

EINFLUSS DER ZYKLISCHEN BELASTUNG AUF DEN REMANENTEN MAGNETISCHEN ZUSTAND EISERNER DRÄHTE

JURAJ DANIEL-SZABÓ, LADISLAV POTOCKÝ, Košice

In der Arbeit wird der Einfluß der zyklischen Abnahme und Anlegung der mechanischen Spannung im Bereich der elastischen Deformation auf den remanenten Zustand der Fe-Drähte verfolgt. Die reversiblen Magnetisierungsänderungen werden bei Abnahme bzw. Anlegung der mechanischen Zugspannungen durch die irreversiblen Magnetisierungsänderungen überlagert, die besonders für höhere Werte von n die lineare Abhängigkeit von $\sqrt{\lg n}$ gut erfüllen und von der angelegten Spannung abhängig sind. Es handelt sich um ähnliche Effekte wie bei der zyklischen unsymmetrischen Ummagnetisierung eines Ferromagnetikums, die mittels der Néelschen Theorie der Reptation-Erscheinung erklärt werden können. Die gewonnenen experimentellen Ergebnisse bestätigen, daß die Wahl des Anfangszustandes sowie auch die Art, wie dieser erreicht wird, wesentlich das Vorzeichen sowie die Größe der irreversiblen Magnetisierungsänderung beeinflussen.

EINLEITUNG

Unter dem Einfluß der mechanischen Spannungen ändern sich markant die magnetischen Eigenschaften der Ferromagnetika. Einer von den Autoren dieser Arbeit [1] hat den Einfluß der mechanischen Spannungen auf den remanenten Zustand der Fe-Drähte im Bereich der elastischen Deformation untersucht und hat gezeigt, daß sich die remanente Magnetisierung dabei markant und charakteristisch ändert. Abb. 1 zeigt diese Abhängigkeit

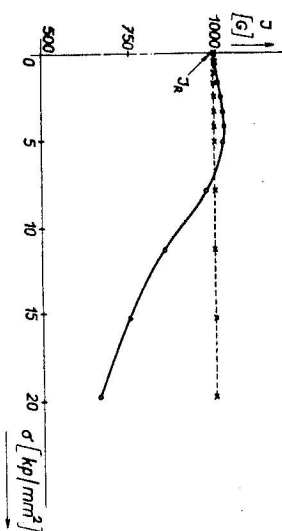


Abb. 1. Die Abhängigkeit der wahren Remanenz von der angelegten Spannung σ .

für den Fall, wenn der am sinkenden Ast der extremen Hystereseschleife liegende wahre remanente Zustand als Ausgangszustand gewählt wurde. Falls die anfänglichen remanenten Zustände anders ausgebildet wurden und auf die in solcher Weise erreichten Zustände die Spannung im Bereich der elastischen Deformation aufgelegt wurde, ändert sich die Magnetisierung qualitativ sowie auch quantitativ verschieden, in Abhängigkeit von der Art der Ausbildung des anfänglichen remanenten Zustandes.

In diesem Zusammenhang zeigte es sich zweckmäßig, auch den Einfluß der zyklischen Anlegung und Abnahme der mechanischen Zugspannung im Bereich der elastischen Deformation auf den remanenten Zustand der Fe-Drähte zu untersuchen. Solche Messungen wurden bisher — unseren Wissens — systematisch nicht vollzogen. Bekannt sind einige Ergebnisse des experimentellen Studiums des Einflusses der periodisch angelegten Spannungen bzw. Stöße auf den magnetischen Zustand der sich im Magnetfeld befindenden Ferromagnetika [2–6]. Diese Meßergebnisse zeigen, daß sich die irreversiblen Magnetisierungsänderungen, die von dem angewendeten Magnetfeld, der Zahl der Zyklen, bzw. von der angelegten Spannung abhängig sind, den reversiblen Magnetisierungsänderungen, die mit der Abnahme bzw. Anlegung der Spannung verbunden sind, überlagern. Es fehlt bisher ein zusammenfassender Einblick in den Ursprung und die Gesetzmäßigkeiten dieser Erscheinung.

