Zentrum für Technomathematik

Fachbereich 3 – Mathematik und Informatik

Bewerten von Modellen der Martensitbildung bei nichtmonotoner Abkhlung für den Stahl 100Cr6

Michael Wolff **Friedhelm Frerichs**
Natalja Lysenko

Report 07–01

Berichte aus der Technomathematik

Report 07–01 **Januar 2007**

Bewerten von Modellen der Martensitbildung bei nichtmonotoner Abkühlung für den Stahl 100Cr6

Michael Wolff[1], Friedhelm Frerichs[2], Natalja Lysenko[1]

[1] *Zentrum für Technomathematik, Fachbereich 3, University of Bremen, D-28334 Bremen, Germany, mwolff@math.uni-bremen.de*

[2] *Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, Germany, frerichs@iwt-bremen.de*

Kurzfassung

Um das Verhalten von Stahlbauteilen im Zusammenhang mit der Wärmebehandlung zu simulieren, werden Modelle für die Phasenumwandlungen benötigt, die möglichst gut die Realität beschreiben. In der vorliegenden Arbeit werden anhand von Dilatometerdaten für den Wälzlagerstahl 100Cr6 verschiedene Modelle für die Martensitbildung vergleichend bewertet. Wir betrachten die Modelle nach Koistinen und Marburger, nach Leblond und Devaux sowie ihre Modifikationen, um ein zwischenzeitliches Halten oder Wiedererwärmen zu berücksichtigen. Des weiteren werden für strang-gegossenen und sprüh-kompaktierte Proben der Umwandlungsgrad mit dem Massen- und Volumenanteil verglichen.

Abstract

In order to simulate the behaviour of steel work-pieces in connection with heat treatment, one needs models of phase transformations which describe sufficiently well the reality. In the paper presented several models of martensitc transformation are evaluated, based on dilatometer data of the bearing steel 100Cr6 (SAE52100). We consider the models due to Koistinen and Marburger, to Leblond and Devaux as well as their modifications in order to take temporary holding of reheating into account. Besides this, mass fraction, volume fraction and transformation degree will be compared for continuously cast and spray compacting probes.

Schlüsselworte

Martensitbildung, Umwandlungsmodelle, nichtmonotone Abkühlung, Bewerten von Modellen

1 Einführung

Die diffusionslose Umwandlung des Austenits in den Martensit beim Stahl wird mit verschiedenen Modellen beschrieben. Der bekannte Ansatz von Koistinen-Marburger [4, 6, 7, 14, 16, 21] gibt den Martensitanteil an, der sich aus dem zur Verfügung stehenden Austenit bei monotoner Abkühlung auf eine Temperatur unterhalb der Martensit-Starttemperatur bildet. Für nichtmonotone Abkühlverläufe machen sich Modifikationen nötig. Die Modellierung und Simulation des Materialverhalten von Stahlbauteilen während der Wärmebehandlung erfordert die Verwendung von Umwandlungsgesetzen in Form von Differentialgleichungen, die in das Gesamtmodell eingebunden werden. Wir verweisen hierzu sei auf [2, 9, 10, 13, 17, 19, 23, 26] und die dort zitierte Literatur. Neben dem Modell von Koistinen-Marburger gibt es in der Literatur weitere Ansätze für die martensitische Umwandlung (vgl. z.B. [4, 12, 15). Allgemein wird die Qualität dieser Ansätze danach bewertet, wie „gut“ die vom Modell berechneten Phasenanteile die aus den Messdaten erhaltenen approximieren (bezüglich diffusionsgesteuerter Umwandlungen sei zu diesem Vorgehen auf [5, 18] verwiesen). Aus den Dilatometermessdaten wird meist über einen Proportionalitätsansatz der sogenannte Umwandlungsgrad bestimmt und als Volumenanteil der sich bildenden Phase (in dieser Arbeit des Martensits) angesehen.

