

Praktikum Werkstoffmechanik
Studiengang: Chemie-Ingenieurwesen
Technische Universität München SS 2004

Härteprüfung

Oliver Gobin

27 Mai 2004

Betreuer: Dr. W. Loos

1 Aufgabenstellung

Zwei Versuche zur Härteprüfung wurden durchgeführt:

Im Versuch Abwalzen soll der Verlauf der Vickers-Härte eines 2 mm Aluminiumblechs als Funktion des Abwalzgrads graphisch dargestellt und diskutiert werden.

Im zweiten Versuch soll der Verlauf der Rockwellhärte bei zwei Jominy-Proben (C45 und 42CrMo4) bestimmt und wiederum diskutiert werden.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Theorie zum Versuch Abwalzen

2.1.1 Vorgänge beim Walzen

Walzen ist im wesentlichen eine 2-dimensionale plastische Verformung, Druck in der Blechnormalen, Zug in der Walzrichtung, während die Blechbreite nur unwesentlich zunimmt.

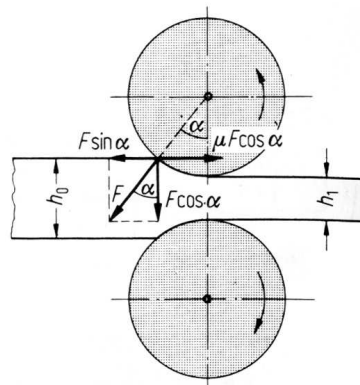


Abbildung 1: Kräfte beim Kaltwalzen

Für den Kontaktwinkel α (s. Abb.) gilt:

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \frac{\Delta h}{R}} \quad (1)$$

Mit dem Radius R der Walzen und der Blechdifferenz Δh . Für die Reibungskraft F_R , die den Werkstoff in die Walze zieht gilt:

$$F_R = \mu F \cos \alpha \quad (2)$$

Mit dem Reibungskoeffizient μ und der Druckkraft F .

2.1.2 Mikrostrukturelle Vorgänge

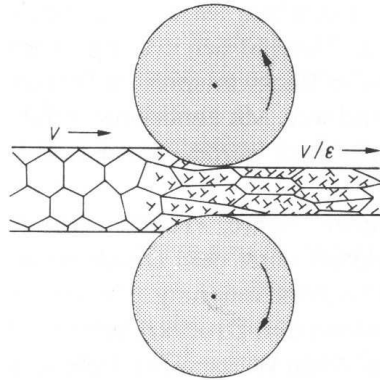


Abbildung 2: Mikrostrukturelle Vorgänge beim Kaltwalzen

Wie die obige Abbildung zeigt führen Walzvorgänge zu einer Änderung der Kornform und zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte. Dies wiederum führt zu einer höheren Anisotropie und zu einer Verfestigung des Bleches.

2.2 Theorie zu den Jominy-Proben

2.2.1 Thermodynamische Grundlagen

Grundlage für die Wärmeleitungsprozesse in den Jominy-Proben ist die Wärmeleitungsgleichung¹ in 3 Dimensionen:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \dot{f} + \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(y, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

wobei \dot{f} Wärmequellen kennzeichnet.

Für den 1-Dimensionalen Fall, wo nur die neutrale Faser betrachtet wird, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - c \cdot (T(x, t) - T_0) \quad (4)$$

Der Term $-c \cdot (T(x, t) - T_0)$ kennzeichnet den Wärmeverlust senkrecht zu den Mantelflächen, der allerdings erst nach einer gewissen Zeit einsetzt. Vernachlässigt man auch diesen Term so erhält man:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung ergibt folgende analytische Lösung mit einer Variablen c mit der man das Modell anpassen kann:

$$T(x, t) = T_0 + (T_S - T_0) \cdot e^{-\frac{c \cdot t}{x}} \quad (6)$$

¹Wärmeleitungsgleichung: <http://www.we.fh-osnabrueck.de/~labsim/projekte/jominy/node4.html>

2.3 Härbarkeit und mikrostrukturelle Vorgänge

2.3.1 Bedingungen für Härbarkeit

Die erreichbaren Härte und Festigkeitswerte bei der martensitischen Härtung von Stählen sind von der Austenisierungstemperatur und -zeit, von der Abkühlgeschwindigkeit und von der Stahlzusammensetzung abhängig. Allgemein treten durch die Wärmeleitungsmechanismen und durch die Abmessungen des Werkstücks lokal unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten auf, was zu mehr oder weniger martensitischer Umwandlung des Gefüges führt.

Für eine vollständige martensitische Umwandlung werden schnelle Abkühlgeschwindigkeiten benötigt, ansonsten treten die Umwandlungen nicht vollständig oder überhaupt nicht mehr auf. Diese Umwandlungsgrade werden bei den Jominy-Proben durch eine gezielte Abkühlung an den Stirnflächen hervorgerufen. Dabei wird nach der Norm EN ISO 642² gearbeitet, was einer sofortigen Abschreckung der Stirnfläche nach dem Anlassen von mindestens 10 Minuten mit einem Wasserstrahl entspricht.

Durch die Abschreckung an der Stirnfläche erreicht man wie gesagt eine vollständige martensitische Umwandlung. An der Stirnfläche selber ist die Abkühlgeschwindigkeit größer als die benötigte kritische Abkühlgeschwindigkeit und es bildet sich ein hartes martensitisches Gefüge aus. Je weiter man sich von der Stirnfläche entfernt, desto kleiner ist die Abkühlgeschwindigkeit, bedingt durch die Wärmeleitung durch die Probe. Es entsteht ein Gefüge mit geringerem martensitischem Anteil und immer größeren Anteilen an oberer und unterer Zwischenstufe. Am Probenende bildet sich bei geringer legierten Stählen wie beim CK45 teilweise sogar ein ferritisch-perlitisches Gefüge aus³.

2.3.2 Maximale Härbarkeit

Die maximal erreichbare Härte von Stählen, die Aufhärbarkeit, ist im wesentlichen vom Kohlenstoffgehalt abhängig, die Einhärbarkeit, die angibt welche Härte in welcher Tiefe erreichbar ist, hängt von Zusammensetzung der Legierung ab. Daher haben Legierungen mit dem gleichen Kohlenstoffgehalt prinzipiell die gleiche maximale Härte.

2.3.3 Martensit im FeC

Ein martensitisches Gefüge bildet ein tetragonal verzerrtes raumzentriertes Gitter mit eingelagerten Kohlenstoffatomen aus (Abb 3), durch die der Martensit ein je nach Kohlenstoffgehalt bis zu 1% größeres Volumen gegenüber dem Ferrit besitzt. Dadurch entstehen starke Gitterspannungen, die dem Stahl eine sehr hohe Härte und ein geringes Formänderungsvermögen geben. Teilweise entstehen durch diese starken Spannungen auch Härterisse.

Wegen der großen Elastischen Verzerrung durch den Martensit ist die Energiebarriere zur Bildung eines kritischen Keims so hoch, dass sie nicht durch homogene Keimbildung überwunden werden kann. Daher werden andere Keimbildungsmechanismen benötigt:

Die heterogene Keimbildung an Defekten (Versetzungen im Verzerrungsfeld) oder die Umwandlung durch Phononen.

²ISO 642:1999 Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test)

³Gefügeausbildung unterschiedlicher Legierungen: <http://www.metallograf.de/jominy/jominy.html>

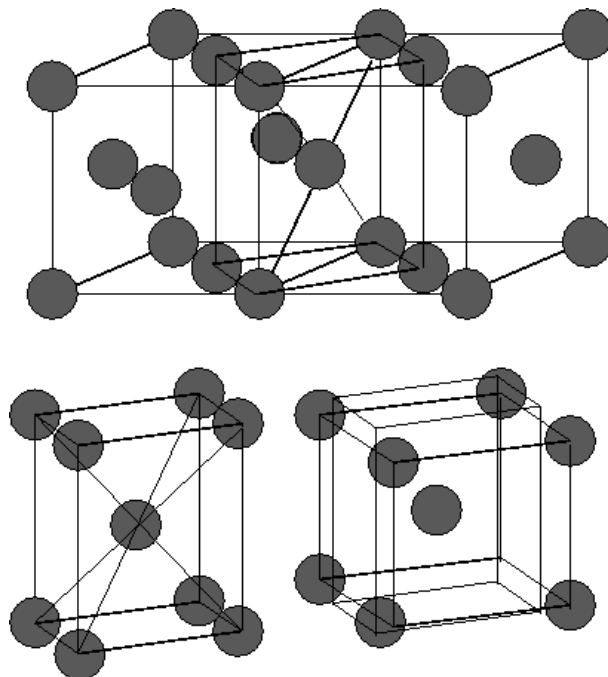


Abbildung 3: Martensitische FeC Verzerrung (Grundlage für Baintransformation)

Die Umwandlung durch Phononen bedeutet, dass eine Gitterschwingung die benötigten Atomverschiebungen vorrausnimmt und sich so erste Keime bilden, um die Austenit-Martensit Umwandlung zu starten.

Hat sich ein Keim durch einen der obigen Mechanismen gebildet, so erfolgt das weitere Wachstum aufgrund des starken Spannungsfelds sehr schnell. Beim Martensit handelt es sich daher um ein stark kinetisch gehemmt und thermodynamisch instabiles System. Mehr über die Theorie der Matensitischen Umwandlungen unter ⁴.

3 Versuchsdurchführung

Im ersten Teil soll ein Stück Aluminiumblech nacheinander um jeweils etwa 0,2 mm abgewalzt und die Vickers-Härte bei 5 Kilopond (5 kg in der Erdschwere) gemessen (HV5) werden.

Im zweiten Teil soll die Rockwell C Härte der Jominy-Proben C45/450°C und 42CrMo4/300°C jeweils im 5 mm Abstand von der Stirnfläche untersucht werden, wobei die erste Messung bereits bei 2 mm stattfinden soll.

⁴Martensitische Umwandlungen: <http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/skript/teil1/node108.html>

4 Auswertung und Diskussion

4.1 Versuch Abwalzen

Folgendes Diagramm haben wir aus den gemessenen Daten erhalten (die gemessenen Werte sind im Anhang zu finden):

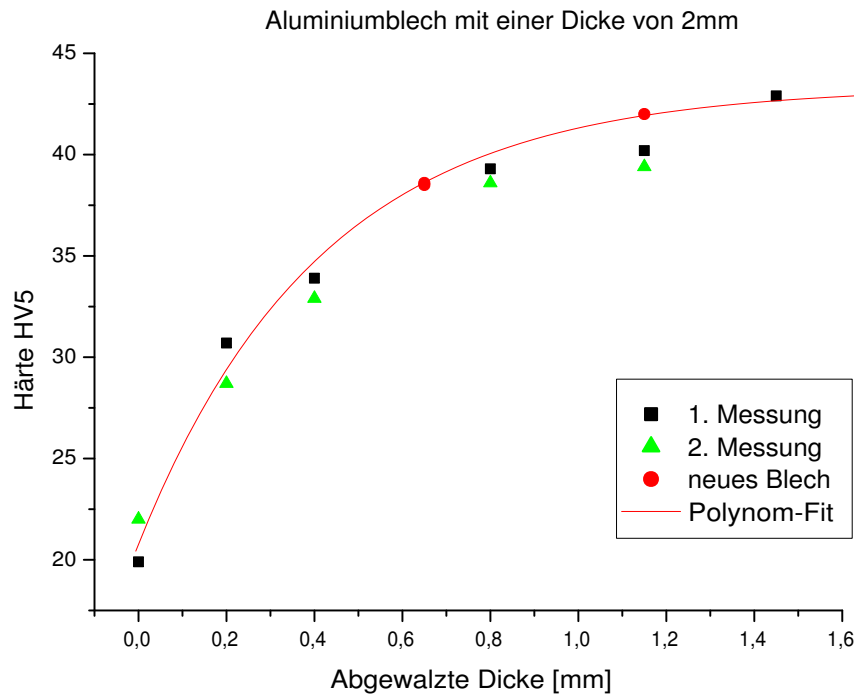


Abbildung 4: Versuch Abwalzen

Die theoretischen Grundlagen decken sich relativ gut mit den gemessenen Daten. Es wurden jeweils zwei Messungen durchgeführt, wobei wir einige Werte an einem zweiten identischen Blech gemessen haben, da bei einem Walzvorgang zuviel vom ersten Blech abgewalzt wurde und uns ansonsten einige Zwischenwerte gefehlt hätten. Das zweite Blech wurde sofort auf die entsprechende Dicke abgewalzt, ohne die bereits erfolgten Walzvorgänge des ersten Blechs zu wiederholen.

Man erkennt eindeutig die Verhärtung als Funktion des Abwalzgrades. Dies ist wie in (2.1.2) beschrieben auf die wachsende Anisotropie im Blech zurückzuführen. Die Härte steigt allerdings nicht linear an sondern geht asymptotisch gegen eine maximale Härte. Dies zeigt, dass durch das Kaltwalzen nur eine bestimmte maximale Anzahl an Anisotropie und Versetzungen hervorgerufen werden kann und man dadurch nur eine bestimmte Härte erreichen kann.

Dadurch, dass wir Messungen an zwei unterschiedlichen Blechen gemacht haben, erkennt man außerdem, dass die Historie und die Anzahl der Walzvorgänge keinen oder nur einen kleinen Einfluss auf die Härte hat.

4.2 Jominy-Proben

4.2.1 C45/450°C

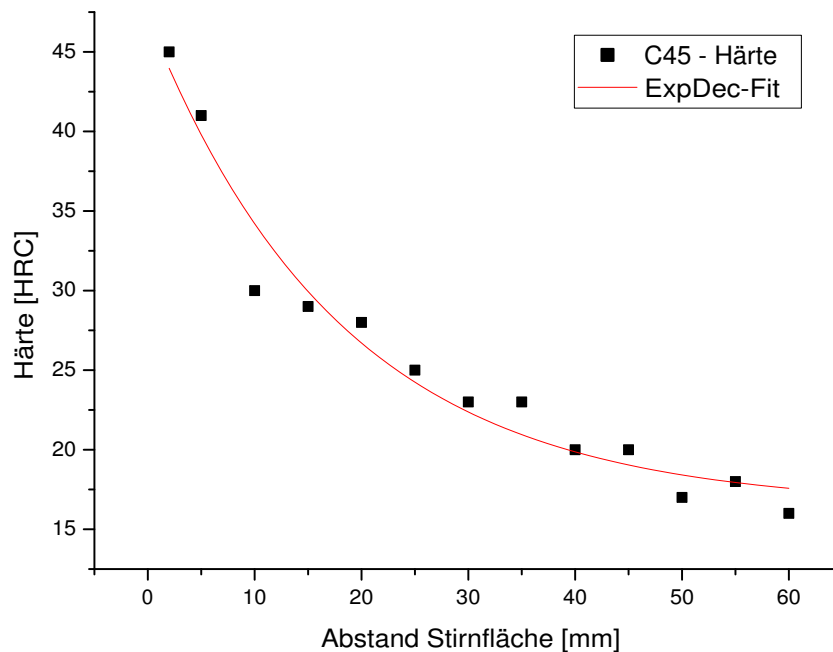


Abbildung 5: Jominy-Probe: C45

Bei Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt grösser als 0,25% Kohlenstoff ist die kritische Abkühlgeschwindigkeit für den praktischen Härtebereich erreichbar und können daher vergütet werden. Dabei hat, wie schon bei den theoretischen Grundlagen erwähnt, der Kohlenstoffgehalt einen direkten Einfluss auf die maximal erreichbare Härte, wobei der maximale Gehalt an Kohlenstoff für Stahl 2% beträgt (vgl. Fe-C-Diagramm).

In unserem Fall haben wir eine Jominy-Probe mit einem Gehalt von 0,45% untersucht und eine maximale Härte von mindestens 45 HRC ermittelt (Abb 5). In diesem Bereich nahe der Stirnfläche besteht das Gefüge, aufgrund der starken Abschreckung und dem damit verbundenen thermodynamischen Ungleichgewicht, nur aus Martensit. Je weiter wir uns von der Stirnfläche entfernen umso mehr Zeit hat das Gefüge sich dem thermodynamisch stabilen Ferrit zu nähern (vgl. Wärmeleitungsgleichung unter 2.2.1) und es bildet sich am Ende der Jominy-Probe ein ferritsch-perlitisches Gefüge aus.

