

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der weite Einsatzbereich metallischer Werkstoffe ist bedingt durch ihre vielfältigen Eigenschaften, wie z.B. eine hohe Verformbarkeit und hohe Festigkeit. Die physikalische Ursache für die guten Umformeingenschaften ist weitestgehend die Induzierung und Bewegung eindimensionaler Kristallbaufehler „Versetzungen“, denn in großen Bereichen mechanischer Spannung und Temperatur ist die Versetzungsbewegung der entscheidende Verformungsmechanismus in Metallen. Mittels thermomechanischer Behandlungen lassen sich hohe Umformgrade durch den Wechsel von Ver- und Entfestigung – also Zunahme und Abbau der Versetzungen - im Material erzielen. Das Verständnis über den Einfluss von Temperatur, Dehngeschwindigkeit und aktueller Mikrostruktur auf das Ver- und Entfestigungsverhalten ist demnach von großem wissenschaftlichem Interesse, da dies die wesentlichen Kriterien für die Auswahl der Herstellungsverfahren und die Anwendung metallischer Werkstoffe bestimmt.

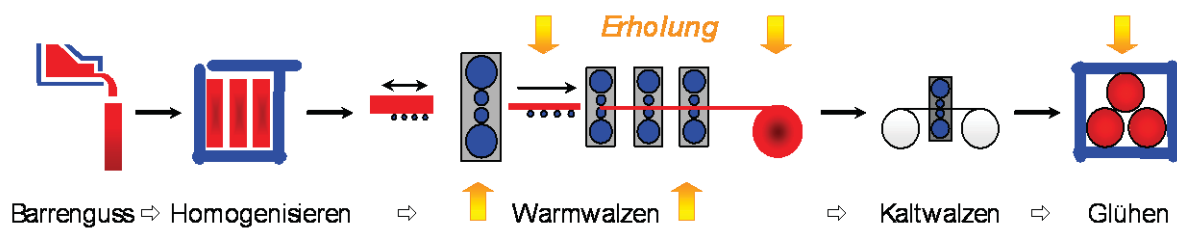


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Aluminium Bandfertigung mit Kennzeichnung der Prozessschritte, die durch Erholungsprozesse beeinflusst werden [Engler 2002].

In der vorliegenden Arbeit wird der Entfestigungsprozess Erholung und dessen Kinetik behandelt. Der Prozess der Erholung ist definiert als die Annihilation und Umordnung der Versetzungen. Erholungsprozesse treten insbesondere in Materialien mit hoher Stapelfehlerenergie auf, wie z.B. Aluminium. Während der industriellen Fertigung von Aluminium-Walzprodukten können Erholungsprozesse einen starken Einfluss auf die treibende Kraft für konkurrierende Entfestigungsprozesse haben, wie die primäre, statische Rekristallisation, aber auch auf das Verfestigungsverhalten (Abbildung 1-1). Dies kann somit zu einer starken Beeinflussung der Materialeigenschaften führen, die schlussendlich maßgeblich für das Erzeugnis und dessen Einsatzgebiet sind. Aus diesem Grund sind die Analyse der Entfestigungsprozesse und die Bestimmung ihrer Kinetik unerlässlich. Heutzutage tritt ebenso die geschlossene Modellierung der Prozesskette für die Vorhersage und Optimierung der Materialeigenschaften immer weiter in den Vordergrund, um umfangreiche und aufwendige Versuchsreihen in der industriellen Fertigung zu vermeiden. Deshalb ist eine akkurate Modellierung aller auftretenden Prozesse notwendig, um eine verlässliche Vorhersage der Eigenschaften zu gewährleisten.



Im experimentellen Teil dieser Arbeit werden verschiedene Versuchsdurchführungen und ihre Eignung zur Bestimmung der Erholungskinetik diskutiert. Eine häufig bis heute eingesetzte Standardmethode ist die Glühbehandlung eines vorverformten Materials mit anschließender experimenteller Ermittlung der Festigkeit. Dies können zum einen Glühbehandlungen eines kalt gewalzten Materials mit anschließender Härtemessung [Masing 1950, Michalak 1961, Tietz 1962, Lytton 1965, Barioz 1992, Nes 1995, Verdier 1998, Verdier 1999, Martinez 2004, Vandermeer 2008] oder Doppel-Stauch-/Zugversuche sein [Wilber 1968, Kwon 1990, Fernández 1999, Li 1996, Sun 1997, Yanagida 2008]. Diese Standardmethoden sind jedoch aufgrund der erforderlichen Versuchswiederholungen und diverser Messproblematiken sehr arbeits- und somit auch kostenintensiv. Deshalb ist das Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens die Etablierung einer geeigneten Methode zur Bestimmung der Erholungskinetik. Dazu werden Spannungsrelaxationsexperimente (SR) eingeführt. Der Vorteil dieser Methode ist die kontinuierliche Messung der zeitlichen Spannungsentwicklung für einen bestimmten Zustand. Es bedarf keiner aufwendigen Versuchswiederholungen. Obwohl diese Messmethode seit vielen Jahren bekannt und vielfach untersucht worden ist, wurde sie jedoch bis heute nur selten gezielt für die Untersuchung der Erholung eingesetzt [Bradley 1976, Hart 1967, Hart 1970, Lee 1971, Hart 1973, Ilchner 1973, Hausselt 1975, Blum 1976, Hausselt 1976, Jakobsen 2009, Pantleon 2009, Smith 2007]. Aus diesem Grund war es notwendig, für die Verifizierung der Spannungsrelaxationsversuche (SR) zusätzlich eine bereits zur Bestimmung des Entfestigungsverhaltens erfolgreich eingesetzte Standardmethode – Doppelzugversuche (DZ) – anzuwenden [Wilber 1968, Kwon 1990, Fernández 1999, Li 1996, Sun 1997, Yanagida 2008]. Dabei werden erstmals im direkten Vergleich zwei Arten an Doppelzugversuchen durchgeführt: Doppelzugversuche unbelastet (DZU) und die Doppelzugversuche mit Last (DZL). Die ermittelten Spannungszeit-Verläufe der drei angewandten Methoden SR, DZL und DZU werden miteinander verglichen und diskutiert. Weiterhin ermöglichen die erzielten Ergebnisse eine Diskussion über die ablaufenden physikalischen Prozesse und deren Parameter, wie z.B. Aktivierungsenergien. Die Aktivierungsparameter sollen letztendlich Aufschluss über die dominierenden Prozesse während der Erholung geben.