Genauere Analysen zeigen, dass dieser Umwandlungsgrad bei nicht-isothermen Umwandlungen (wie im Falle der Martensitbildung) vom Volumenanteil abweicht. Alternativ zum Umwandlungsgrad werden daher aus den Messdaten – bei Kenntnis der Dichten der beteiligten Phasen als Funktionen der Temperatur – der Massen- und Volumenanteil berechnet und miteinander und mit dem Umwandlungsgrad vergleichen. Als Konsequenz werden die Modellansätze anhand des Umwandlungsgrades und des Volumenanteils getestet.

In der vorliegenden Arbeit werden

- Anhand von Dilatometermessdaten (und der metallographischen Untersuchung) der Massen- und Volumenanteil des sich bildenden Martensits sowie der Umwandlungsgrad berechnet und miteinander verglichen,
- die Martensit-Starttemperatur und der Koistinen-Marburger-Parameter mit alternativen Methoden bestimmt und verglichen,
- verschiedene Modelle für die Martesitbildung bewertet, indem die von den Modellen berechneten Phasenanteile mit den aus den Daten ermittelten verglichen werden,

In dieser Arbeit werden nur spannungsfreie Umwandlungen betrachtet. Zu martensitischen Umwandlungen unter Spannungen und nach Vorverfestigung sei z.B. auf [1, 8, 9, 16, 20, 23 - 26] und die dort zitierten Quellen verwiesen.

2 Bestimmung des Martensitanteils aus den Messdaten

In dieser Arbeit wollen wir genau unterscheiden zwischen den Informationen, die direkt oder indirekt aus den Messdaten gewonnen werden (Dilatometerdaten und metallographische Analyse), und jenen Informationen, die unter Annahme eines speziellen Modells (z.B. des von Koistinen-Marburger) gewonnen werden.

2.1 Formeln zur Datenauswertung

Es wird angenommen, dass nur die beiden Phasen Austenit und Martensit auftreten. Unter Annahme einer linearen Mischungsregel für die Probenlänge des Phasengemisches (bezüglich der Volumenanteile) erhalten wir für den Volumenanteil des Martensits zum Zeitpunkt t:

$$p_{v2}(t) = \frac{l(\theta(t)) - l_1(\theta(t))}{l_2(\theta(t)) - l_1(\theta(t))}. \tag{2.1}$$

Dabei sind l die aktuelle Länge (als Funktion der gemessenen Temperatur $\theta = \theta(t)$) und l_1, l_2 die Längen der Probe, wenn sie vollständig aus Austenit bzw. Martensit bestünde. In der Folge bezieht sich der Index 1 auf den Austenit und der Index 2 auf den Martensit. Die Größe auf der rechten Seite von (2.1) wird auch *Umwandlungsgrad* genannt. Während l_1 durch Interpolation der vor der Umwandlung gemessenen Längen erhalten wird, muss (für unvollständige Umwandlungen) l_2 aus der Länge l_g des Gemisches Martensit-Restaustenit berechnet werden. Unter der Annahme, dass bei moderatem Wiedererwärmen der Probe nach Erreichen der Raumtemperatur θ_{RT} sich die Phasenanteile nicht ändern, wenden wir die lineare Mischungsregel an und erhalten

$$l_g(\theta(t)) = l_1(\theta(t))\, p_{v1}(\theta_{RT}) + l_2(\theta(t))\, p_{v2}(\theta_{RT}), \tag{2.2}$$

woraus wegen

$$p_{v2}(\theta_{RT}) = 1 - p_{v1}(\theta_{RT}) \tag{2.3}$$

die folgende Formel zur Ermittlung des Martensit-Anteils folgt:

$$p_{v2}(t) = (1 - p_{v1}(\theta_{RT}))\, \frac{l(\theta(t)) - l_1(\theta(t))}{l_g(\theta(t)) - l_1(\theta(t))}. \tag{2.4}$$

Der Restaustenitgehalt $p_{v1}(\theta_{RT})$ ist metallographisch zu bestimmen (s. Punkt 2.2).

