zur Herstellung einer Turbinenscheibe aus Inconel 718 wurde erfolgreich aufgezeigt, dass die Abbildung von Tendenzen in der Korngrößenentwicklung möglich ist. Mithilfe der Software sind daher auch neue Prozesse realitätsnäher und ohne eine Vielzahl kostenintensiver Versuche auszulegen.



[1] Karhausen, K.; Kopp, R.: Model for integrated process and microstructure simulation in hot forming, Steel research 63, 1992

[2] Simufact.forming Version 12.0.2, Simufact Software, Hamburg, Deutschland; www.simufact.de

[3] Rott, A.; van Putten, K.: Simulationsbasierte Untersuchung einer industriellen Prozesskette, in: 31. Aachener Stahlkolloquium 2016, Aachen

[4] Rott, A.; van Putten, K.; Krämer, A.; Kumar, R.: Gekoppelte Umform- und Gefügesimulation am Beispiel einer industriellen Prozesskette – Ergebnisse aus einem laufenden Forschungsprojekt. in: Simufact Roundtable 2016, Marburg

[5] Krämer, A., Rabindran, R., Rott, A., Kumar, R., Hirt, G.: Online-coupled FE-Simulation and microstructure prediction for the process chain of an Inconel 718 turbine disk. in: WGP-Jahreskongress 2017, Aachen

[6] Krämer, A.; Back, A.; Kumar, R.: Online Kopplung von FE-Simulationen und Mikrostrukturberechnung für Hochleistungswerkstoffe, in: 6. VDI-Fachtagung Warmmassivumformung 2018, Düsseldorf