PROBEN UND MEßMETHODE

Zu den Experimenten wurden drahtförmige Proben von 344 mm Länge und 1,5 mm Durchmesser verwendet. Vor der Messung wurden die Proben entsprechend wärmebehandelt. Die chemische Zusammensetzung der Proben¹⁾: C — 0,0547 %, Mn — 0,42 %, Si unter 0,01 %, P — 0,015 %, S — 0,019 %, Cu — 0,225 %, Cr — 0,013 %, Al — 0,011 %, N — 0,0016 %, O₂ — 0,0236 %, H₂ — 0,00032 %. Es wurden auch folgende grundlegende mechanische und magnetische Charakteristiken der Proben untersucht: Elastizitätsgrenze 23,5 kp/mm², Festigkeitsgrenze 37,0 kp/mm², Koerzitivfeldstärke 2,8 Oe, wahre Remanenz 1070 Gauß.

Die magnetische Induktion in den einzelnen Zuständen der aufmagnetisierten Probe wurde ballistisch bestimmt: mit Hilfe einer kleinen, in der Mitte der Probe aufgelegten Abtastspule wurde der dem Sprung von diesem in den Sättigungszustand entsprechende Ausschlag des Galvanometers gemessen. Mit Rücksicht auf die geometrischen Dimensionen der angewendeten Proben

¹⁾ Die chemische Analyse der Proben wurde durch Výzkumný ústav hutníctví železa, Praha, durchgeführt.

konnte der Entmagnetisierungseffekt der freien Enden auf den magnetischen Zustand in der Mitte vernachlässigt und die entsprechende Magnetisierung von dem Verhältniss $J = B/4\pi$ berechnet werden.

Das Meßverfahren wurde so ausgewählt, daß zuerst der remanente Zustand der Probe ausgebildet wurde; nach den Bedingungen des Experimentes handelte es sich entweder um den wahren, oder um die anderen, geeignet ausgebildeten Ausgangszustände. Dann haben wir auf die Probe die Zugspannung σ aufgelegt, die eine elastische Deformation hervorgerufen hat. Bei dem folgenden Meßverfahren wurde diese Spannung periodisch herabgenommen bzw. aufgelegt. Die Magnetisierungswerte in den Zuständen mit der aufgelegten Spannung werden für den n -ten Zyklus mit $J_{\sigma,n}$ und in dem erleichterten Zustand mit $J_{0,n}$ bezeichnet; $J_{\sigma,0}$ heißt dabei die Magnetisierung in dem durch die Anlegung der Spannung σ auf den remanenten Zustand gewonnenen Anfangszustand und $J_{0,0}$ die Magnetisierung nach der Abnahme dieser Spannung. Die entsprechenden Magnetisierungsänderungen werden dann

$$\Delta J_{\sigma,n} = J_{\sigma,n} - J_{\sigma,0}; \quad \Delta J_{0,n} = J_{0,n} - J_{0,0}$$

bezeichnet.

Mit Rücksicht auf die angewendete Methode der Sprünge in die Sättigung war es nötig vor jedem Messen den Anfangszustand wieder herzustellen. Die Messungen haben gleichzeitig gezeigt, daß die Ausbildung des Anfangszustandes im Bereich der elastischen Deformation gut reproduzierbar ist.

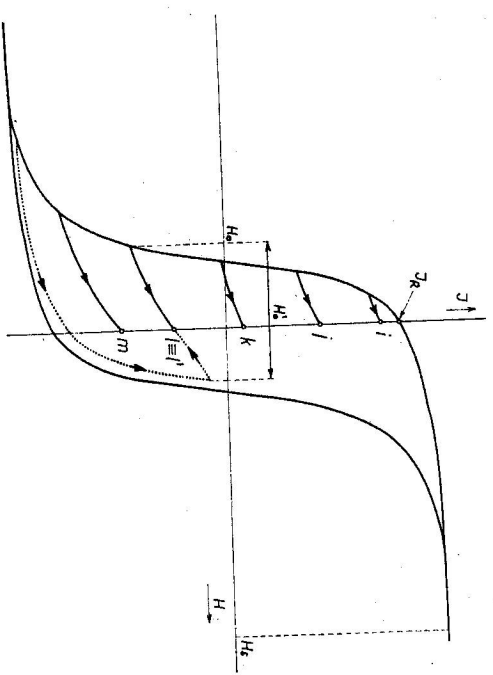


Abb. 2. Schematische Abbildung, wie die einzelnen Ausgangszustände erreicht wurden.

