

**ÜBER DEN EINFLUSS MECHANISCHER ZUGSPANNUNGEN  
IM BEREICH DER ELASTISCHEN DEFORMATION  
AUF DEN REMANENTEN ZUSTAND DER POLYKRISTAL-  
LINEN METALLISCHEN FERROMAGNETIKA**

LADISLAV POTOCKÝ, VLADIMÍR HAJKO, Košice

EINFÜHRUNG

In der Arbeit [1] wurde der Einfluß der elastischen Deformation auf den Wert der Magnetostruktionskonstante der polykristallinen Drähte aus Nickel, Eisen-Nickellegierung sowie aus der dreifachen Legierung Fe—Ni—Co experimentell studiert. Bei reinem Nickel wurde festgestellt, daß die Magnetostruktionskonstante nicht von der elastischen Deformation abhängt, bei den übrigen Materialien wurde eine lineare Abhängigkeit des Wertes der Magnetostruktionskonstante von der elastischen Deformation gefunden. Die Abhängigkeit der Magnetostruktionskonstanten der monokristallinen Fe-Si-Proben von den mechanischen Spannungen geht auch für den Bereich der elastischen Deformation bereits unmittelbar aus den experimentellen Ergebnissen der Arbeiten [2, 3] hervor. Die angeführten Tatsachen widerspiegeln sich in entsprechender Weise in den Abhängigkeiten des magnetischen Zustandes der Ferromagnetika von der mechanischen Spannung. Bozorth und Williams [4] verfolgten den Einfluß kleiner Spannungen auf den magnetischen Zustand der Permalloyproben bei verschiedenen Werten des einwirkenden Magnetfeldes. In unserer Arbeit wurde der Einfluß der mechanischen Spannungen im Bereich der elastischen Deformation auf den remanenten Zustand der polykristallinen Fe-, Ni- und PY 50-Proben untersucht und wir versuchten aus den gemessenen Abhängigkeiten auf den Charakter der Veränderungen der Magnetostruktionskonstanten der Ferromagnetika im remanenten Zustand im Verlauf der elastischen Deformation zu schließen.

PROBEN UND MEßMETHODE

Die benutzen Proben hatten die Form von Drähten und ihre Ausmaße sind aus der Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1

| Probe | Länge [mm] | Durchmesser [mm] |
|-------|------------|------------------|
| Fe    | 340        | 1,5              |
| Ni    | 340        | 1,0              |
| PY 50 | 340        | 0,6              |

Für die Messungen stand eine Mehrzahl von Proben aus jedem Material zur Verfügung. Vor der Messung wurden alle Proben einer thermischen Bearbeitung unterzogen. Die Zeit der Glühbehandlung war bei allen Proben gleich und betrug 5 Stunden. Die Fe-Proben wurden im Argon bei einer Temperatur von 650 °C, die von Ni und PY 50 im Wasserstoff bei 1000 °C geglüht. Die Abkühlungsgeschwindigkeit war niedriger als 2 °C/min.

Die Elastizitätsgrenze der Proben wurde anhand der Spannung-Verlängerung-Kurve ermittelt. Die Verlängerung wurde aus der Distanzänderung der voneinander in undeformiertem Zustand um 100 mm entfernten zwei Ritze bestimmt. Die Meßgenauigkeit betrug  $\pm 0,1$  mm.

Zur Messung des magnetischen Zustandes der Proben wurde die ballistische Methode angewendet. Die Proben wurden im Magnetfeld eines Solenoids in Längsrichtung magnetisiert. Die Homogenität des Magnetfeldes längs der Probe war besser als 99,4 %. Bei der Messung war es möglich die Probe in den mittleren Teil des Solenoids ohne Einspannung ihrer Enden zu unterbringen. Dies ermöglichte uns den Einfluß der Einspannung der Enden (aber noch ohne Belastung) auf den magnetischen Ausgangszustand in der Mitte der Probe zu untersuchen, der bei der Messung als Ausgangspunkt diente. An den untersuchten Proben wurden bezüglich des magnetischen Anfangszustandes in der Mitte der Probe mit und ohne Einspannung der Enden keine Unterschiede festgestellt. Vereinzelt kamen solche Unterschiede auf einigen Proben vor, doch Messungen auf einer solchen Probe wurden nicht ausgewertet.