Mittels der vorliegenden experimentellen Ergebnisse war ein weiteres Ziel der Arbeit ein Modell zu entwickeln, das eine präzise Vorhersage der Spannungsentwicklung während der Erholung ermöglicht. Es werden die Überprüfung vorhandener Modelle und die Entwicklung und Validierung eines neuen Versetzungsdichte-basierten Erholungsmodells vorgestellt. Dieses Modell soll zur Beschreibung der auftretenden Erholungsprozesse und insbesondere deren Spannungsabhängigkeit dienen [Roters 1999, Goerdeler 2007, Gurla 2007, Mohles 2008, Brüggemann 2009]. Die Validierung der Modelle erfolgt mittels der experimentellen Ergebnisse der drei Versuchsmethoden. Dabei sollen die Mechanismen, die Gesetzmäßigkeiten, die während spannungsfreier und spannungsunterstützter Erholungsprozesse herrschen, und deren Abbildung diskutiert werden. Schlussendlich besteht die Möglichkeit die gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung des bereits vorhandenen physikalischen, versetzungsbasierten Verfestigungsmodells 3IVM+ zu verwenden.



2 Ver- und Entfestigung

Die gute Verformbarkeit metallischer Werkstoffe ermöglicht einen weiten Einsatz in verschiedenen Bereichen. Die Umformung kann dabei von verschiedenen Prozessen wie Diffusion, mechanische Zwillingbildung, Korngrenzgleitung oder kristallographische Gleitung getragen werden, welche einen irreversiblen Materialtransport zur Folge haben. Der dominierende Prozess beeinflusst die Materialeigenschaften. Somit ist das Verständnis des Verformungsverhaltens und der ablaufenden Mechanismen von großer wissenschaftlicher Bedeutung. In großen Bereichen der Spannung und Temperatur wird die Verformung hauptsächlich durch kristallographische Gleitung getragen, d.h. durch die Induzierung und Bewegung eindimensionaler Kristallbaufehler, den Versetzungen.

Zur Erzielung hoher Umformgrade werden oftmals thermomechanische Behandlungen durchgeführt. Diese haben ein Wechselspiel der Verfestigungs- und Entfestigungsvorgänge im Material zur Folge. Allgemein lässt sich sagen, dass insbesondere zwei Entfestigungsprozesse große Bedeutung haben: Erholung und primäre, statische Rekristallisation. Die treibende Kraft für beide Prozesse ist der Abbau der gespeicherten Energie des verformten Zustandes. Aus diesem Grund konkurrieren die beiden Entfestigungsprozesse Erholung und primäre, statische Rekristallisation miteinander. Erholungsprozesse können die treibende Kraft für die Rekristallisation stark reduzieren und diese somit verzögern bzw. sogar verhindern [Gottstein 2006]. Gleichermaßen sind jedoch Erholungsprozesse für die Keimbildung bei der Rekristallisation unabdingbar. Daraus resultiert, dass die beiden Prozesse zugleich auftreten können und ihre Unterscheidung in diesem Übergangsbereich erschwert ist. Beide Entfestigungsprozesse können sowohl während (dynamisch) als auch im Anschluss (statisch) an die Verformung eine entscheidende Rolle spielen.

In den folgenden Kapiteln wird sowohl auf die Verfestigung, explizit durch Induzierung und Bewegung der Versetzungen, als auch auf den Entfestigungsprozess Erholung, der durch die Annihilation und Umordnung der Versetzungen gesteuert wird, detailliert eingegangen. Anschließend werden Modelle zur Beschreibung des Ver- und Entfestigungsverhaltens zellbildender Metalle wie Aluminium vorgestellt.