Der wahre remanente Zustand wurde wie üblich erreicht, d. h. die Probe wurde in einem genügend starkem Magnetfeld praktisch in die Sättigung und nach dem Abschalten desselben in den remanenten Zustand gebracht. Zur Sättigung der Probe wurde das Feld $H = 454$ Oe verwendet. Wie die Kontrollmessungen gezeigt haben, dieses Feld war hinreichend dazu, die remanente Magnetisierung ihren höchsten Wert erreichen zu lassen. Die übrigen remanenten Zustände wurden so erreicht, daß das negative Feld H_0 auf die in dem wahren remanenten Zustand sich befindende Probe angewendet und danach dieses Feld zu Null gebracht wurde (Zustände i, j, k, l, m in Abb. 2) bzw. an diesen Feld zu Null gebrachten Zustand ein weiteres, positives Feld den mit Hilfe des H_0 Feldes erreichten Zustand ein weiteres, positives Feld H'_0 ($H'_0 > |H_0|$) angewendet und nach Abschalten dieses Feldes der weitere remanente Zustand erreicht wurde (Zustand i' in Abb. 2).

DIE MEßERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Meßergebnisse für den Fall, wenn die wahre Remanenz als Ausgangszustand gewählt wurde, sind in den Abb. 3—7 aufgetragen. In Abb. 3 wird schematisch die gemessene Abhängigkeit der Magnetisierung $J_{0,n}$ bzw. $J_{\sigma,n}$ von der Spannung, für verschiedene Werte der Spannung σ aufgetragen. Besseren

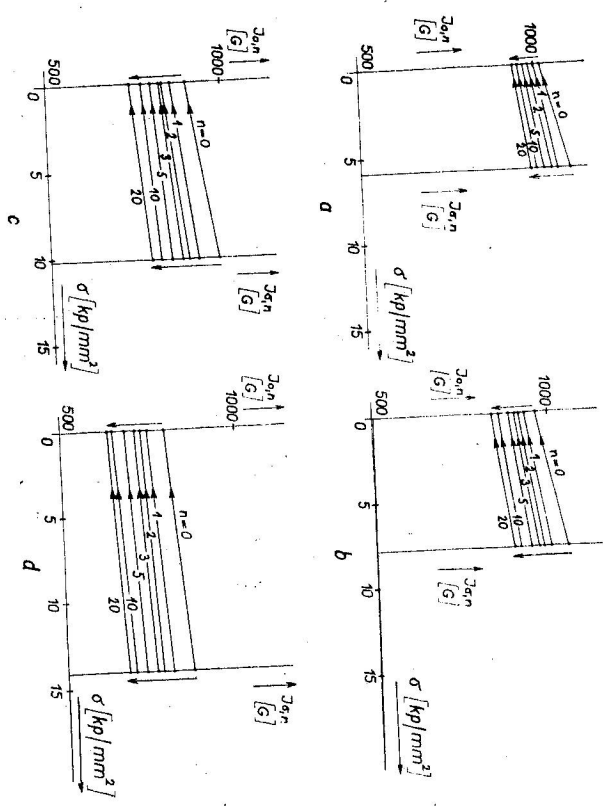


Abb. 3. Schematische Darstellung der Magnetisierungszyklen im Laufe der zyklischen Belastung der Probe, für verschiedene Werte der mechanischen Zugspannung σ .

Anschaulichkeit wegen werden die Magnetisierungszyklen nur für den Übergang von dem belasteten in den unbelasteten Zustand eingetragen, und zwar durch gerade Linien.

Die Meßergebnisse zeigen, daß der Prozeß der zyklisch abgenommenen und angelegten Spannung zu allmählich irreversiblen Änderungen der Magnetisierung $J_{0,n}$ bzw. $J_{\sigma,n}$ des remanenten Zustandes führt. Es ist bemerkenswert, daß in allen beobachteten Fällen zur systematischen Abnahme der Magnetisierung kommt, sowohl im belasteten als auch im unbelasteten Zustand, abgesehen davon, ob die erste Anwendung der Spannung σ einen Zuwachs stand, im Vergleich mit Abb. 1 für Spannungsbereich 0–7 kp/mm² oder (Abb. 3a im Vergleich mit Abb. 1 für Spannungsbereich 0–7 kp/mm²) oder eine Abnahme der Magnetisierung (Abb. 3d im Vergleich mit Abb. 1, für Spannungen 7–20 kp/mm²) zur Folge hat.