Die magnetische Induktion im remanenten Zustand wurde so gemessen, daß die Probe zuerst durch ein genügend starkes Magnetfeld bis zur Sättigung magnetisiert wurde. Anschließend wurde die Probe durch Erniedrigung dieses Feldes auf Null in den remanenten Zustand gebracht und mit Hilfe der in der Mitte der Probe untergebrachten Meßspule der dem Sprung aus dem remanenten in den Sättigungszustand gehörende Galvanometerausschlag ballistisch gemessen.

Der so gemessene Ausgangszustand wurde wiederum hergestellt, die Probe wurde mit der entsprechenden Spannung belastet und der bei dieser Spannung mit der Probe verbundene remanente Zustand wurde aus dem Ausschlag des

Galvanometers, der dem Sprung aus diesem remanenten in den Sättigungszustand gehört, festgestellt. Analogisch wurden auch weitere remanente Zustände der Proben entweder im entlasteten oder belasteten Zustand gemessen. Bei der Berechnung der einzelnen Werte der remanenten Induktion haben wir bei den Fe-Proben den Entmagnetisierungseinfluß der Enden berücksichtigt und der Wert des Entmagnetisierungsfaktors, mit dessen Hilfe wir die betreffenden Messungen korrigiert haben, betrug  $N = 0,0013$ . Bei den übrigen Proben konnten wir — mit Rücksicht auf das Verhältnis von Länge und Durchmesser — den Entmagnetisierungseinfluß der Probenenden auf die magnetischen Messungen in der Mitte der Proben vernachlässigen.

#### EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE AUSWERTUNG

Die gemessenen Abhängigkeiten des remanenten Zustandes der oben erwähnten Proben von der aufgelegten Spannung sind in Abb. 1 angeführt.

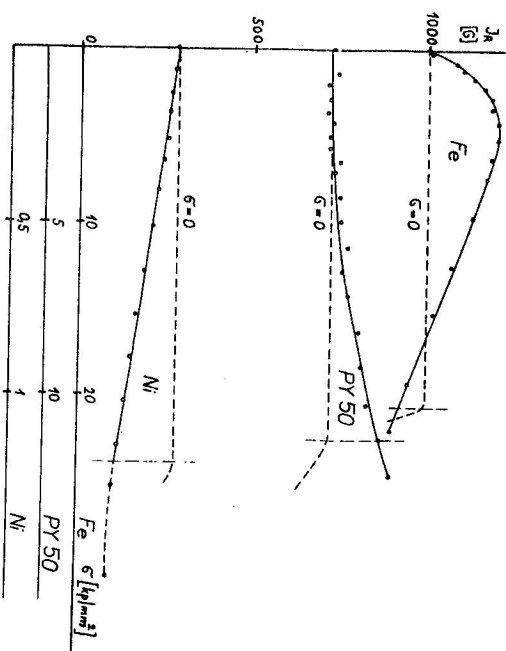


Abb. 1. Abhängigkeit der remanenten Magnetisierung von der aufgelegten Spannung für die drei verschiedenen Ferromagneta (Fe, Ni, PY 50). Die vertikale gestrichelte Linie deutet die Elastizitätsgrenze der jeweiligen Probe an.

Es ist ersichtlich, daß der Spannungseinfluß auf den remanenten Zustand bereits im Gebiet der elastischen Deformation sehr ausgeprägt ist und Veränderung der remanenten Magnetisierung bei PY 50 bis zu 15 % des An-

fangswertes hervorruft; bei Fe erreicht diese Änderung 20 % und bei Ni sogar 60 % des ursprünglichen Wertes. Die Messungen des remanenten Zustandes auf den Proben nach deren Entlastung erwiesen, daß die durch die aufgelegte Spannung im Gebiet der elastischen Deformation hervorgerufenen Änderungen der remanenten Magnetisierung vom makroskopischen Standpunkt einen praktisch durchaus reversiblen Charakter haben. Dies berechtigt die Anwendung der bekannten, thermodynamisch abgeleiteten Gleichung zur Interpretation der gemessenen Abhängigkeiten:

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

wobei  $I$  ist die Magnetisierung,  $\sigma$  die mechanische Spannung,  $l$  die Probenlänge und  $H$  die Feldstärke des auf die Probe einwirkenden Magnetfeldes.

