

EINFLUSS MECHANISCHER ZUGSPANNUNGEN IM BEREICH ELASTISCHER DEFORMATION AUF DIE MAGNETISIERUNG DES VERSCHIEDEN GEBILDETEN REMANENTEN ZUSTANDES POLYKRISTALLINER EISENDRÄHTE

LADISLAV POTOCKÝ, Košice

In der Arbeit wird an drahtförmigen Eisenproben der Einfluß mechanischer Zugspannungen im Bereich elastischer Deformation auf die Magnetisierung des verschieden gebildeten remanenten Zustandes untersucht. Die experimentell erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß die elastischen Spannungen markante Änderungen der remanenten Magnetisierung hervorgerufen. Diese Änderungen hängen einerseits mit den grundsätzlichen Magnetisierungsprozessen, welche man aus der Analyse der energetischen Verhältnisse im elastisch deformierten Ferromagnetikum hervorziehen kann andererseits aber auch mit den spezifischen Änderungen der Bereichstruktur, die im realen Ferromagnetikum durch äußere mechanische Spannungen hervorgerufen werden und welche man aus den vereinfachten Betrachtungen nicht voraussagen kann, zusammen. Ein wichtiger Faktor, der das Verhalten und die Größe der resultierenden Änderung der Magnetisierung beeinflusst, ist dabei die Wahl des Anfangszustandes als auch die Art seines Bildens.

EINLEITUNG

Es ist bekannt, daß die mechanischen Spannungen die magnetischen Eigenschaften der Ferromagnetika sehr markant beeinflussen. Unter der Wirkung mechanischer Spannungen ändert sich sowohl die magnetische Struktur (s. z. B. [1—5]) als auch die Größen, die das Ferromagnetikum vom makroskopischen Standpunkt charakterisieren (s. z. B. [6—10]). Obwohl auch die remanente Magnetisierung zu den Größen gehört, die sehr empfindlich auf Änderungen innerer Spannungen hervorgerufen durch äußere mechanische Belastung reagieren, wurde der Einfluss der elastischen Deformation auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes des Eisens bis jetzt nicht eingehender untersucht. In den Arbeiten [11, 12] sind, im Zusammenhang mit dem Studium des Einflusses mechanischer Spannungen im Bereich der elastischen Deformation auf die Magnetostriktionseigenschaften der metallischen Ferromagne-

tika, die experimentell erhaltenen Abhängigkeiten der Magnetisierung des wahren remanenten Zustandes von der Größe der Zugspannung angeführt. In der Arbeit [13] wurde der Einfluß der zyklischen Belastung im Bereich der elastischen Deformation auf den remanenten magnetischen Zustand der Fe-Proben untersucht. Eine kurze Bemerkung vom Einfluß der elastischen Deformation auf die Magnetisierung des remanenten Zustandes des Eisens kann man auch in der Arbeit [14] finden. Es zeigt sich zweckmäßig die bisherigen Erkenntnisse aus dieser Problematik um einige neuere experimentelle Ergebnisse zu ergänzen. Das ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

PROBEN UND MEßMETHODE

Die Messungen wurden an drahtförmigen polykristallinen Eisenproben der Länge 344 mm und eines Durchmesser von 1,5 mm durchgeführt. Vor der Messung wurden die Proben bei einer Temperatur von 650 °C 5 Stunden lang in Wasserstoffatmosphäre geglüht. Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Proben war geringer als 2 °C/min. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Proben war¹: C — 0,0547 %, Mn — 0,42 %, Si unter 0,01 %, P — 0,015 %, S — 0,019 %, Ca — 0,225 %, Cr — 0,013 %, Al — 0,011 %, N — 0,0016 %, O₂ — 0,0236 %, H₂ — 0,00032 %.

Die mechanischen und magnetischen Eigenschaften der Proben im Ausgangszustand waren folgende: Elastizitätsgrenze 23,5 kp/mm², Festigkeitsgrenze 37,0 kp/mm², Koerzitivfeldstärke 2,8 Oe, magnetische Induktion des wahren remanenten Zustandes 12 450 Gauß.