In Abb. 4 sind die Magnetisierungsänderungen $\Delta J_{0,n}$ bzw. $\Delta J_{\sigma,n}$ gegen den Anfangszustand $J_{0,0}$ bzw. $J_{\sigma,0}$ in Abhängigkeit von der Zahl der Zyklen für

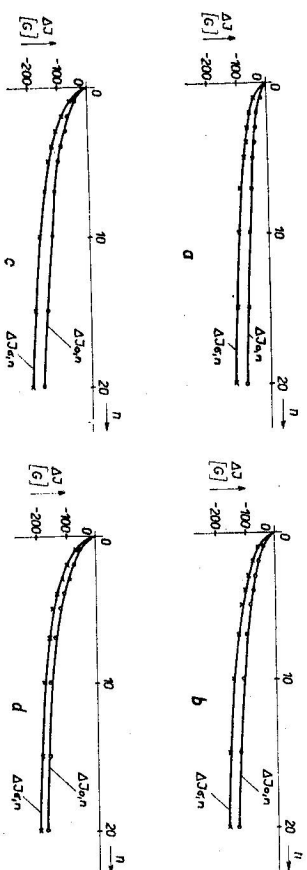


Abb. 4. Die Abhängigkeit der Magnetisierungsänderung von der Zahl der Zyklen für verschiedene Werte der angelegten Spannung: a) $\sigma = 5,95$ kp/mm²; b) $\sigma = 7,92$ kp/mm²; c) $\sigma = 10,2$ kp/mm²; d) $\sigma = 14,15$ kp/mm².

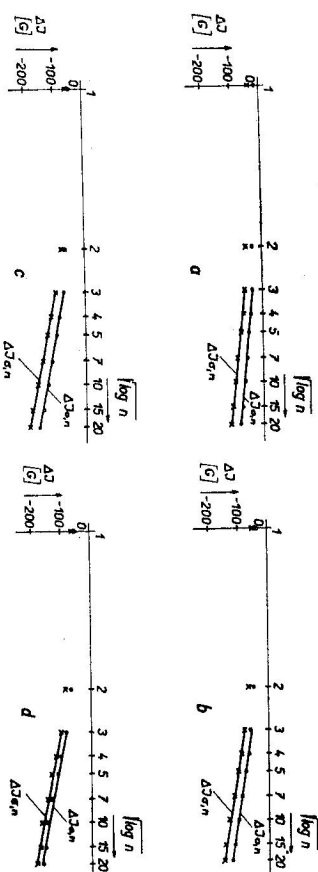


Abb. 5. Die Abhängigkeit der Magnetisierungsänderung von $\sqrt{\lg n}$.

verschiedene Spannungen aufgetragen. Bei kleineren Werten von n (1, 2, 3) ist die Änderung der Magnetisierung in den Endpunkten $\sigma = 0$ und $\sigma > 0$ verschieden, für höhere n ($n \geq 4$) ist diese schon an den beiden Enden praktisch gleich. Abb. 5 zeigt, daß die Abhängigkeiten $\Delta J_{0,n}$ bzw. $\Delta J_{\sigma,n}$ von $\sqrt{\lg n}$ für höhere Werte von n ($n > 3$) linear sind. Daß die Magnetisierungsänderungen im belasteten sowie auch im unbelasteten Zustand für höhere Werte von n praktisch gleich und linear von $\sqrt{\lg n}$ abhängig sind, ist gut sichtbar aus Abb. 6, in der die Abhängigkeiten $\Delta J^*_{0,n}$ bzw. $\Delta J^*_{\sigma,n}$ von $\sqrt{\lg n}$ aufgetragen sind; $\Delta J^*_{0,n} = J_{0,n} - J_{0,3}$; $\Delta J^*_{\sigma,n} = J_{\sigma,n} - J_{\sigma,3}$.

Die Größe der irreversiblen Magnetisierungsänderungen wird durch die Größe der angewendeten Spannung beeinflusst, wie dies — bei dem gegebenen Anfangszustand sowie der Zahl der Zyklen — aus der Abb. 7 deutlich sichtbar ist.

Die oben angeführten experimentellen Ergebnisse erweisen, daß sich die zyklische Belastung eines Ferromagnetikums analogisch wie die zyklische unsymmetrische Ummagnetisierung zwischen zwei festen Werten des Magnetfeldes äußert; für die irreversiblen Magnetisierungsänderungen, die bei solcher Ummagnetisierung in Erscheinung treten, sind, nach Néel, die sogenannten Reptation und Bascule-negative-Effekte verantwortlich [7]. Der erste von diesen Effekten führt zu den auf den beiden Enden der Ummagnetisierungs-

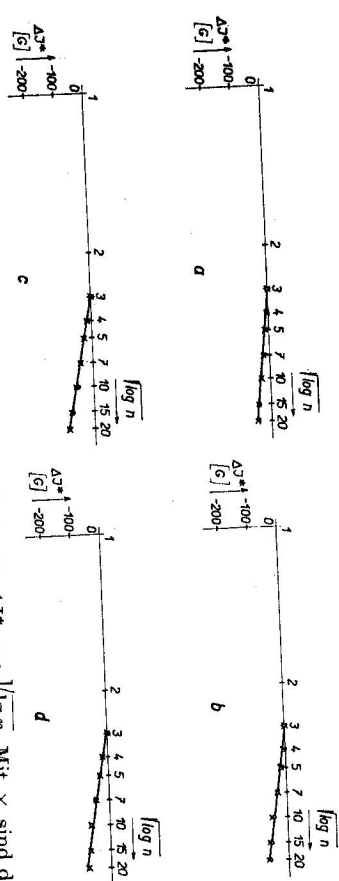


Abb. 6. Die Abhängigkeit der Magnetisierungsänderung ΔJ^* von $\sqrt{\lg n}$. Mit $\times$ sind die Werte $\Delta J^*_{\sigma,n}$, mit $\circ$ die von $\Delta J^*_{0,n}$ bezeichnet.

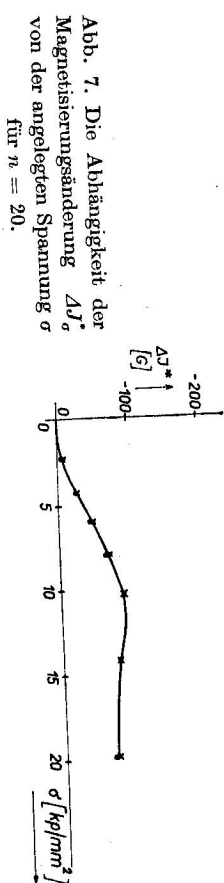


Abb. 7. Die Abhängigkeit der Magnetisierungsänderung ΔJ^* von der angelegten Spannung σ für $n = 20$.

schleife praktisch gleichen und der $\sqrt{\lg n}$ proportionalen Magnetisierungsänderungen; die andere Erscheinung kommt nur bei kleineren Werten von n zur Geltung und führt zu einer Drehung der Ummagnetisierungsschleife. Man sollte den Ursprung beider dieser Effekte — nach Néel [7] — in einer Wechselwirkung zwischen den ferromagnetischen Domänen suchen. Der Basculen-Effekt hängt mit den Wechselwirkungen zwischen einer relativ kleinen Zahl von nahe liegenden Domänen zusammen; die Reptation-Erscheinung wird durch statistische Theorie als Folge der Wechselwirkungen zwischen einer großen Zahl gegenseitig relativ entfernten Domänen dargestellt. Die dem Reptation-Effekt entsprechenden Magnetisierungsänderungen sollen von den sogenannten Reptationseffekten verursacht werden; es handelt sich um die Dispersionsfelder, deren Zerlegung bei der nacheinanderfolgenden Anwendung desselben Feldes H_A — nach der vorhergehenden Rückkehr zum Feld H_B — zufällig geändert wird und deren Folge die der $\sqrt{\lg n}$ proportionale Magnetisierungsänderung ist.

Unsere Messungen führen zu analogen Ergebnissen wie jene die bei der zyklischen unsymmetrischen Ummagnetisierung erreicht werden. Die Magnetisierungsänderungen sind bei kleineren Werten von n (1, 2, 3) in den Endpunkten $\sigma = 0$ und $\sigma > 0$ nicht dieselben und ihre Abhängigkeit von n ist relativ kompliziert; bei höheren n dagegen ändert sich die Magnetisierung in den beiden Zuständen $\sigma = 0$ und $\sigma > 0$ praktisch gleich und die Magnetisierungsänderungen sind proportional der $\sqrt{\lg n}$. Wir vermuten deshalb, daß mindestens zwei Effekte für die gemessenen irreversiblen Magnetisierungsänderungen auch bei der zyklischen Belastung eines Ferromagnetikums verantwortlich sind. Der erste Effekt kommt nur bei kleineren Werten von n zur Geltung und bei den größeren verschwindet; die Gesetzmäßigkeiten dieser Erscheinung erfordern noch ein ausführlicheres Studium. Die zweite von den angenommenen Erscheinungen ist dem Reptation-Effekt analog. Es scheint uns logisch auch den Ursprung dieser, sich makroskopisch analog ändernden Erscheinung in analogen Ursachen zu suchen. Im Laufe der zyklischen Belastung verwickeln sich im Ferromagnetikum bestimmte Änderungen in der Verteilung der inneren Spannungen; so ist die Verteilung dieser nach wiederholter Anwendung derselben Spannung nach vorhergehenden Entspannung wiederholter Anwendung derselben Spannung nach Vorhergehenden Entspannung — im allgemeinen verschieden von der Verteilung bei der ersten Anwendung. Diese Veränderungen haben Änderungen auch in der Bereichstruktur zur Folge. So wird die Anordnung wenigstens eines Teiles der Bereiche nach der zweiten Anwendung derselben Spannung eine andere wie bei der ersten sein. Diese bei den folgenden Anwendungen der Spannung sich wiederholenden Änderungen in der Bereichstruktur können zu den Dispersionsfeldern führen, die den Reptationseffekten analog sind und die im Zusammenhang mit der

Néelschen Theorie zu den der $\sqrt{\lg n}$ proportionalen Magnetisierungsänderungen führen.

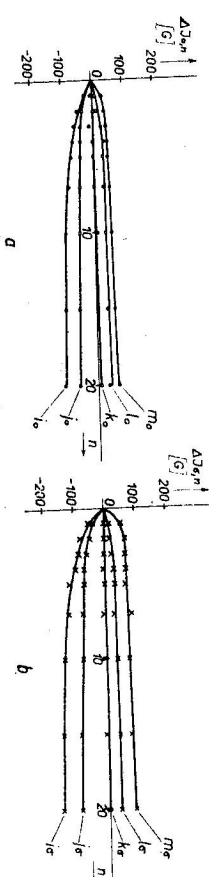


Abb. 8. Die Abhängigkeit der Magnetisierungsänderung von der Zahl der Zyklen für die verschiedenen Anfangszustände bei der Spannung $\sigma = 7,92 \text{ kp/mm}^2$.

Die Wahl des Anfangszustandes beeinflusst wesentlich die quantitative Äußerung des Reptation-Effektes, wie dies in der Arbeit [8] gezeigt wurde. Ein solcher Einfluß kann auch bei der zyklischen Belastung eines Ferromagnetikums erwartet werden. Zu diesem Zweck haben wir eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Wir haben eine Anzahl von verschiedenen remanenten Ausgangszuständen (i, j, k, l, m) ausgebildet, deren Ausbildungsart aus Abb. 2 ersichtlich ist; auf so ausgebildete Zustände wurde die Spannung σ angelegt, die dann zyklisch abgenommen und angelegt wurde. Die entsprechenden irreversiblen Magnetisierungsänderungen in Abhängigkeit von der Zahl der Zyklen für gegebene Spannung σ und für die verschiedenen zwischen dem abfallenden und ansteigenden Ast der extremen Hystereseschleife liegenden Ausgangszustände werden in Abb. 8 und schematisch in Abb. 9 abgebildet. So folgt aus den Messungen, daß die Art der Wahl des Anfangszustandes die Größe und das Vorzeichen der irreversiblen Änderung der Magnetisierung, sowohl im belasteten als auch im unbelasteten Zustand der Probe, wesentlich