Bezeichnet man

$$\frac{1}{l} \left(\frac{\partial I}{\partial H}\right)_\sigma = \lambda, \quad (2)$$

dann stellt  $\lambda$  die relative Änderung der Probenlänge dar, die der Änderung des Magnetfeldes um eine Einheit bei gegebenem konstanten Wert  $\sigma$  entspricht. Benennen wir die Größe  $\lambda$  als Koeffizienten der Magnetrostriktion, der dem gegebenen magnetischen Zustand gehört, dann kann die Gleichung (1) in die Form

$$\lambda = \left(\frac{\partial I}{\partial \sigma}\right)_H$$

umgeschrieben werden, so daß für den remanenten Koeffizienten der Magnetrostriktion  $\lambda_R$  die folgende Gleichung gilt:

$$\lambda_R = \left(\frac{\partial I_R}{\partial \sigma}\right)_{H=0}. \quad (3)$$

Aus den in Abb. 1 dargestellten gemessenen Abhängigkeiten  $I_R = I_R(\sigma)$  kann das den remanenten Zuständen bei verschiedenen Werten des  $\sigma$  zugehörige  $\lambda_R$  bestimmt werden. Die so gewonnenen Abhängigkeiten  $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$  sind in Abb. 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß  $\lambda_R$  bei den Fe- und PY 50-Proben vom  $\sigma$  abhängig ist; bei Ni bleibt  $\lambda_R$  für alle Werte  $\sigma$  im Gebiet der elastischen Deformation konstant. Der remanente Anfangszustand bei der Fe-Probe wird durch den Wert  $\lambda_R = 1 \cdot 10^{-6}$  gekennzeichnet, bei der Ni-Probe weist der remanente Anfangszustand den Wert  $\lambda_R = -1,35 \cdot 10^{-6}$  auf, während bei der PY 50-Probe im remanenten Anfangszustand  $\lambda_R = 0$  ist. Die Abhängigkeit  $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$  ist bei der PY

50-Probe linear und  $\lambda_R$  ist stets positiv bzw. gleich Null. Bei Fe ist die Abhängigkeit  $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$  komplizierter.  $\lambda_R(\sigma)$  sinkt mit steigender Spannung verhältnismäßig rasch von dem positiven Anfangswert  $\lambda_R$  ab und geht bei  $\sigma_0 \approx 4,5$  kp/mm<sup>2</sup> über den Nullwert in die negativen Werte über. Im Bereich der negativen Werte  $\lambda_R$  sinkt weiter mit steigendem  $\sigma$ ; dies geschieht jedoch langsamer als im Bereich der positiven Werte.

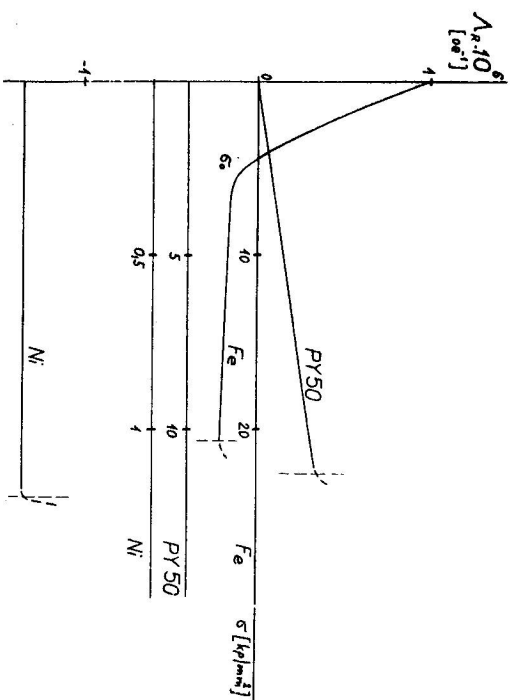


Abb. 2. Abhängigkeit des remanenten Koeffizienten der Magnetrostriktion  $\lambda_R$  von der aufgelegten Spannung.

Die in Abb. 2 dargestellten Abhängigkeiten  $\lambda_R = \lambda_R(\sigma)$  für die Ni- und PY 50-Proben können mit den von Šuda und Pačes [1] beim Studium des Einflusses der elastischen Deformationen auf den Wert der Magnetrostriktionskonstante erreichten Ergebnisse verglichen werden. Die Magnetrostriktionskonstante  $\lambda$  wird bekanntlich als relative Änderung der Länge der ferromagnetischen Probe beim Übergang aus dem magnetischen Anfangszustand mit isotroper Verteilung der Vektoren der Magnetisierung in den magnetischen Sättigungszustand definiert. Der Zusammenhang zwischen der Magnetrostriktionskonstante  $\lambda$  und dem nach Beziehung (2) definierten Magnetrostriktionskoeffizienten  $\lambda$  kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\lambda = \int_0^{H_s} \lambda dH. \quad (4)$$

$H_s$  ist hierbei das Magnetfeld, durch welches die Probe in den Sättigungszustand gesetzt wird. Bei Ni wurde die Gültigkeit der Gleichung  $I_R(\sigma) = \text{Konst.}$  festgestellt. In der Arbeit [1] wurde experimentell gefunden, daß bei Ni  $\lambda(\sigma) = \text{Konst.}$  ist. Aus der Beziehung (4) kann man schließen, daß der Magnetostruktionskoeffizient  $\lambda$  bei Ni für beliebigen magnetischen Zustand, durch den sich der Übergang aus dem Entmagnetisierungszustand in den Sättigungszustand vollzieht, unabhängig ist vom  $\sigma$ , im Bereich der elastischen Deformation. Beim PY 50 wurde eine lineare Abhängigkeit  $I_R = I_R(\sigma)$  ermittelt. Ähnlich wurde in der Arbeit [1] festgestellt, daß die Abhängigkeit  $\lambda = \lambda(\sigma)$  auch einen linearen Charakter aufweist. Daraus kann man wiederum — ausgehend aus der Beziehung (4) — schließen, daß beim PY 50,  $\lambda$  in allen magnetischen Zuständen, durch die eine derartige Probe aus dem Entmagnetisierungszustand in den Sättigungszustand gelangt, eine lineare Funktion des  $\sigma$  ist.

Die Anfangswerte vom  $I_R$  bei  $\sigma = 0$  können mit den experimentellen Ergebnissen der Arbeiten [5, 6], in denen die Hystereseschleifen der Magnetostraktion von derartigen Materialien angeführt sind, auf welchen auch unsere Messungen durchgeführt wurden, verglichen werden. Die Hystereseschleife der Magnetostraktion stellt eine Abhängigkeit dar, die für die den einzelnen Feldern  $H$  zugehörigen Zustände der Hystereseschleife  $I = I(H)$  die relative Änderung der Probenlänge im Vergleich zum entmagnetisierten Zustand angibt. Die Neigung der Tangente dieser Kurve im Punkt  $H = 0$  (der remanente Zustand) hat dieselbe Bedeutung wie der durch die Beziehung (2) definierte Magnetostruktionskoeffizient  $\lambda$ , und stellt also eine für  $\sigma = 0$  mit  $I_R$  identische Größe dar. Tabelle 2 bietet die Möglichkeit unsere Meßergebnisse (angeführt in der ersten Spalte) mit den Werten  $I_R$  zu vergleichen, die aus den in den Arbeiten [5, 6] angeführten Hystereseschleifen der Magnetostraktion bestimmt wurden. Aus der Tabelle 2 ist eine gute Übereinstimmung der Daten ersichtlich.