Bemerkung 1.1 Die Formeln (2.1) und (2.4) beruhen auf einer linearen Mischungsregel für die Längen, die sich *nicht* aus der Kontinuumsmechanik herleiten lässt. Aus diesem Grunde ist der Umwandlungsgrad in (2.1) bzw.(2.4) weder gleich dem Volumen- noch dem Massenanteil der sich bildenden Phase. Deshalb erhält der nach den Formeln (2.1) bzw. (2.4) berechnete Martensitanteil in der Folge den Index „ug“ (für Umwandlungsgrad). Bei vollständigen diffusionsgesteuerten Umwandlungen mit konstanter Umwandlungstemperatur ergibt sich der Umwandlungsgrad (2.1) durch Linearisierung aus dem Massenanteil (vgl. [22]).

Eine zu (2.4) alternative Formel kann aus der Kontinuumsmechanik hergeleitet werden, wenn die Probe als homogen (bezüglich Temperatur und Phasenverteilung) während der Umwandlung und isotrop angesehen wird (vgl. [22]). Zusätzlich zu den Dilatometerdaten werden die Dichte der Probe bei Raumtemperatur ρ_{RT} sowie die zugehörige Länge l_{RT} benötigt. Aufgrund der angenommenen Homogenität und Isotropie gilt der Zusammenhang zwischen Dichten und Längen

$$\frac{\rho_{RT}}{\rho(\theta)} = \left(\frac{l(\theta)}{l_{RT}}\right)^3, \tag{2.5}$$

wobei $\rho(\theta)$ und $l(\theta)$ zur gleichen Temperatur θ gehörende Dichte und Länge der Probe sind. Nach Ende der Austenitisierung und vor der Umwandlung stellt $\rho(\theta)$ die Dichte des Austenits als Funktion der Temperatur, nach (unvollständiger) Umwandlung während der moderaten Wiedererwärmung die des Gemisches Martensit-Restaustenit dar. Somit erhalten wir aus der gemessenen Länge und den Werten ρ_{RT} und l_{RT} die Dichte der Probe als Funktion der Temperatur (und somit auch der Zeit). Durch Interpolation über den jeweiligen Bereich des alleinigen Vorliegens hinaus erhalten wir die Dichten des Austenits ρ_1 und des Gemisches ρ_g für den relevanten Temperaturbereich der gesamten Umwandlung.

Es gelten die linearen Mischungsregeln für die Dichte und für die reziproken Dichten (vgl. [22])

$$\rho = \rho_1\, p_{v1} + \rho_2\, p_{v2}, \tag{2.6}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1}\, p_{m1} + \frac{1}{\rho_2}\, p_{m2}, \tag{2.7}$$

dabei sind ρ, ρ_1 und ρ_2 entsprechend die Dichten des Phasengemisches, des Austenits und des Martensits, während p_{v1} und p_{v2} (p_{m1} und p_{m2}) die Volumenanteile (Massenanteile) des Austenits bzw. Martensits sind. Für die Volumen- und Massenanteile gelten die Bilanzen

$$p_{v1}(t) + p_{v2}(t) = 1,\ p_{m1}(t) + p_{m2}(t) = 1 \qquad \text{für } t \geq 0, \tag{2.8}$$

Aus (2.6), (2.8) sowie (2.7), (2.8) folgen dann Formeln für die Evolution des Volumen- bzw. Massenanteils des Martensits:

$$p_{v2}(t) = \frac{\rho_1(\theta(t)) - \rho(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_2(\theta(t))} \qquad \text{für } t \geq 0, \tag{2.9}$$

$$p_{m2}(t) = \frac{\rho_2(\theta(t))}{\rho(\theta(t))} \bullet \frac{\rho_1(\theta(t)) - \rho(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_2(\theta(t))} \qquad \text{für } t \geq 0. \tag{2.10}$$

Die Formeln (2.9) und (2.10) besagen, dass der Unterschied zwischen Volumen- und Masseanteil klein ist, wenn es auch die Dichteunterschiede der Phasen (bei gleichen Temperaturen) sind. Glücklicherweise ist das beim Stahl der Fall, so dass oft die Unterschiede zwischen Massen- und Volumenanteilen vernachlässigt werden (vgl. Punkt 2.3 sowie [22]). Für das Gemisch Martensit-Restaustenit gelten die Beziehungen (vgl. (2.6), (2.7)):

$$\rho_g(\theta(t)) = \rho_1(\theta(t))\, p_{v1}(RT) + \rho_2(\theta(t))\, p_{v2}(RT), \tag{2.11}$$

$$\frac{1}{\rho_g(\theta(t))} = \frac{1}{\rho_1(\theta(t))}\, p_{m1}(RT) + \frac{1}{\rho_2(\theta(t))}\, p_{m2}(RT). \tag{2.12}$$