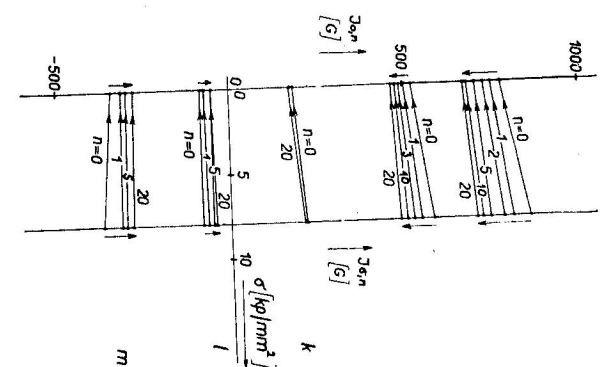


Abb. 9. Schematische Darstellung der Magnetisierungszyklen im Laufe der zyklischen Belastung für die verschiedenen Anfangszustände i, j, k, l, m bei der Spannung $\sigma = 7,92 \text{ kp/mm}^2$.

beeinflusst. In Abhängigkeit von der Wahl des Anfangszustandes kann die Magnetisierung wachsen (Kurve l , m , Abb. 8 und 9), oder sinken (Kurven i , j , Abb. 8 und 9), und zwar sowohl im belasteten als auch im entlasteten Zustand. Man kann auch solche Anfangszustände finden, für welche wir praktisch keine Magnetisierungsänderungen gefunden haben (Kurve k).

Unsere Experimente haben auch gezeigt, daß die Art wie der Ausgangszustand ausgebildet wird, den Verlauf der beobachteten Erscheinungen beeinflußt. So z. B. mit der in Abb. 2 sichtbaren Art haben wir zwei sich mit gleicher Magnetisierung auszeichnende Anfangszustände (l und l') ausgebildet. Auf diesen Zustand haben wir eine Spannung σ angelegt, die dann zyklisch abgenommen und angelegt wurde. Die Größe der entsprechenden irreversiblen Magnetisierungsänderungen für gegebene n und σ zeigte sich in den beiden Fällen verschieden.

Die Wahl des Anfangszustandes sowie die Art wie dieser erreicht wird, können merklich die Größe und das Vorzeichen der irreversiblen Änderung der Magnetisierung bei der zyklischen Belastung beeinflussen; die anfängliche Anordnung der Bereiche der spontanen Magnetisierung beeinflußt also diese Veränderungen wesentlich. Diese Ergebnisse führen — in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Arbeit [8] — zu der Schlußfolgerung, daß die den einzelnen Anfangszuständen zugehörigen Blochwandkonfigurationen mehr oder weniger stabil gegen die zyklischen Änderungen der mechanischen Spannungen sind. Die globale bei gegebenen n und σ verwirklichte Magnetisierungsänderung kann ja auch von anderen Faktoren, wie z. B. von verschiedenen Hindernissen in der Form von Störungen, Inklusionen usw., die die Bewegung der Blochwände beeinflussen, abhängig sein. Dies würde noch ein weiteres ausführlicheres Studium erfordern.

SCHRIFTTUM

- [1] Potocký L., Dissertation. Naturwissenschaftliche Fakultät der Šafárik-Universität, Košice 1969.
- [2] Ewing J. A., Phil. Trans. 176 (1885), 523.
- [3] a) Liliboutry L., Journ. Phys. Rad. 12 (1951), 482.
b) Liliboutry L., Thèses, Grenoble 1964.
- [4] Brugel L., Thèses, Grenoble 1964.
- [5] Bozorth R. M., Williams H. J., Rev. Mod. Phys. 17 (1945), 72.
- [6] Hajko V., Potocký L., Fyz. čas. SAV 19 (1969), 52.
- [7] a) Néel L., C. R. Acad. Sci. France 244 (1957), 2668.
b) Néel L., C. R. Acad. Sci. France 246 (1958), 2313, 2963.
- [8] Daniel-Szabó J., Hajko V., Gengnagel H., Phys. stat. sol. 9 (1965), 201.
- [8] Daniel-Szabó J., Hajko V., Gengnagel H., Phys. stat. sol. 9 (1965), 201.

Eingegangen am 10. März 1969

*Katedra experimentálnej fyziky
Prírodovedeckej fakulty UPJŠ, Košice
Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice*