

# Ermittlung der Härtbarkeit von Stählen Durch Berechnung

von

Doç. Dr. Ruşen GEZICI \*)

Der Grund, wofür der Stahl den Ruf gewonnen hat in der Fertigung der weitverwendeten Werkstoff zu sein, ist die Möglichkeit, seine Eigenschaften in weiten Grenzen verändert werden zu können. Um die Anwendungsbereiche des Stahls genau beschreiben zu können, ist zu wissen, wie und in welcher Weise seine verschiedenen Eigenschaften durch eine Wärmebehandlung beeinflusst werden kann. In der Praxis findet heute als ein häufig verwendetes Wärmebehandlungsverfahren das Härten des Stahls Anwendung. Man soll aber darüber hinaus auch die Härteannehmefähigkeit des Stahls kennen, damit man den Stahl richtig wärmebehandelt und bearbeitet werden kann.

Die Härtbarkeit kann man auch als Härtefähigkeit des Werkstoffes in der Tiefe definieren. Sie zeigt, unter welchen Bedingungen und um welchen Betrag der Werkstoff im Kern gehärtet werden kann. Als eine quantitative Grösse, die den Härtevorgang charakterisiert, ist die max. erreichbare Härte anzugeben. Da aber die Härte an der Oberfläche mit noch einfachen Methoden bestimmt werden kann, und nur vom Kohlenstoffgehalt abhängig ist, will man im allgemeinen die Härtetiefe als Härtbarkeitskenngrösse einführen.

In der heutigen Praxis hat diese Werkstoffeigenschaft eine weite und bedeutende Anwendung gefunden. Denn mit Bestimmung der Härtbarkeit hat der Stahlhersteller und -verbraucher für die Verständigung einen gemeinsamen Bezugspunkt gefunden.

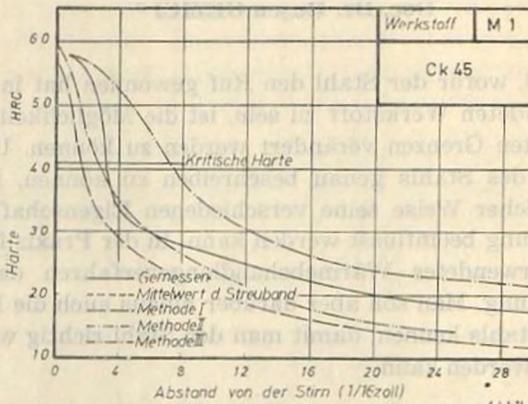
Wie schon bekannt ist, reicht die chemische Analyse des Stahls und die Kenntnis seiner Festigkeitseigenschaften nicht für die Abschätzung der Ergebnisse, die durch den Härtevorgang erzielt werden.

\*) Dozent bei der Fakultät für Maschinenbau in der Ege Üniversitesi - İZMİR.

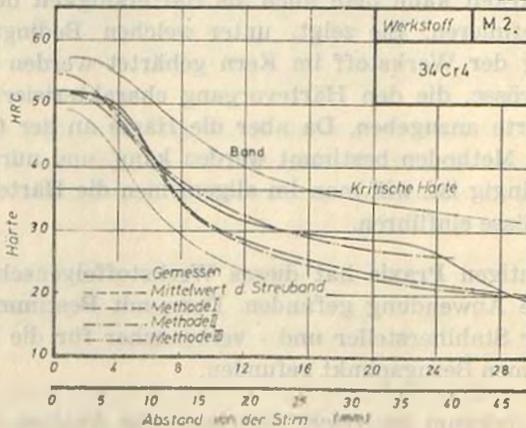
Es kann in der Praxis vorkommen, dass bei mehreren Werkstoffen mit gleichen Zusammensetzungen verschiedenen Härteverlauf und Härte-tiefen erreicht werden.

Die Spurenelemente, die während der Deoxidation in das Gefüge eingehen; innere Werkstofffehler, die beim Giessen oder beim Walzen des Stahls entstehen können; die Abkühlungsbedingungen und damit verbundenen Feinheit der Körngrößen; die mechanische Beanspruchungen und Wärmebehandlungen des Werkstoffes, können als Ursache dafür erwähnt werden.

Abb 1a



Abblb



Hinzu kommen noch, viele anderen neuen Faktoren, die während der Wärmebehandlung den Härtevergang beeinflussen. Sie hängen mehr von

Austenisierungsverhältnissen ab und sind bekanntlich Höhe der Härtetemperaturen; Anheizzeiten bis zum Erreichen dieser Temperatur; Wartezeiten bei dieser Temperatur und Abkühlungsbedingungen zu nennen.

Der Konstrukteur, der einen Stahl mit teuren Legierungsbestandteilen gewählt hat, um eine bestimmte Härtetiefe zu erreichen, wird natürlich nicht zufrieden sein, wenn das gewünschte Ergebnis aus oben genannten Gründen nicht erzielt werden kann. Um ein Missverständnis mit den Kunden auszuschliessen, wird auf der anderen Seite der Stahlhersteller sicher sein wollen, das vorher mit dem Kunden vereinbarte Härtebarkeitsgrösse in bestimmten Toleranzgrenzen erzielt und sogar abgeschätzt werden kann.

Aus diesen Gründen kommt der Härtungsfähigkeit, mit anderen Worten der Härtebarkeit des Stahls grosse Bedeutung zu, weil sie eine zuverlässige Grösse ist, die die Wahl des Stahls erleichtert und zweitens, weil sie eine messbare Grösse für Abnahmeprüfungen ist.

### **Bestimmung der Härtebarkeit durch Versuchen**

Die erreichbare max. Härte hängt nur von im Austenit aufgelöstem Kohlenstoffgehalt und auch teilweise von Austenisierungsverhältnissen ab. Dagegen ist die Härtetiefe und ihre Verteilung von Legierungsbestandteilen und von anderen verschiedenen Faktoren abhängig.

Es ist heute noch keine Methode erfunden worden, die das Härten verursachte Gefügeumwandlungen im inneren des Werkstoffes selbst oder indirektweise ihrer Wirkungen auf den Werkstoff verfolgen. Nach diesen Methoden wird als wichtigste Punkt die prozentuale Feststellung des Martensitischen Gefüge angesehen. Das kritische Durchmesser gibt an, wie gross der Durchmesser einer zylindrischen Werkstoffes sein soll, damit in seinem Kern eine bestimmte gefärbte Zone, z.B. aus 50 % Martensit, bildet. Obwohl mit so festgestelltem kritischem Durchmesser ein Vergleich der Härtebarkeit der Werkstoffe grundsätzlich möglich ist, bei der Anwendung gibt es gewisse Beschränkungen, da die Abkühlungsbedingungen unterschiedlich sein kann. Aus diesem Grund, als eine einfache und überall wiederholbare Methode, wird der Werkstoff gleich im Wasser bis zum Erreichen der Badtemperatur abgekühlt. Eine solche Abkühlung gilt als ideal und nennt man dann Standard-Abkühlung. Solche Abkühlungsbedingungen können immer wieder aufgestellt werden und ermöglichen dann ein sicheren Vergleich. Unter solchen Bedingungen bestimmten kritischen Durchmesser nennt man «ideal kritischen Durchmesser» und wird für Vergleiche als Standardmass angenommen.

Probe No		M1		Werkstoff nummer CA45						Werte sind aus dem Atlas entnommen		Abb 2a			
Analys und Korngrösse		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	ASTM				
Norm analyse	min	0,42	0,15	0,50											
	max	0,50	0,35	0,80	0,035	0,035									
Gemessene analyse		0,44	0,22	0,66	0,022	0,029	0,15					5			
Harte verlauf HRC		Abstand von der Stirn (1/16 Zoll) und mm													
		1/16 Zoll	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	16	20	26
		mm	1,6	3,2	4,8	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7	15,9	19,1	25,4	31,8	41,3
Nach Streuband															
Mittelwert der Streuband															
Gemessene mittelwerte			58	55	45	34	31,5	29	27	26,5	25	22	20	18,5	
Gerechnet 1			58			52,7			37,5		35,5	25,3	23,9	22,3	
Gerechnet 2			57			29,1			22,6			15,1			
Gerechnet 3			59,8	45,1	39,3	35,1		31,7	29	26,7	24,7	21	18,2	16,4	14,5
Beste näherung			+1,8	-10	6,7	-1,1		+1,7		1,2	1,8	-	3,8	-3,5	-4,0
Dj Berechn. methode		Gemessen	1	2	3	5	6	7	8	9	Beste näherung				
Ideale kritische Durchmesser		35,6	16,5	7,6	30,5	31	33,8	35,9	34,0	35	Methoden				

Probe No		M2		Werkstoff nummer 34Cr4						Werte sind aus dem Atlas entnommen		Abb 2b			
Analys und Korngrösse		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	ASTM				
Norm analyse	Min	0,30	0,15	0,50			0,90								
	Max	0,37	0,35	0,80	0,035	0,035	1,20								
Gemessene analyse		0,33	0,23	0,55	0,016	0,017	1,03	0,07	0,05			3-5			
Harte verlauf HRC		Abstand von der Stirn (1/16 Zoll) und (mm)													
		1/16 Zoll	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	16	20	26
		mm	1,6	3,2	4,8	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7	15,9	19,1	25,4	31,8	41,3
Nach Streuband			57	57	56	54		52	49	46	44	39	37	35	33
			49	48	45	41		35	32	29	27	23	21	20	
Mittelwert der Streuband			53	52,5	50,5	47,5		43,5	40,5	37,5	35,5	31	29	27,5	
Gemessene mittelwerte			52	52	51	50	47	43	40	37	34	31,5	20,5	29	25
Gerechnet 1			52			47,3			34,7			28,7	24,4	22,6	20,4
Gerechnet 2			52			49,1			34,7				25,7		
Gerechnet 3			54,5	55	50,5	46,2		42,8	40,1	37,8	35,8	32	29,4	27,5	25,6
Beste näherung			0			-0,9		-0,2	+0,1	+0,6			-3,8		
Dj Berechn. methode		Gemessen	1	2	3	5	6	7	8	9	Beste näherung				
Ideale kritische Durchmesser in mm		76,2	75,0	74,0	81,0	65,3	61,9	75,7	65,4	73,7	Methoden				

Eine sehr häufig angewendete Versuchsmethode für die Feststellung der Härtbarkeit ist Jominy-Stirnabschreckmethode.

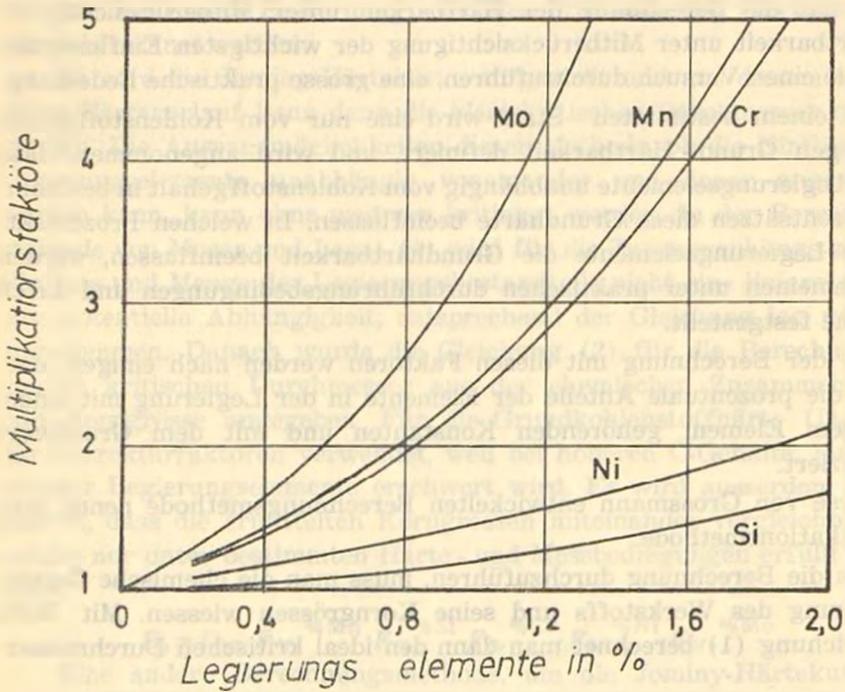


Abb.3

Neu vorgeschlagene Multiplikationsfaktöre

Wenn für verschiedene Werkstoffe eine Vergleichsgrösse bestimmt werden muss, wird bei dieser Methode auf dem Werkstoff durch Messungen diejenige gehärtete Zone festgestellt, die 50 % Martensitgefüge enthalten soll. Die Entfernung dieser Messtelle von der Stirnseite des Probes wird dann auf das Jominy-Härteverteilungsdiagramm aufgetragen. Sowohl zu dieser Grösse entsprechende, ideal kritischer Durchmesser angewendet wird, muss man aber nicht vergessen, dass die Härtbarkeit eines Stahls nur mit den Härteverteilungsbändern dargestellt werden kann.

### Berechnung der Härbarkeit

Die Versuche, die für den zahlenmässigen Ausdruck der Härbarkeit durchgeführt werden, kosten im allgemeinen viel Zeit und Werkstoff. Darum hat die Berechnung der Härbarkeit unter Mitberücksichtigung der Härbarkeit unter Mitberücksichtigung der wichtigsten Einflussgrössen, ohne einen Versuch durchzuführen, eine grosse praktische Bedeutung.

Bei einem bestimmten Stahl wird eine nur vom Kohlenstoffgehalt abhängigen Grund-Härbarkeit definiert, und wird angenommen, dass andere Legierungselemente unabhängig vom Kohlenstoffgehalt in bestimmten Prozentsätzen diese Grundhärte beeinflussen. In welchen Prozentsätzen die Legierungselemente die Grundhärbarkeit beeinflussen, werden im allgemeinen unter praktischen durchführungsbedingungen und durch Versuche festgestellt.

Bei der Berechnung mit diesen Faktoren werden nach einigen Methoden, die prozentuale Anteile der Elemente in der Legierung mit einem zu diesem Element gehörenden Konstanten und mit dem Grundwert multipliziert.

Diese von Grossmann entwickelten Berechnungsmethode nennt man Multiplikationsmethode.

Um die Berechnung durchzuführen, muss man die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs und seine Korngrössen wissen. Mit Hilfe der Gleichung (1) berechnet man dann den ideal kritischen Durchmesser.

$$D_1 = D_1 \cdot F_{Mn} \% \cdot M_n \cdot F_{Si} \% \cdot Si \cdot F_{Cr} \% \cdot Cr \cdot F_{Ni} \% \cdot Ni \cdot F_{Mo} \% \cdot Mo \quad (1)$$

Unter von verschiedenen Forschern angegebenen Multiplikationskonstanten bestehen aber grosse Unterschiede. Ausserdem wird behauptet, dass der Einfluss einiger Legierungselemente zur Härbarkeit, z.B. wie Cr und Mo, vom Kohlenstoffgehalt abhängig ist. Bei dieser einfachen Berechnungsmethode wird eine lineare Abhängigkeit unter der Elemente angenommen.

Forscher wie Holloman und Jaffe (2) haben gezeigt, dass die bei Berechnung der Grundhärbarkeit und auch der Multiplikationskonstanten angewendeten innere Werkstoffhärte im Grossen von der Bildung der Restelementen in Perlit oder Bainitik-Zwischenstufe abhängen. Hier wird auch angenommen, dass sich im Werkstoff kein aufgelöstes Karpid befindet. Eine andere bekannte Berechnungsmethode ist die von CRAFTS und LAMONT (3) entwickelten Additionsmethode. Hier werden die Aufhärtungswerte des Kohlenstoffes, der anderen Elemente und der Korn-

grösse, die entsprechend ihrer Anteile in der Legierung berechnet werden, addiert. Die Aufhärtungswerte, für 1 % Legierungsbestandteil werden aus Tabellen entnommen, und werden dann entsprechend ihrer Anteile berechnet. Mit Hilfe von Kohlenst und Martensit basis härte diagram können für eine bestimmte Entfernung von der Stirnseite des Werkstoffes die Härte berechnet werden.

So wird die Jominy-Härtekurve aufgestellt und aus diesem berechneten Härteverlauf kann dann die ideal kritischer Durchmesser ermittelt werden. Die Aussagemöglichkeiten dieser Methode, ob die Einflüsse aller Legierungselemente unabhängig voneinander und linear angenommen werden kann, kann ohne weiteres kritisiert werden. In der Berechnungsmethode von Moser und Legat (4) wird für die Zusammenhänge zwischen Einfluss und Menge der Legierungsbestandteile nicht eine lineare, sondern eine potentielle Abhängigkeit, entsprechend der Gleichung  $\log y = a + bx$ , angenommen. Danach wurde die Gleichung (2) für die Berechnung der idealen kritischen Durchmesser aus der chemischen Zusammensetzung und Korngrösse angegeben. Für die Grundkohlenstoffhärte ( $D_{1C}$ ) wird die Korrekturfaktoren verwendet, weil bei höheren C-Gehalte, Löslichkeit anderer Legierungselemente erschwert wird. Es wird ausserdem vorausgesetzt, dass die ermittelten Korngrössen miteinander vergleichbar sind, welche nur unter bestimmten Härte- und Messbedingungen erfüllt werden kann.

$$D_1 = D_{1C} \cdot F_{Mn}^{4\%Mn} \cdot F_{Si}^{0\%Si} \cdot F_{Cr}^{0\%Cr} \cdot F_{Ni}^{0\%Ni} \cdot F_{Mo}^{0\%Mo} \quad (2)$$

Eine andere Berechnungsmethode, um die Jominy-Härtekurve aus der chemischen Analyse zu ermitteln, wurde von Field (5) entwickelt. Bei diesem Verfahren wird angenommen, dass die erreichbare Härte an der Stirnfläche eine funktion von C-Gehalt und die Härten in einem Abstand von der Stirnfläche eine Funktion von ideal kritischem Durchmesser ist. Das Verhältnis der Anfangshärte (an der Stirnfläche) zur Abstandshärte ist für jeden Kohlenstoffgehalt eine konstante Funktion des idealen kritischen Durchmessers. Die berechneten Abstandhärten für mehrere Stirnabstände, ermöglichen, das Aufzeichnen einer Jominy-Härtekurve, ohne irgendeine Versuche durchzuführen. Bei diesen Berechnungen werden auch von dem idealen kritischen Durchmesser ausgegangen. Aber, wie alle anderen Methoden die eine theoretische Härte für 50 % ige Martensitgefüge zugrunde legen, besteht es die Gefahr, dass die berechneten Ergebnisse nicht mit den wahren Werten übereinstimmen können.

In der Praxis ist man noch mehr an dem gesamten Härteverlauf, anstatt der ideal kritischen Durchmessers interessiert, da der Härteverlauf zur Voraussage der Bauteilfestigkeit besser geeignet ist als Zahlenwerte.

Darum finden in den letzten Jahren, Z.B. die Methode von Just (6) durch multiple Regressionsanalyse für die Ermittlung von Jominy-Härtekurve weit verbreitete Anwendung.

Um die Gleichungen für die rechnerische Ermittlung von Härtekurven zu erstellen, werden aus dem gemessenen Härtekurven und wahren Material verwendet. Mit den dadurch gemessenen Härte- und Analysewerten gemeinsam wird multiplen Regressionsanalyse durchgeführt, um den quantitativen Einfluss der Legierungselemente ohne irgendeine Wirkfaktor zu errechnen.

Für die Berechnungen werden mittlere chemischeanalysenwerte genommen und daher ist der Gültigkeitsbereich nicht für die ganze Schargengewicht auszustrecken. Im allgemeinen kann gesagt werden, dass Regressionsmethode für bestimmte Materialgruppen sehr vorteilhaft, weil damit neue und spezielle Gleichungen entwickelt werden kann.

Die Gleichung (3) gibt die Härteberechnungsgleichungen nach Regressionsmethode wieder, die auch E-Abstand von der Stirnfläche enthält.

$$J_{6-40} = 98 \cdot \sqrt{C} - 0,1 E^2 \cdot \sqrt{C} + 20 Cr + 6,4 Ni + 19 Mn + 34 \cdot Mo + 28 V - 19\sqrt{E} + 1,8 E - 7 \text{ (HRC)} \quad (3)$$

#### Versuche und Vergleichsberechnungen :

Im Rahmen eines Versuchsprogramms wurde nach verschiedenen berechnungsmethoden ermittelten Härtebarkeitswerte verglichen. Für 10 ausgesuchte Werkstoffe aus dem Atlas und 6 Versuchswerkstoffe wurde nach 7 verschiedene Methode Berechnungen durchgeführt. Die berechneten Werte wurde mit den gemessenen und auf dem Härtekurven ermittelten Werte verglichen und wurde versucht die Abweichungen zu klären.

Die Erleichterungen durch elektronischen Rechenmaschine zu erzielen sind, haber für die weite Verwendung der Berechnungsmethoden sehr viel beigetragen. Es ist aber festzustellen, dass nach verschiedenen Berechnungsverfahren manchmal sehr unterschiedliche Härtebarkeitskennwerte ermittelt werden. Dabei wichtig ist es zu wissen, welche Methode oder Formeln für welchen Stahl und in welcher Legierungsgrenzen Gültigkeit haben.

Mann kann diese einfache Berechnungsmethoden erst dann mit Erfolg anwenden, wenn man für die Berechnung zu Grunde gelegte Wirkfaktoren und die Austenitizierungsbedingungen in Form als Korngrösse im engen Grenzen vor Auge hält und nicht die Gültigkeit darüber hinaus ausstreckt.



8 : Moser, exponansialfunktionen Methode

9 : Exponansial Methode, mit den neuen Faktoren

Neu vorgeschlagene Faktoren :

Es wurde festgestellt, dass für, nach verschiedenen Methoden ausgerechnete Härtebarkeitswerte, für ein bestimmten Material manchmal sehr starke Abweichungen zeigen. Als Grund dafür kann angegeben werden, dass die Wirkfaktoren, welche für unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Voraussetzungen festgelegt sind, ohne ihre Gültigkeitsgrenze zu beachten, für die weite bereiche verwendet werden. Nach heutigen Kenntnissen in diesem Gebiet, sind wir noch nicht in der Lage genau angeben zu können, ob diese Wirkfaktoren eine lineare oder potenzielle Beziehung mit den Gehaltprozenten haben oder ob sie mit anderen Legierungselemente und besonders mit C-Gehalt irgendwie eine Abhängigkeit haben. Aber trotzdem ist es ohne weiteres festzustellen, dass manche Methoden - unter genau beschränkten Bedingungen solche Ergebnisse herausgeben, die mit den gemessenen wirklichen Werten sehr gut übereinstimmen.

Es wurde von manchen Forschern (7, 8) versucht, bei den Berechnungen für einen bestimmten Legierungsbereich alle Wirkfaktoren, die an und für sich alle gleich sein sollten, zusammen zu addieren und die Berechnungen mit dem arithmetischen Mittelwert durchzuführen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde alle Angaben über Wirkfaktore, die dem Verfasser bekannt waren, zusammen in Betracht genommen, und dadurch eine Serie von neuen Wirkfaktoren für die wichtige Legierungselemente zusammengestellt (Abb. 3).

Für die Mittelwertberechnungen wurden die von Grossmann : Field (1); Kramer (9); Fostini (10); Retana (8) und Moser (4) verwendete Faktoren zu Grunde gelegt. Es wurde dann angenommen, dass diese Faktoren mit den Legierungsprozenten grundsätzlich einen potenziellen Zusammenhang haben (11). Die Berechnungen mit diesen neuen Wirkfaktoren (Methode 7 und 9) zeigten bessere Annäherungs zu den Gemessenen. Auf dem Tabelle (Abb. 4) sind die berechneten ideal kritischen Durchmesser für die Versuchsmaterial ( $D_1 - D_0$ ) wiedergegeben und diese mit den gemessenen wirklichen Werten verglichen. Die Bezeichnungen auf dem Tabelle a bis d, zeigen folgende Grössen :

a :  $D_0$  — ideal kritische Durchmesser nach Grund-Kohlenstoffhärte

b :  $D_1$  — ideal kritische Durchmesser nach Berechnung

- c : — kritische Abstand von der Stirnfläche
- d :  $D_1$  — ideale kritische Durchmesser gemessen auf dem Härteverlaufkurve.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, gibt es für jede Materialgruppe eine bestimmte Berechnungsmethode, die bessere Näherung zu den gemessenen Werten zeigen. Nach dieser Vergleichstabelle wurde herausgestellt, dass die Verwendbarkeit einer Berechnungsmethode für bestimmte Materialien genau zu begrenzen ist und mit neuen Wirkfaktoren, welche für bestimmten Material unter bestimmten Bedingungen festgelegt werden sollen, bessere Ergebnisse erzielt werden kann.

#### L I T E R A T Ü R

- 1 — M.A. Grossmann; M. Asimov : Am. Soc. for Metals Cleveland 1939.
- 2 — J.H. Hollomon; L.D. Jaffe : Trans. AİME 167 (1946) S. 601 - 616.
- 3 — W. Crafts; J.L. Lamont : Trans. AİME 167 (1946) S. 698 - 718.
- 4 — A. Moser; A. Legat : HTM 24 (1969) S. 100 - 105.
- 5 — J. Field : Metal Progress 43 (1943) S. 402 - 405.
- 6 — E. Just : HTM 23 (1968) S. 85 - 100.
- 7 — A. Legat, A. Moser : HTM 20 (1965) S. 91 - 97.
- 8 — A. Retana : Climax Özel Rapor ve Metal Progress 1971 S. 65 - 69.
- 9 — İ.R. Kramer; R.H. Hafner; S.L. Toleman : Trans. AİME 158 (1944) S. 138.
- 10 — R.V. Fostini : Climax Report 24 (1967).
- 11 — R. Gezici : Ege Üniv. Mak. Fak. Yayınları Habilitations arbeit (1974).