Die Abhängigkeit  $I_R = I_R(\sigma)$ , dargestellt in Abb. 2, wurde aus der Abhängigkeit  $I_R = I_R(\sigma)$  abgeleitet. Wenn umgekehrt die Abhängigkeit  $I_R = I_R(\sigma)$  zuerst bekannt wäre, dann gilt für die Änderung der remanenten

Tabelle 2

| Probe | $I_R \cdot 10^6$ [Oe <sup>-1</sup> ] |         |
|-------|--------------------------------------|---------|
|       | Bozorth [5]                          | Lee [6] |
| Fe    | 1,0                                  | 1,35    |
| Ni    | -1,35                                | —       |
| PY 50 | 0,0                                  | 0,0     |

Magnetisierung  $I_R$ , die bei dem Spannungseinsatz  $\sigma$  eintritt:

$$\Delta I_R = \int_0^{\sigma} I_R(\sigma) d\sigma.$$

Der Magnetostruktionsseffekt bei Ni ist — wie aus dem obigen ersichtlich — im Bereich der elastischen Deformation vom äußeren Zug unabhängig. Hier gilt  $I_R = \text{Konst.}$  und außerdem gilt immer  $I_R < 0$ . Deshalb ist stets  $\Delta I_R < 0$ . Beim PY 50 steigt der remanente Koeffizient der Magnetostraktion linear mit der Spannung und ist immer  $I_R > 0$ , so daß auch immer  $\Delta I_R > 0$  ist. Bei Fe ist die Situation komplizierter; mit Steigerung der Spannung sinkt  $I_R$ . Im Spannungsbereich  $0 < \sigma \leq \sigma_0$  gilt  $I_R \geq 0$ , für die Spannungen  $\sigma > \sigma_0$  ist  $I_R < 0$ . Deshalb ist im Spannungsbereich  $0 < \sigma < \sigma_0$  auch  $\Delta I_R > 0$  und für die Spannungen  $\sigma > \sigma_0$  gilt  $\Delta I_R < 0$ .

#### ZUSAMMENFASSUNG

In der Arbeit haben wir den Einfluß der mechanischen Zugspannungen im Gebiet der elastischen Deformation auf den remanenten Zustand der metallischen Ferromagnetika Fe, Ni und PY 50 untersucht. Die experimentell ermittelten Abhängigkeiten  $I_R = I_R(\sigma)$  wurden mit den Magnetostruktionskoeffizienten der obengenannten Ferromagnetika mit Hilfe der durch Beziehung (2) definierten Größe  $\lambda$  in Zusammenhang gebracht. Die Ergebnisse unserer Messungen und die von ihnen abgeleiteten Abhängigkeiten wurden mit den Ergebnissen der Arbeit [1], die den Einfluß der elastischen Deformation auf den Wert der Magnetostruktionskonstante bei einigen metallischen Ferromagnetika verfolgte sowie mit den in den Arbeiten [5, 6] angeführten Ergebnissen, die die experimentell gewonnenen Hystereseschleifen der Magnetostraktion auf Fe, Ni und PY 50 enthalten, verglichen. Die aus unseren Messungen hervorgehenden Resultate stimmen mit den aus der Arbeit [1] und [5, 6] hervorgehenden Ergebnissen gut überein.

Wir haben uns hier nicht mit der Frage des Charakters der mikrophysikalischen Prozesse, die zu entsprechenden Änderungen des  $I_R$  bzw.  $\lambda$  in Abhängigkeit von  $\sigma$  führen, beschäftigt. Dies wird das Ziel einer weiteren Arbeit sein.

Abschließend möchten wir Herrn Doz. RNDr. Z. Málék, OSc. und Herrn RNDr. R. Gerber, OSc. für ihre wertvollen Ratschläge unseren besten Dank aussprechen.

SCHRIFTTUM

- [1] Študa P., Pačes J., Czech. J. Phys. *B 12* (1962), 361.
- [2] Заброва В. А., Шур Я. С., ФММ *14* (1962), 785.
- [3] Заброва В. А., Шур Я. С., ФММ *21* (1966), 664.
- [4] Bozorth R. M., Williams H. J., Rev. Mod. Phys. *17* (1945), 72. Siehe auch Bozorth R. M., *Ферромагнетизм*. Изд. Инстр. Тир. Москва 1965, 489.
- [5] Bozorth R. M., *Ферромагнетизм*. Изд. Инстр. Тир. Москва 1956, 524, 523, 529.
- [6] Lee E. W., Journ. Iron and Steel Inst. *171* (1952), 160.

Eingegangen am 26. 4. 1967

*Fyzikální ústav SAV,  
vedecké oddelenie Košice*