4.2.2 42CrMo4/300°C

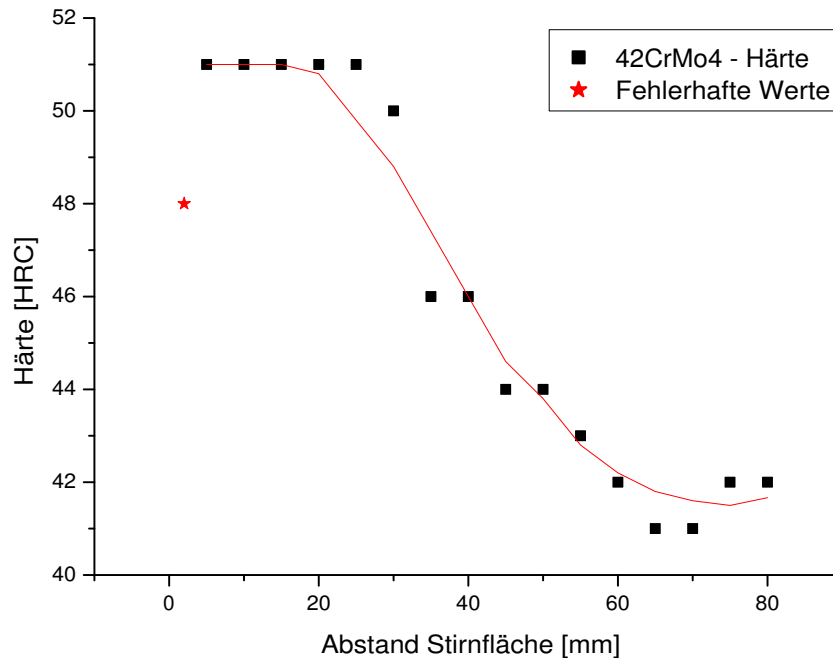


Abbildung 6: Jominy-Probe: 42CrMo4

Bei dem 42CrMo4-Stahl (0,42% C und 1% Cr) beobachtet man eine höhere Aufhärbarkeit als beim C45-Stahl und eine deutlich langsamere Abnahme der Härte mit dem Abstand zur Stirnfläche was neben der größeren Aufhärbarkeit auch eine größere Einhärbarkeit der Probe bedeutet. Die Beobachtete höhere Aufhärbarkeit ist allerdings vermutlich nur aufgrund der extrem schnellen exponentiellen Abnahme der Härte beim C45-Stahl zu beobachten. Da beide Proben den nahezu gleichen Kohlenstoffgehalt haben, sollten auch die maximalen Härten beider Proben etwa gleich sein.

Das Gefüge an der Stirnfläche besteht wie beim C45-Stahl ausschließlich aus Martensit. Beim Probenende des C45-Stahls gibt es jedoch keine martensitischen Gefügebestandteile mehr, dafür sogar teilweise ferritische. Der Cr-Stahl besitzt am Probenende noch immer etwa 20% Martensit und etwa 80% Zwischenstufe, jedoch keine ferritischen Bestandteile. Daran erkennt man, dass sich das thermodynamische Gleichgewicht nur schwierig einstellen kann, beispielsweise bedingt durch die erschwerte Diffusion der Cr-Atome.

5 Anhang

Blechdicke [mm]	Abgewalzte Dicke [mm]	Eindruckdiagonale	Härte [HV5]
2	0	0,685	19,9
2	0	0,65	22
1,8	0,2	0,568	28,7
1,8	0,2	0,55	30,7
1,6	0,4	0,525	33,9
1,6	0,4	0,531	32,9
1,2	0,8	0,486	39,3
1,2	0,8	0,485	38,6
0,85	1,15	0,485	39,4
0,85	1,15	0,48	40,2
0,55	1,45	0,472	42,9
1,35	0,65	0,491	38,5
1,35	0,65	0,49	38,6
0,85	1,15	0,47	42

Tabelle 1: Daten zum Versuch Abwalzen

Abstand zur Stirnfläche [mm]	Härte 42CrMo4 [HRC]	Härte C45 [HRC]
2	48	45
5	51	41
10	51	30
15	51	29
20	51	28
25	51	25
30	50	23
35	46	23
40	46	20
45	44	20
50	44	17
55	43	18
60	42	16
65	41	
70	41	

Tabelle 2: Daten zu den Jominy-Proben