Somit erhalten wir aus (2.9), (2.11) sowie aus (2.10), (2.12) entsprechend die Formeln

$$(2.13) \qquad p_{v2}(t) = (1 - p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_1(\theta(t)) - \rho(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))} \qquad \text{für } t \geq 0,$$

$$(2.14) \qquad p_{m2}(t) = (1 - \frac{\rho_1(\theta_{RT})}{\rho_g(\theta_{RT})}\,p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_g(\theta(t))}{\rho(\theta(t))} \bullet \frac{\rho_1(\theta(t)) - \rho(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))} \qquad \text{für } t \geq 0,$$

wobei der allgemeine Zusammenhang zwischen Massen- und Volumenanteil (vgl. [22])

$$(2.15) \qquad p_{m1}(\theta_{RT}) = \frac{\rho_1(\theta_{RT})}{\rho_g(\theta_{RT})}\,p_{v1}(\theta_{RT})$$

berücksichtigt wurde. Mit Hilfe der Beziehung (2.5) kann die aktuelle Dichte $\rho(\theta(t))$ in den Formeln (2.9), (2.10), (2.13), (2.14) durch die aktuelle Länge der Probe ersetzt werden. Dabei können in (2.5) ρ_{RT} und l_{RT} durch $\rho_0 := \rho(\theta_0)$ und $l_0 := l(\theta_0)$ ersetzt werden, wobei ρ_0 und l_0 sich auf einen fest gewählten Zeitpunkt zwischen Austenitisierung und Umwandlung beziehen. Aus (2.5) und (2.13) folgt dann eine weitere Formel zur Bestimmung des Volumenanteils des Martensits

$$(2.16) \qquad p_{v2}(t) = (1 - p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_1(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))}\,\{\,1 - \frac{\rho_1(\theta_0)}{\rho_1(\theta(t))}\,(\frac{l(\theta_0)}{l(t)})^3\,\} \qquad \text{für } t \geq 0.$$

Analog folgt aus (2.5) und (2.14)

$$(2.17) \quad p_{m2}(t) = (1 - \frac{\rho_1(\theta_{RT})}{\rho_g(\theta_{RT})}\,p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_g(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))}\,\{\,\frac{\rho_1(\theta(t))}{\rho_1(\theta_0)}\,(\frac{l(t)}{l(\theta_0)})^3 - 1\,\} \qquad \text{für } t \geq 0.$$

Des weiteren ist in den Formeln (2.16) und (2.17) eine Linearisierung gemäß

$$(2.18) \qquad (\frac{l(\theta_0)}{l(t)})^3 = (\frac{l(t)}{l(\theta_0)})^{-3} = (1 + \frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)})^{-3} \approx 1 - 3\,\frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)},$$

$$(2.19) \qquad (\frac{l(t)}{l(\theta_0)})^3 = (1 + \frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)})^3 \approx 1 + 3\,\frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)}$$

möglich, was zu

$$(2.20) \quad p_{v2}(t) = (1 - p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_1(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))}\,\{\,1 - \frac{\rho_1(\theta_0)}{\rho_1(\theta(t))}\,(1 - 3\,\frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)})\,\} \quad \text{für } t \geq 0,$$

$$(2.21) \quad p_{m2}(t) = (1 - \frac{\rho_1(\theta_{RT})}{\rho_g(\theta_{RT})}\,p_{v1}(\theta_{RT}))\,\frac{\rho_g(\theta(t))}{\rho_1(\theta(t)) - \rho_g(\theta(t))}\,\{\,\frac{\rho_1(\theta(t))}{\rho_1(\theta_0)}\,(1 + 3\,\frac{l(t) - l(\theta_0)}{l(\theta_0)}) - 1\,\} \text{ für } t \geq 0$$

führt. Wie in Bemerkung 1.1 angesprochen, sind die Formeln (2.4) und (2.9) nicht identisch. Für vollständige diffusionsgesteuerte Umwandlungen bei *konstanter* Umwandlungstemperatur geben (2.4) und (2.20) den gleichen Wert. Der übliche Verwendung von (2.4) beruht auf der bequemer Handhabung, denn neben den Dilatometerdaten sind keine weiteren Informationen (bei vollständigen Umwandlungen) erforderlich. Zum numerischen Vergleich sei auf die Ergebnisse im Punkt 2.3 verwiesen.

2.2 Beschreibung von Material und Versuchsablauf, metallographische Analyse

Die chemische Zusammensetzung des verwendeten Stahls 100Cr6, stranggegossen bzw. sprühkompaktiert, ist in Tabelle 1 gegeben.

Herstellungsart	C	Si	Mn	S	Cr	Mo
strang-gegossen	0,97	0,21	0,43	0,004	1,50	0,089
sprüh-kompaktiert	0,88	0,22	0,43	0,008	1,56	0,048

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des untersuchten Stahls 100Cr6 (SAE52100) in Massenprozent

Die Proben wurden in drei Minuten linear auf 850°C aufgeheizt und dann zehn Minuten gehalten. Es wurden vier Abkühlvorgänge durchgeführt, jeweils für eine stranggegossene und eine sprühkompaktierte Probe, nämlich

1. linear auf 40°C (sprühkompaktierte Probe 6057, stranggegossene 6056)
2. linear auf 150°C, 10s halten, linear auf 40°C (sprühkompaktierte Probe 5779, stranggegossene 5783)
3. linear auf 150°C, dann linear auf 100°C, 10s halten, linear auf 40°C (sprühkompaktierte Probe 5780, stranggegossene 5784)
4. linear auf 150°C, linear auf 100° C, dann linear auf 150°C in 5s, linear auf 100°C in 5s, linear auf 40°C (sprühkompaktierte Probe 5781, stranggegossene 5785)

Dabei waren die Abkühlungsraten (26 K/sec) gleich, außer beim zwischenzeitlichen Wiedererwärmen in 4. Abkühlpfad. Nach der Martensitbildung wurden alle Proben linear von 40°C auf 120°C erwärmt, um die thermische Dehnung des Gemisches Martensit-Restaustenit zu bestimmen. Aus technischen Gründen wurden statt der Raumtemperatur 40°C gewählt, was eine mögliche Fehlerquelle darstellt.

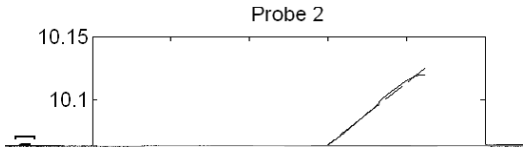
Nr. des Versuches	Interne Nummerierung	Abkühlungspfad	Art der Herstellung	Restaustenit (%)
1	6057	1	sprüh-kompaktiert	13
2	5779	2	sprüh-kompaktiert	14
3	5780	3	sprüh-kompaktiert	11
4	5781	4	sprüh-kompaktiert	14
5	6056	1	strang-gegossen	12
6	5783	2	strang-gegossen	14
7	5784	3	strang-gegossen	11
8	5785	4	strang-gegossen	10

Tabelle 2: Restaustenitgehalt und Erzeugungsart der einzelnen Proben

Für die Proben 1 und 5 wurden die Durchschnitte des Restaustenits der drei vorhandenen Werte für die jeweilige Herstellungsart genommen.

2.3 Ergebnisse: Vergleich von Massen- und Volumenanteilen mit dem Umwandlungsgrad

Sämtliche Berechnungen wurden mit dem kommerziellen Programm MATLAB® ausgeführt. Um bessere Ergebnisse erzielen zu können, wurden die Werte für die Temperatur und Längenänderung mit Hilfe eines FIR-Tiefpassfilters entrauscht.



ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: image

STACK: