

**STUDIUM DES EINFLUSSES DER MECHANISCHEN
ZUGSPANNUNGEN IM BEREICH DER ELASTISCHEN
DEFORMATION
AUF DIE MAGNETOSTRIKTIONSEIGENSCHAFTEN
DES EISENS IM REMANENTEN ZUSTAND**

LADISLAV POTOČKÝ, Košice

EINFÜHRUNG

Mit dem Studium des Einflusses der elastischen Deformation auf die Magnetostriktion der Ferrromagnetika befassen sich mehrere Arbeiten [1—6]. In einigen von ihnen untersucht man die Wirkung der Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation auf die Magnetostriktionskurve [1—3] oder auf den Wert der Magnetostriktionskonstante [4] bei verschiedenen polykristallinen Ferrromagnetika, andere befassen sich mit dem Einfluß der elastischen Deformation auf die Magnetostriktionseigenschaften ferromagnetischer Einkristalle [5], [6].

In der Arbeit [7] wird der Einfluß der mechanischen Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation auf den remanenten Zustand der polykristallinen metallischen Ferrromagnetika untersucht. In diesem Zusammenhang weist man in der zitierten Arbeit darauf hin, daß — aus den experimentell gemessenen Abhängigkeiten der remanenten Magnetisierung von der elastischen Zugspannung — einige Schlussfolgerungen über den Charakter der Veränderungen der Magnetostriktionseigenschaften der Ferrromagnetika im remanenten Zustand im Verlauf der elastischen Deformation gezogen werden können. Für die Beschreibung der Magnetostriktionseigenschaften der Ferrromagnetika im remanenten Zustand wurde der Magnetostriktionskoeffizient M_r als eine, die der Änderung des Magnetfeldes um eine Einheit im remanenten Zustand entsprechende relative Längenänderung der Probe darstellende Größe eingeführt. M_r kann aus der Änderung der remanenten Magnetisierung, die durch Änderung der Zugspannung im Bereich der elastischen Deformation hervorgerufen ist, oder auch aus dem bekannten Verlauf des sinkenden Teiles der Hystereseschleife der Magnetostriktion bestimmt werden. Die Neigung der Tangente, die zu dieser Kurve im remanenten Zustand gehört, stellt den so eingeführten Magnetostriktionskoeffizienten dar.

In der zitierten Arbeit wurden für den Anfangszustand $\sigma = 0$ (σ — mechanische Zugspannung) die von den Verfassern der Arbeit [7] aus den gemessenen Abhängigkeiten der remanenten Magnetisierung von der elastischen Zugspannung erhaltenen I_R -Werte mit denen, die die sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion geboten haben und die für ähnliche Stoffe von anderen Verfassern experimentell erhalten wurden, verglichen. Der Vergleich der Werte ergab eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung. In der Literatur haben wir bis jetzt keine experimentellen Ergebnisse gefunden, die es ermöglichen würden, ähnliche Gegenüberstellung für nichtnullwertige σ durchzuführen. Zur Realisierung solcher Vergleiche ist es notwendig, den Verlauf der sinkenden Teile der Hystereseschleife der Magnetostraktion in der Nähe des remanenten Zustandes bei verschiedenen Zugspannungen im Bereich dieser Kurve im remanenten Zustand gehört, ergibt dann den Wert des Magnetostraktionskoeffizienten I_R für die jeweilige Spannung.

Das Ziel dieser Arbeit ist es am Eisen den Verlauf der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion in der Nähe des remanenten Zustandes für verschiedene Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation experimentell zu untersuchen, die Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der elastischen Zugspannung zu messen und weiter die Werte von I_R , die die beiden Messungen für $\sigma \gg 0$ liefern, zu vergleichen.

PROBEN UND MEßMETHODE

Die Messungen wurden an Proben aus Karbonyleisen in Form dünner Bändchen der Abmessungen $344 \times 7,3 \times 0,32$ mm durchgeführt. Die Proben wurden im Institut für magnetische Werkstoffe in Jena hergestellt. Vor dem Messen wurden die Proben bei einer Temperatur von 650°C fünf Stunden im Wasserstoff geätzt. Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Proben war kleiner als $2^\circ\text{C}/\text{min}$.

Anschließend wurde bei den Proben die Elastizitätsgrenze aus der Messung der Spannung—Verlängerung—Kurve bestimmt. Diese betrug $13,5$ kp/mm². Die magnetische Induktion des remanenten Zustandes wurde mit der ballistischen Methode unter Anwendung einer in der Mitte der Probe untergebrachten Meßspule, wie in der Arbeit [7], gemessen. Die Proben wurden im Solenoid magnetisiert; dieses lieferte in der Längsrichtung der Probe ein Magnetfeld von einer Homogenität besser als $99,4\%$. Die Art der Unterbringung der Probe im Solenoid wurde so gewählt, damit sie ermöglicht den magnetischen Anfangszustand der Probe auch ohne Einspannung der Enden zu untersuchen. An den zu den Messungen herangezogenen Proben wurden

keine Unterschiede bezüglich des magnetischen Anfangszustandes in der Mitte der Probe beim Einspannen und ohne Einspannen der Enden festgestellt. Mit Rücksicht auf die geometrischen Abmessungen der untersuchten Proben konnte der Entmagnetisierungseinfluß der Probenenden vernachlässigt werden. Die sinkenden Teile der Hystereseschleife der Magnetostraktion in der Nähe des remanenten Zustandes wurden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen gemessen. Zur Auswertung der Änderungen des Widerstandes der Dehnungsmessstreifen wurde die statisch-dynamische tensometrische Apparatur TDA-3, ein Erzeugnis der Mikrotechna verwendet.

Die Messung wurde zuerst an einer unbelasteten Probe und dann bei verschiedenen konstanten Werten der Zugspannung ausgeführt. Die Streuung der Meßwerte betrug $\pm 5\%$.

Die angeführten experimentellen Ergebnisse sind Mittelwerte aus sechs Messungen.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE AUSWERTUNG

In Abb. 1 ist die Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung I_R von der aufgelegten Zugspannung σ dargestellt.

Wie in der Arbeit [7] gezeigt, aus den gemessenen Abhängigkeiten $I_R = I_R(\sigma)$ kann auf die Magnetostraktionseigenschaften des Ferromagnetikums im remanenten Zustand, im Prozess der elastischen Deformation, geschlossen werden. Aus den Messungen an entlasteten Proben geht hervor, daß die durch elastische Zugspannung hervorgerufenen Änderungen der remanenten Magnetisierung vom makroskopischen Standpunkt einen reversiblen Charakter haben. Deswegen kann man die durch die Änderung der Zugspannung hervorgerufene Änderung der Magnetisierung und die durch die Änderung der Magnetfeldstärke hervorgerufene relative Längenänderung des Ferromagnetikums mit Anwendung der thermodynamischen Gleichung [8]

$$\left(\frac{\partial I}{\partial \sigma}\right)_H = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial H}\right)_\sigma \quad (1)$$

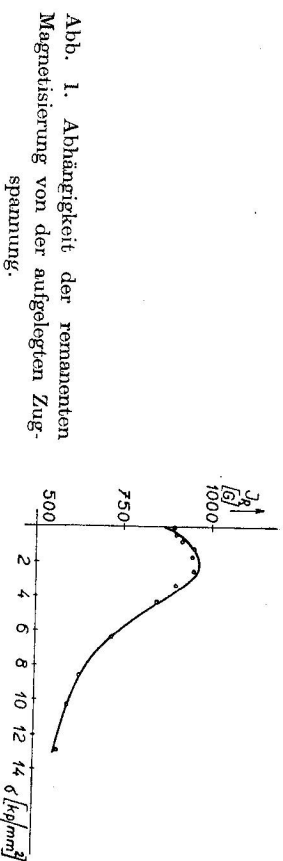
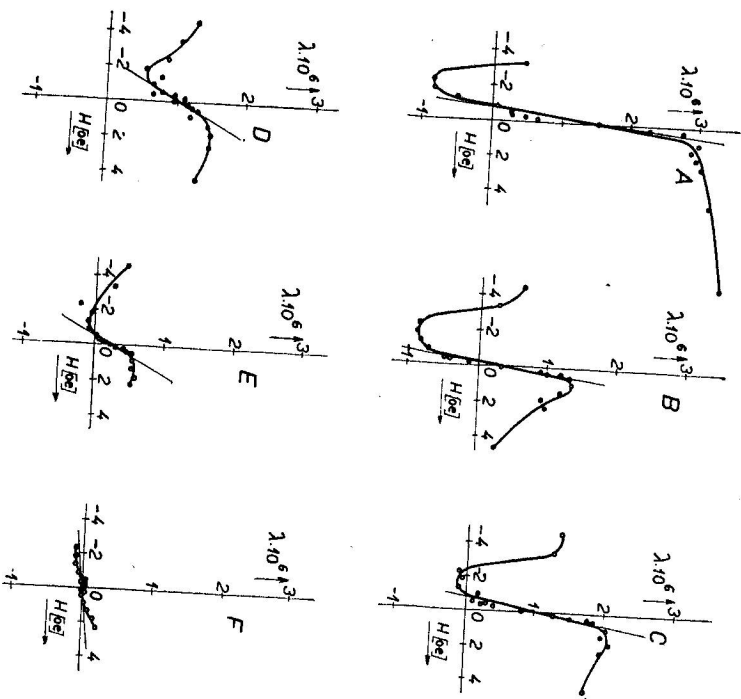


Abb. 1. Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der aufgelegten Zugspannung.

in Zusammenhang bringen. Hierbei ist I — Magnetisierung, H — Magnetfeldstärke, l — Länge der Probe.

In unserem Fall entspricht der Ausdruck $\left(\frac{\partial I}{\partial \sigma}\right)_H$ der durch die Änderung der Zugspannung hervorgerufenen Änderung der remanenten Magnetisierung, d. h. $\left(\frac{\partial I_R}{\partial \sigma}\right)_{H=0}$ und $\frac{1}{l} \left(\frac{\partial I}{\partial H}\right)_\sigma$ stellt den eingeführten remanenten Magnetostruktionskoeffizienten λ_R dar.

Wie ersichtlich, die Werte λ_R können durch Ableitung der Abhängigkeit $I_R = I_R(\sigma)$ berechnet werden, wodurch wir die Funktion $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$ erhalten, die ihrerseits wiederum die Magnetostruktionsseigenschaften des verschie-



A: $\sigma = 0$
 B: $\sigma = 0,43 \text{ kp/mm}^2$
 C: $\sigma = 0,86 \text{ kp/mm}^2$

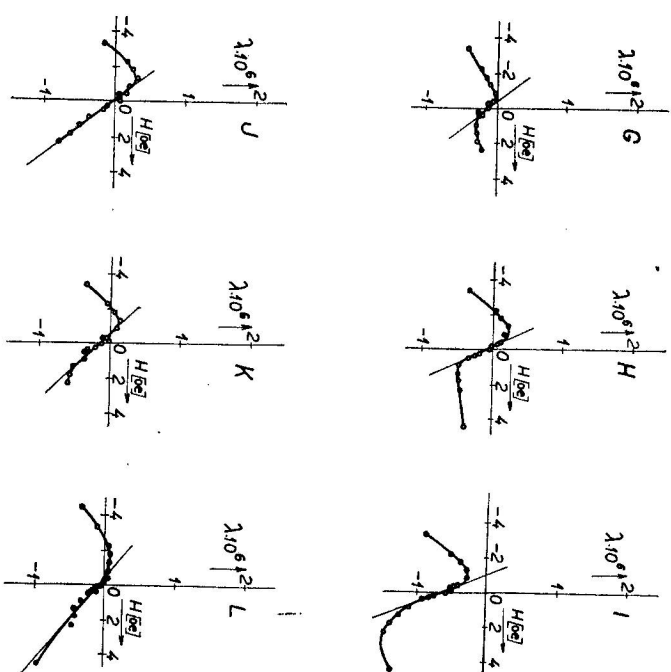
D: $\sigma = 1,28 \text{ kp/mm}^2$
 E: $\sigma = 1,70 \text{ kp/mm}^2$
 F: $\sigma = 2,57 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 2a. Abschnitte der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion bei verschiedenen Werten der Zugspannung σ .

denen konstanten Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation ausgesetzten Ferromagnetikums im remanenten Zustand charakterisiert. Aus der Gleichung (1) ist zu sehen, daß die Funktion $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$ ebenfalls bestimmt werden kann, wenn die Abhängigkeiten $\lambda = \lambda(H)$ für verschiedene konstante Zugspannungen σ bekannt sind (wobei λ die Längsmagnetostraktion der Probe bedeutet).

Genauer gesagt, die Funktion $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$ kann ermittelt werden, wenn der Verlauf der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion in der Nähe des remanenten Zustandes für verschiedene konstante Spannungen bekannt ist. Die Neigung der Tangente, die zu dem sinkenden Teil der Hystereseschleife der Magnetostraktion im remanenten Punkt gehört, stellt den remanenten Magnetostruktionskoeffizienten λ_R dar.

In Abb. 2a und 2b sind die experimentell erhaltenen Abschnitte der sin-



G: $\sigma = 3,43 \text{ kp/mm}^2$
 H: $\sigma = 4,28 \text{ kp/mm}^2$
 I: $\sigma = 6,43 \text{ kp/mm}^2$

J: $\sigma = 8,60 \text{ kp/mm}^2$
 K: $\sigma = 10,38 \text{ kp/mm}^2$
 L: $\sigma = 12,88 \text{ kp/mm}^2$

Abb. 2b. Abschnitte der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion bei verschiedenen Werten der Zugspannung σ .

kenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion für verschiedene Werte der Zugspannungen dargestellt.

Aus den gemessenen Abhängigkeiten kann man ganz eindeutig bestätigen, daß die Neigung der zu diesen Kurven im remanenten Punkt gehörenden Tangenten mit steigender Zugspannung im Gebiet der elastischen Deformation aus positiven Werten bis auf Null sinkt und weiter in das Gebiet der negativen Werte übergeht.

Die A_r -Werte kann man sowohl aus der gemessenen Abhängigkeit $I_r = I_r(\sigma)$ als auch aus den sinkenden Teilen der Hystereseschleifen der Magnetostraktion erhalten. Beim quantitativen Vergleich der A_r -Werte, die wir auf diesen beiden verschiedenen Wegen erhalten haben, muß man bedenken, daß es in beiden Fällen nötig ist die Tangente zu experimentell erhaltenen Kurven zu konstruieren. Das bringt, außer den Fehlern, die den einzelnen Messungen anhaften, weitere Ungenauigkeit mit sich. Trotzdem, wie aus Abb. 3

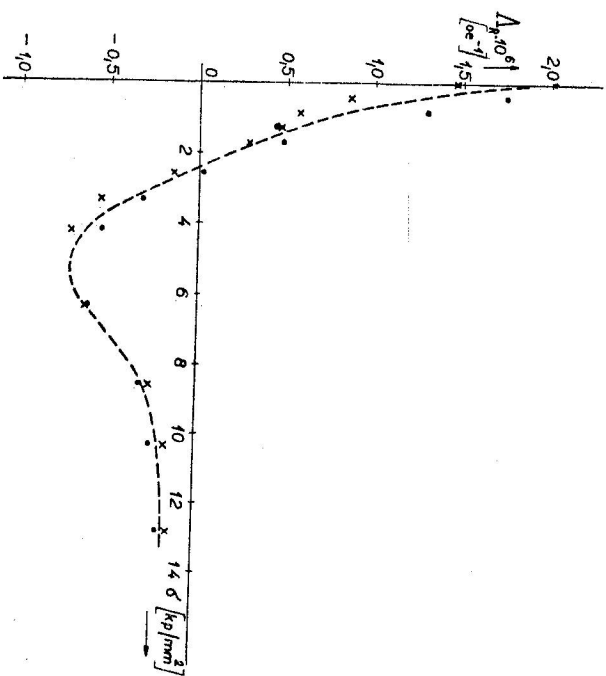


Abb. 3. Abhängigkeit des remanenten Magnetostraktionskoeffizienten A_r von der aufgelegten Zugspannung. + — Werte, erhalten aus der gemessenen Abhängigkeit $I_r = I_r(\sigma)$; ● — Werte, erhalten aus den gemessenen Abschnitten der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion bei verschiedenen Werten der Zugspannung. Gestrichelt ist eingetragen die aus den beiden Messungen erhaltenen A_r -Werte am besten annähernde Kurve.

ersichtlich, besteht zwischen den durch zwei ganz verschiedene Messungen erhaltenen A_r -Werten verhältnismäßig gute Übereinstimmung.

Anhand der Auswertung der experimentell erhaltenen Abhängigkeiten zeigt es sich, daß die Magnetostraktionseigenschaften des Eisens im remanenten Zustand gegen Änderungen der Magnetisierung, die durch elastische Deformationen hervorgerufen sind sehr empfindlich reagieren. Diese Art der Magnetisierung können verhältnismäßig leicht gemessen werden und die aus diesen Messungen abgeleiteten Abhängigkeiten können so ein gewisses Bild über das Magnetostraktionsverhalten des Eisens im Prozess der elastischen Deformation schaffen.

ZUSAMMENFASSUNG

In der Arbeit haben wir den Einfluß der mechanischen Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation auf die Magnetostraktionseigenschaften des Eisens im remanenten Zustand untersucht. Aus der experimentell erhaltenen Abhängigkeit $I_r = I_r(\sigma)$ wurde die Abhängigkeit des remanenten Magnetostraktionskoeffizienten A_r von der elastischen Zugspannung bestimmt. Die Abhängigkeit $A_r = A_r(\sigma)$ wurde auch aus den gemessenen Abschnitten der sinkenden Teile der Hystereseschleifen der Magnetostraktion bei verschiedenen konstanten Spannungen σ ermittelt. Zwischen den Ergebnissen der beiden Messungen ist verhältnismäßig gute Übereinstimmung zu verzeichnen. Auf diese Weise konnte experimentell bestätigt werden, daß aus der Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der elastischen Zugspannung, die experimentell recht gut zugänglich ist, auf die Magnetostraktionseigenschaften des Eisens im remanenten Zustand geschlossen werden kann.

Abschließend möchte ich mich Herrn Prof. Dr. V. Hajko für das ständige Interesse für diese Arbeit sowie für die Anregungen bei ihrer Ausföhrung bedanken. Herrn Dr. H. Gengnagel und seinen Mitarbeitern aus Jena danke ich für die Hilfe bei der Vorbereitung der Proben.

SCHRIFTTUM

- [1] Honda K., Shimizu S., *Phil. Mag.* 4 (1902), 338.
- [2] Лунаев Ф. Н., Изв. АН СССР 23 (1961), 1502.
- [3] Бозорг Р. М., Ферромагнетизм. Изд. Инстит. Литературы Москва 1956, 520.
- [4] Šuda P., Pačes J., *Czech. J. Phys. B* 12 (1962), 785.
- [5] Зайкова В. А., Шур Я. С., *ФММ* 14 (1962), 785.
- [6] Зайкова В. А., Шур Я. С., *ФММ* 21 (1966), 664.
- [7] Potocký I., Hajko V., *Fyzikální časopis SAV* 17 (1967), 247.
- [8] Kneeller E., *Ferromagnetismus*. Springer Verlag 1962, 145.

Eingegangen am 29. 11. 1967

Fyzikální ústav SAV,
vedené oddelenie Košice