Zum Messen des magnetischen Zustandes der Proben wurde die ballistische Methode verwendet. Die Proben wurden im Solenoid, das in der Längsrichtung der Probe ein magnetisches Feld einer Homogenität besser als 99,4 % lieferte, magnetisiert. Um den wahren remanenten Zustand zu erreichen, wurden die Proben praktisch bis Sättigung durch ein Magnetfeld von einer Intensität von 454 Oe magnetisiert². Wie die Kontrollmessungen gezeigt haben, dieses Feld war hinreichend dazu, um die remanente Magnetisierung ihren höchsten Wert erreichen zu lassen.

Die magnetische Induktion des remanenten Zustandes wurde mit Hilfe einer in der Mitte der Probe untergebrachten kleinen Meßspule durch Galvano-

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

² Die magnetische Induktion, die dem Magnetfeld von einer Intensität von 454 Oe entspricht, war 20 060 Gauß.

meterausschlag, der dem Sprung aus diesem Zustand in den Sättigungszustand entspricht, bestimmt.

Mit Rücksicht auf die geometrischen Abmessungen der untersuchten Proben konnte der Entmagnetisierungseinfluß der Probenenden auf die magnetischen Messungen in der Mitte der Proben vernachlässigt und für die remanente Induktion einfach $B = 4\pi J$ geschrieben werden.

Der Einfluß der elastischen Deformation auf die Magnetisierung des wahren remanenten Zustandes³ wurde so untersucht, daß zuerst die magnetische Induktion des wahren remanenten Ausgangszustandes der unbelasteten Probe gemessen wurde, dann wurde in der Probe eine Zugspannung hervorgerufen, welche die Probe elastisch deformierte und es wurde die magnetische Induktion der Probe bei der ständigen Wirkung der Spannung gemessen. Darauf wurde die Spannung gehoben und der wahre remanente Ausgangszustand wieder gebildet. In der Probe wurde hierauf eine entsprechende höhere Zugspannung hervorgerufen und so ein weiterer Wert der magnetischen Induktion bei der Wirkung dieser Spannung gemessen. So wurden nacheinander die den einzelnen konstanten Werten der Zugspannung zugehörigen Werte der magnetischen Induktion erreicht. Ein analogischer Vorgang wurde bei der Untersuchung des Einflusses der elastischen Deformation auf die Magnetisierung anderer remanenten Anfangszustände gewählt.

Da zum Messen die oben angeführte ballistische Meßmethode verwendet wurde und vor dem Messen eines jeden Wertes der magnetischen Induktion immer der gewählte Anfangszustand erneuert werden mußte, haben die Messungen die Reproduzierbarkeit der erhaltenen Ergebnisse leicht zu beurteilen erlaubt. Es hat sich gezeigt, daß das Bilden des Anfangszustandes und auch das Bilden anderer den einzelnen konstanten Werten der äusseren Zugspannung zugehörigen magnetischen Zustände vom makroskopischen Standpunkt gut reproduzierbar ist.

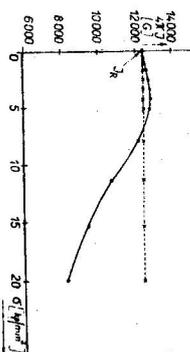
EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE DISKUSSION

In Abb. 1 ist die gemessene Abhängigkeit der remanenten Induktion von der in der Probe hervorgerufenen elastischen Zugspannung⁴ angeführt.

³ Unter dem wahren remanenten Zustand verstehen wir jenen magnetischen Zustand im nullwertigen Magnetfeld, in welchen die Probe nach der Aufmagnetisierung bis zur Sättigung entlang des sinkenden Astes ihrer maximalen Hystereseschleife kommt. Die Magnetisierung dieses Zustandes bezeichnen wir J_r zur Unterscheidung von der Magnetisierung anderer remanenten Zustände, welche wir J , kennzeichnen werden.

⁴ In dieser Abbildung sind mit Kreuzen die Werte der Magnetisierung der Probe im wahren remanenten Zustand, in welche diese Probe nach Behebung der zuständigen Zugspannung σ gebracht wurde, bezeichnet. Diese Meßwerte zeigen, daß die Bildung

Abb. 1. Abhängigkeit der Magnetisierung des remanenten Zustandes von der hervorgerufenen elastischen Zugspannung σ für den wahren remanenten Anfangszustand.



Es ist ersichtlich, daß es bei kleinen Werten der Zugspannung zum Wachsen der Magnetisierung bis zu einem gewissen Maximum kommt, nach dessen Überschreitung die Magnetisierung sinkt und niedrigere Werte als ihr Anfangswert erreicht.

Auf Grund einer Analyse der energetischen Verhältnisse im elastisch deformierten Einkristall des Eisentyps [15, 16] könnte man eine verhältnismäßig einfache qualitative Erklärung der erhaltenen Abhängigkeit erwarten. Nach dieser kommt es bei niedrigeren Spannungen zur Bildung magnetischer Textur als Folge der Verschiebungen von 90°-igen Blochwänden. Weil die Spannung σ und A_{100} gleiche Vorzeichen haben ($\sigma > 0, A_{100} > 0$), werden jene kristallographischen leichten Richtungen bevorzugt, welche am nächsten zur Drahtachse liegen. Dieser Prozeß kann dann zur Erhöhung der Magnetisierung führen. Andererseits aber $A_{111} < 0$, darum kommt es unter dem Einfluß der Zugspannung ($\sigma > 0$) zur Abneigung leichter Richtungen von tetragonalen Achsen zu der senkrecht zur Richtung der Drahtachse stehenden Ebene. So beginnt die magnetische Textur durch Drehung der Vektoren der spontanen Magnetisierung, was ein Sinken der Magnetisierung bei höheren Spannungen hervorrufen kann, zu entstehen. In der Arbeit [15] wird eine solche Drehung schon bei Fe-Si, wo $|A_{111}/A_{100}| \approx 0,1$, erwogen. Beim Eisen ist dieser Anteil viel größer ($|A_{111}/A_{100}| \approx 0,85$) und darum sollte sich die Drehung wesentlich markanter äußern⁵.

Man muß bemerken, daß obwohl beim Eisen theoretisch die Möglichkeiten der Drehung der Vektoren der spontanen Magnetisierung durch die Wirkung mechanischer Spannung gegeben ist [17]⁶, bisher ein solcher Prozeß beim Studium der Bereichstruktur an der Oberfläche experimentell nicht beobachtet

des anfänglichen Remanenzzustandes vom makroskopischen Standpunkt gut reproduzierbar ist.

⁵ In der Arbeit [15] wird konstatiert, daß die Drehung des Vektors der spontanen Magnetisierung in der Ferromagnetika größer ist, bei denen das Verhältnis $|A_{111}/A_{100}|$ größer ist.

⁶ Kristallenergie und Spannungsenergie beim Eisen sind gleicher Ordnung bei ≈ 32 kp/mm².

wurde. H. Träuble [18] hat den Einfluß der plastischen Deformation auf die Bereichsstruktur der Fe-Si-Einkristalle untersucht. Seine Beobachtungen hat er an der Ebene (001) durchgeführt. Selbst bei einer starker plastischen Deformation hat er eine Drehung des Vektors der spontanen Magnetisierung nicht festgestellt. L. J. Dijkstra und U. Martius [19] haben eine starke Krümmung der Blochwände an plastisch deformiertem Fe-Si beobachtet. Diese Krümmung führen sie jedoch auf die Deformation des Gitters, zu der es bei der plastischen Deformation kommt, zurück. Die Prozesse, welche sich im Innern der Ferromagnetika beim Hervorrufen der Spannungen abspielen, sind der experimentellen Beobachtung praktisch unzugänglich und man kann deswegen nicht mit Gewißheit behaupten, daß es zu einer Drehung der Vektoren der spontanen Magnetisierung im Innern der Ferromagnetika nicht kommen könnte. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Tatsache, daß die inneren Spannungen in undeforinierten polykristallinen Material stark inhomogen sind und in einzelnen seinen Teilen ziemlich hoch sein können. Ungleichmäßig ist auch die Deformation schon im Bereich der elastischen Deformationen [20].

In den Arbeiten [21, 22] wird darauf hingewiesen, daß es bei der Wirkung der mechanischer Druck- und Zugspannungen in den Ferromagnetika auch zur Vergrößerung der Gradienten der inneren Spannungen ($\partial\sigma_i/\partial n$) kommt, was natürlich auch zur Vergrößerung der Gradienten der Energie der Blochwände ($\partial\gamma/\partial n$) führt. Da dieser Faktor die Prozesse der Wandverschiebungen erschwert, stellt er eine der Ursachen dar, warum z. B. beim Fe-Si das Anwachsen der Maximalpermeabilität μ_{max} mit der Zugspannung nur bis zu einem gewissen Grenzwert, nach welchem μ_{max} mit zunehmender Zugspannung sich verkleinert, beobachtet wird [21, 23] und auch einen der Gründe, warum die Magnetisierungskurven der Fe-Si Proben mit anwachsender Zugspannung von einem bestimmten Wert dieser Spannung sinken [21]. Es kann daher erwartet werden, daß sich der Einfluß der Vergrößerung der Gradienten der inneren Spannungen ($\partial\sigma_i/\partial n$), beim Wirken mechanischer Spannungen, auch an der Herabsetzung der Magnetisierung des remanenten Zustandes des Eisens beteiligt.

Die qualitative Erklärung des Verlaufes der gemessenen Abhängigkeit geht daraus hervor, daß es durch das Hervorrufen der Zugspannung in der Probe als Folge der Verschiebungen der 90°-igen Blochwände — zur Vergrößerung der Ausmasse der Bereiche der spontanen Magnetisierung, welche in der zur Drahtachse am nächsten stehenden Richtungen magnetisiert sind, kommt. Man muß sich dessen bewußt sein, daß falls die Spannungen dabei eine Erhöhung der Magnetisierung hervorrufen sollen, dann müssen von diesen Bereichen jene mehr wachsen, bei welchen die Richtung der spontanen Magnetisierung eine Komponente in der Richtung der resultierenden Magnetisierung

hat. Mit Rücksicht auf die Richtung der hervorgerufenen Spannung ist die Vergrößerung der gegenseitig umgekehrt orientierten Bereiche, als Folge der Verschiebungen der 90°-iger Wände, energetisch gleichwertig. Darum können auch die Verschiebungen der 90°-iger Wände, hervorgerufen durch die Zugspannung, sowohl zur Erhöhung als auch zur Verkleinerung der resultierenden Magnetisierung führen. Dies hängt davon ab, wie die einzelnen Bereiche der spontanen Magnetisierung im Ausgangszustand vertreten sind. In diesem Zusammenhang haben wir den Einfluß elastischer Spannungen auf die Magnetisierung verschiedener anderen remanenten Zustände untersucht. Diese vielfältigen remanenten Anfangszustände wurden aus verschiedenen Punkten der Hystereseschleife, ähnlich wie in der Arbeit [24], gebildet. Die erreichten Abhängigkeiten sind in der Abb. 2 und 3 dargestellt.

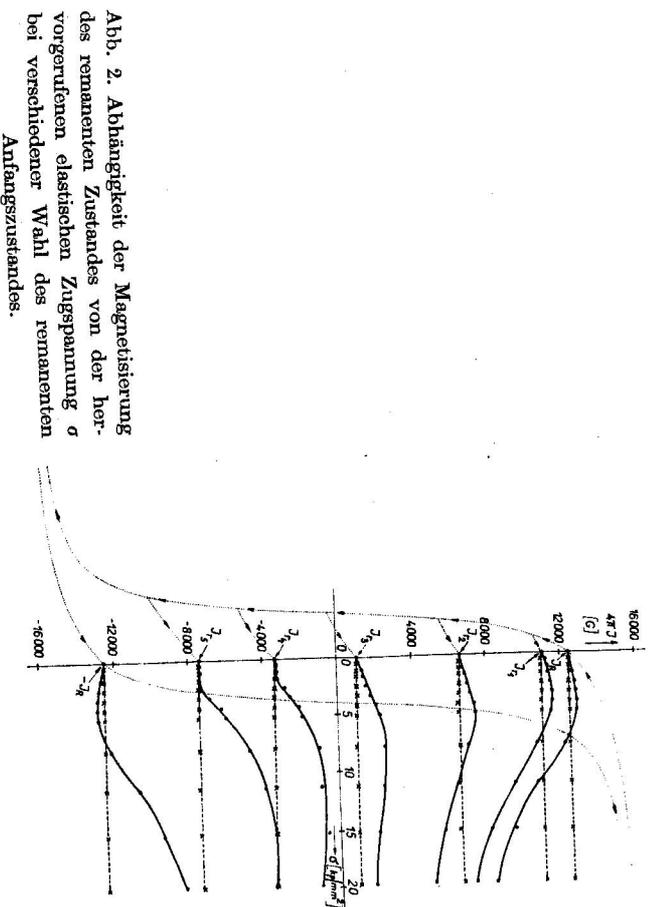


Abb. 2. Abhängigkeit der Magnetisierung des remanenten Zustandes von der hervorgerufenen elastischen Zugspannung σ bei verschiedener Wahl des remanenten Anfangszustandes.

Aus dem Verlauf der gemessenen Abhängigkeiten kann man konstatieren:
1. Beim Wirken kleiner elastischer Spannungen (im Bereich 0—7 kp/mm²) auf die sich im wahren remanenten Zustand befindende gegliederte Eisenprobe

⁷ In den Abbildungen sind schematisch auch die Arten des Bildens der einzelnen remanenten Zustände angeführt.

haben an der Änderung der gesamten Magnetisierung einen grösseren Anteil jene Bereiche der spontanen Magnetisierung, deren Vektoren J_s einen spitzen Winkel mit der Richtung der resultierenden Magnetisierung bilden. Darum steigt anfangs die Magnetisierung des remanenten Zustandes mit dem Anwachsen der Zugspannung σ . Der Zuwachs der Magnetisierung hängt dabei davon ab, wie in der Probe die Bereiche vertreten sind, deren Richtung J_s mit der Richtung der resultierenden Magnetisierung einen stumpfen Winkel bildet. Durch den Einfluß dieser Bereiche sinkt die remanente Magnetisierung.

An der Verkleinerung der Magnetisierung beim Anwachsen der äußeren Zugspannung beteiligt sich auch die Vergrößerung der Gradienten der inneren Spannungen.

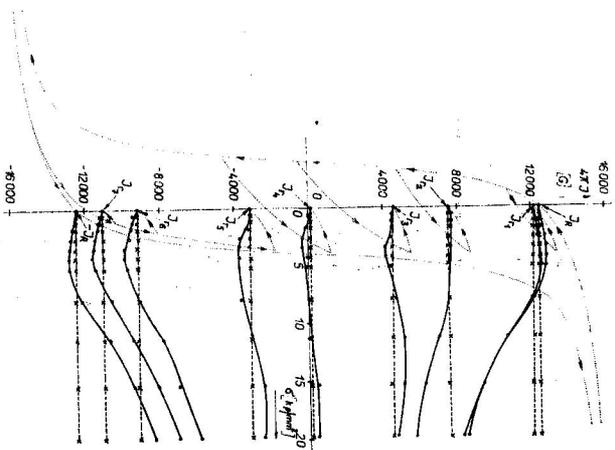


Abb. 3. Abhängigkeit der Magnetisierung des remanenten Zustandes von der hervorgehenden elastischen Zugspannung σ bei verschiedener Wahl des remanenten Anfangszustandes.

Beim Anwachsen der Zugspannung vergrößert sich allmählich auch der Einfluß der Drehung der Vektoren der spontanen Magnetisierung zu der Ebene, welche senkrecht zur Richtung des Ziehens steht. Dadurch wird die Magnetisierung weiter verringert.

Die Abhängigkeit $4\pi J_r = 4\pi J(\sigma)$ für den Fall, wenn wir als Ausgangszustand den wahren remanenten Zustand gewählt haben, ist für beide wahren remanenten Zustände J_R und auch $-J_R$ ganz gleich, was auch zu erwarten ist.

2. Die Abhängigkeit $4\pi J = 4\pi J(\sigma)$ bei einem anderen remanenten Anfangszustand ist keine eindeutige Funktion der Magnetisierung dieses Zustandes, hängt jedoch von der Art seines Bildens ab. So sehen wir z. B., daß bei praktisch gleichem remanenten Anfangszustand das Hervorrufen elastischer Spannung sowohl Verkleinerung (J_r , Abb. 2) als auch Anwachsen der Magnetisierung (J_r , Abb. 3) verursachen kann, in Abhängigkeit davon, auf welche Weise wir den jeweiligen remanenten Zustand gebildet haben. Das bedeutet, daß es bei der Bildung des remanenten Zustandes, welcher vom makroskopischen Standpunkt gleich ist, zu einer bestimmten Verteilung der Vektoren der spontanen Magnetisierung kommt, die ihrerseits wesentlich von der Art des Bildens dieses Zustandes abhängig ist. So kann man die Unterschiede in der Abb. 2 und Abb. 3 angeführten Abhängigkeiten qualitativ begreifen.

3. Im Bereich elastischer Spannungen sind alle remanenten Anfangszustände vom makroskopischen Standpunkt vollständig reproduzierbar. In der Abb. 2 und Abb. 3 bezeichnen die Kreuze die gemessene Magnetisierung des neuerdings gebildeten Anfangszustandes nach Behebung der zuständigen Belastung.

Beim Verlaufe des Verlaufes der einzelnen Abhängigkeiten in der Abb. 2 und Abb. 3 muß man beachten, daß die diskutierten Prozesse nicht die einzigen sind, die sich an den Änderungen der Magnetisierung des remanenten Zustandes beteiligen. Das Studium der durch äussere mechanische Spannungen im remanenten Zustand hervorgerufenen Änderungen der Bereichstruktur hat gezeigt [25], daß die mechanischen Spannungen auch einige bestimmte spezifische Änderungen der Bereichstruktur, die man aus den vereinfachten Betrachtungen nicht voraussagen kann, hervorruft.

Abschließend möchte ich mich Herrn Prof. Dr. V. Hajko für wertvolle Diskussion und anregende Bemerkungen zu dieser Arbeit bedanken.

SCHRIFTTUM

- [1] Dijkstra L. J., Martius U. M., Rev. Mod. Phys. 25 (1953), 146.
- [2] Киренский Л. В., Савченко М. К., Родичев А. М., Изв. АН СССР, сер. физ., 22 (1958), 1181.
- [3] Киренский Л. В., Савченко М. К., Изв. высш. уч. зав., физика (1958), 35.
- [4] Драгошанский Ю. Н., Шур Я. С., ФММ 27 (1966), 678.
- [5] Драгошанский Ю. Н., Зайкова В. А., Шур Я. С., ФММ 25 (1968), 289.
- [6] Buzorh R. M., Williams H. J., Rev. Mod. Phys. 17 (1945), 72.
- [7] Вонсовский С. В., ЖЭТФ 17 (1947), 1094.
- [8] Белов К. П., Угрюше, тепловые и аэстроинерционные явления в ферромагнитных металлах. ГИИТТ, Москва-Ленинград 1951.
- [9] Бозор Р. М., Ферромагнетизм. ИИЛ, Москва 1956.
- [10] Зайкова В. А., Шур Я. С., ФММ 21 (1966), 664.

- [11] Potocký L., Hajko V., Fyz. čas. SAV 17 (1967), 247.
- [12] Potocký L., Fyz. čas. SAV 18 (1968), 139.
- [13] Daniel-Szabó J., Potocký L., Fyz. čas. SAV 19 (1969), 154.
- [14] Procopiu S., Viserian I., Studii si cercetari stint. Acad. RPR Fil. Iasi., Fiz. si stinte tehn. 14 (1963), 285.
- [15] Дунаев Ф. Н., Изв. АН СССР, сер. физ., 23 (1961), 1502.
- [16] Дунаев Ф. Н., Уч. зап. Урал. гос. унив., сер. физ. № 62 (1967), 31.
- [17] Greiner Ch., Druck-Welt Düsseldorf 50 (1964), 637.
- [18] Trübble H., Z. f. Metallkde 53 (1962), 211.
- [19] Dijkstra L. J., Martius U. M., Phys. Rev. 85 (1952), 714.
- [20] Трофимов В. И., Изв. АН СССР ОТН (1955), 128.
- [21] Дунаев Ф. Н., Уч. зап. Урал. гос. унив., сер. физ., (1965), 92.
- [22] Дунаев Ф. Н., Зверева В. И., Уч. зап. Урал. гос. унив., сер. физ., № 62 (1967), 69.
- [23] Шур Я. С., Дунаев Ф. Н., Изв. АН СССР, сер. физ., 16 (1952), 640.
- [24] Hajko V., Daniel-Szabó J., Čs. čas. fys. 9 (1959), 38.
- [25] Potocký L., *Dissertation*. Naturwissenschaftliche Fakultät der Šafárik-Universität, Košice 1969.

Eingegangen am 17. November 1969

Ústava experimentální fyziky SAV,
Košice