

Mathematische und physikalische Simulation von Gefügevorgängen im Stahl während eines vielstufigen Axial-Radial-Umformprozesses

Peter Michael Müller

INHALTSVERZEICHNIS

Verwendete Bezeichnungen und Symbole	V
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	3
3 Stand der Kenntnisse	5
3.1 Austenitkornwachstum bei der Austenitisierung	5
3.2 Ver- und Entfestigung bei der Warmumformung	9
3.2.1 Erholung	10
3.2.2 Rekristallisation	11
3.3 Umwandlungsvorgänge	18
3.3.1 Ferritbildung	18
3.3.2 Perlitbildung	20
3.3.3 Bainitbildung	20
3.4 Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Gefügebildung . .	23
3.4.1 Ferrit	23
3.4.2 Perlit	24
3.4.3 Bainit	27
4 Versuchsmethodik	29
4.1 Versuchswerkstoffe	29
4.2 Verfahren für die Simulation der Warmumformung	30
4.3 Warmumformsimulation am WUMSI	30
4.4 Meßwerterfassung	32
4.5 Bestimmung der Vergleichsformänderungsverteilung	36
4.6 Metallographie und Sekundärprobenentnahme	36
5 Axial-Radial-Umformverfahren	39
5.1 Verfahrensprinzip	39
5.2 Prozeßbedingungen für den Vergleichsknoten während der Axial-Radial- Umformung	39
5.3 Umformparameter für die WUMSI-Versuche	41
5.4 Ermittlung der Abkühlgeschwindigkeit nach der Umformung	44

6 Vergleich verschiedener Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven	49
6.1 Grundlagen	49
6.2 Versuchsdurchführung	53
6.3 Versuchsergebnisse	54
7 Gefügemodell	59
7.1 Austenitkornwachstum	59
7.1.1 Experimentelle Durchführung	59
7.1.2 Versuchsergebnisse	59
7.1.3 Modellierung des Kornwachstums	62
7.2 Rekristallisationsverhalten	64
7.2.1 Versuchsdurchführung	65
7.2.2 Rekristallisationsbereiche	66
7.2.3 Bestimmung der Aktivierungsenergie Q_w	68
7.2.4 Mathematische Modellierung der rekristallisierten Korngröße	69
7.2.5 Kornwachstum nach der Rekristallisation	72
7.2.6 Anwendung des Modells auf einen vielstufigen Umformprozeß	73
7.3 Entfestigungsverhalten	76
7.3.1 Ermittlung der Verfestigung S	76
7.3.2 Temperaturkompensierte Zeit	79
7.3.3 Modellierung der Kinetik der (Rest-)Verfestigung S	80
7.3.4 Mathematische Umrechnung der (Rest-)Verfestigung für anisotherme Prozesse	85
8 Einfluß der Umform- und Abkühlbedingungen auf die mechanischen Eigen- schaften	87
8.1 Ergebnisse für den Werkstoff 16 MnCr 5	87
8.1.1 Einfluß der rekristallisierten Austenitkorngröße	87
8.1.2 Einfluß der (Rest-)Verfestigung und Abkühlgeschwindigkeit auf Gefügeausbildung und mechanische Eigenschaften	89
8.1.3 Gebrochene Abkühlung	95
8.1.4 Vergleich der erzielbaren mechanischen Eigenschaften	97
8.2 Mechanische Eigenschaften für den Stahl 42 CrMo 4	99
8.2.1 Direktkühlung	99
8.2.2 Vergütung	104
9 Zusammenfassung	108
10 Literatur	113

VERWENDETE BEZEICHNUNGEN UND SYMBOLE

d	Korngröße	$[\mu\text{m}]$
d_{α}	Ferritkorndurchmesser	$[\mu\text{m}]$
d_{γ}	Austenitkorngröße	$[\mu\text{m}]$
$d_{\gamma 0}$	Ausgangsaustenitkorngröße	$[\mu\text{m}]$
$d_{\gamma \text{dyn}}$	dynamisch rekristallisierte Korngröße	$[\mu\text{m}]$
f_{α}	Ferritanteil im Gefüge	
f_{p}	Perlitanteil im Gefüge	
k_{f}	Fließspannung	$[\text{MPa}]$
$k_{\text{f}0}$	Fließgrenze	$[\text{MPa}]$
k_{fs}	stationäre Fließspannung	$[\text{MPa}]$
k_{fmax}	maximale Fließspannung	$[\text{MPa}]$
$k_{\text{f},T}$	Fließspannung bei der Temperatur T	$[\text{MPa}]$
$k_{\text{f}0,T}$	Fließspannung eines vollständig entfestigten Werkstoffes bei der Temperatur T	$[\text{MPa}]$
k_{s}	Korngrenzenwiderstand für Perlit	$[\text{MPa } \mu\text{m}^{1/2}]$
k_{y}	Korngrenzenwiderstand für Ferrit	$[\text{MPa } \mu\text{m}^{1/2}]$
N_{d}	Perlitkorndurchmesser	$[\mu\text{m}]$
P	Perlitkoloniegröße	$[\mu\text{m}]$
φ	Umformgrad	
φ_{k}	kritischer Mindestumformgrad für das Einsetzen dynamischer Rekristallisation	
φ_{s}	Umformgrad zu Beginn des stationären Bereichs	
φ_{max}	Umformgrad bei maximaler Fließspannung	
φ_{i}	Teilumformgrad eines Umformstiches in einer Umformsequenz	
φ_{eff}	für die Rekristallisation wirksamer Umformgrad	
$\dot{\varphi}$	Umformgeschwindigkeit	$[\text{s}^{-1}]$
Q	Aktivierungsenergie	$[\text{kJ mol}^{-1}]$
Q_{W}	Aktivierungsenergie für die Warmumformung	$[\text{kJ mol}^{-1}]$
Q_{RV}	Aktivierungsenergie für die Entfestigung durch Erholung	$[\text{kJ mol}^{-1}]$
Q_{KW}	Aktivierungsenergie für das Kornwachstum	$[\text{kJ mol}^{-1}]$

R	allgemeine Gaskonstante	[kJ mol ⁻¹ K ⁻¹]
R _{p0,2}	Dehngrenze	[MPa]
R _m	Zugfestigkeit	[MPa]
S ₀	Perlitlamellenabstand	[μm]
T	absolute Temperatur	[K]
ϑ	Temperatur	[°C]
ϑ _U	Umformtemperatur	[°C]
ϑ _E	Endumformtemperatur	[°C]
\dot{T}	Abkühlgeschwindigkeit	[K s ⁻¹]
t	Zeit	[s]
t _p	Pausen- oder Haltezeit	[s]
t _H	Haltezeit für das Kornwachstum	[min]
t _{50%}	Zeit für Abbau der Verfestigung um 50%	[s]
t _{äq}	äquivalente isotherme Zeit	[s]
t _Z	Zementitlamellendicke	[μm]
X _{dyn}	dynamisch rekristallisierter Anteil im Gefüge	
X _{stat}	statisch rekristallisierter Anteil im Gefüge	
Z	Zener-Hollomon-Parameter	[s ⁻¹]
ΔT	Unterkühlung unter die Gleichgewichtstemperatur	[K]
k ₁ ..k ₃₁	werkstoffabhängige Konstanten	