

## EINFLUß DER ZYKLISCHEN BELASTUNG AUF DIE BEREICHSTRUKTUR VON Fe—Si PROBEN IM REMANENTEN ZUSTAND

PETER TRENKLER,\* JURAJ DANIEL-SZABÓ,\* LADISLAV POTOCKÝ,\*\*

Košice

In der Arbeit werden auf Fe—Si Proben, die sich im remanenten Ausgangszustand befinden, Änderungen der Bereichstruktur die durch zyklisch abgenommene und angelegte Zugspannung im Bereich der elastischen Deformation erzeugt wurden, verfolgt. Die experimentell beobachteten Änderungen der Bereichstruktur werden im Bezug zu den Reptation und Bascul-négative-Effekten, die im Prozeß der unsymmetrischen Ummagnetisierung eines metallischen Ferromagnetikums in Erscheinung treten, interpretiert.

### I. EINLEITUNG

In der Arbeit [1] wurde der Einfluß der zyklischen Belastung auf den remanenten magnetischen Zustand von Eisendrähten verfolgt. Die Maßergebnisse zeigen, daß der Prozeß der zyklisch abgenommenen und angelegten Zugspannung zu nacheinanderfolgenden irreversiblen Magnetisierungsänderungen bei Zuständen mit angelegter Spannung und auch bei entlasteten Zuständen führt. Diese irreversiblen Magnetisierungsänderungen, die von der Größe der angewendeten Spannung abhängen, entsprechen gut der linearen Abhängigkeit von  $\sqrt{\lg n}$  (wo  $n$  die Zahl der Zyklen bedeutet), besonders für höhere Werte von  $n$ . Aus den gewonnenen experimentellen Ergebnissen kann man schließen, daß sich die zyklische Belastung und Entlastung des Ferromagnetikums, vom makroskopischen Standpunkt aus, analogisch äußert wie die zyklische unsymmetrische Ummagnetisierung des Ferromagnetikums zwischen zwei festen Werten des äußeren Magnetfeldes. Wie bekannt, sind für die irreversiblen Magnetisierungsänderungen bei einer solchen Ummagnetisierung

\* Katedra experimentálnej fyziky Prírodovedeckej fakulty UPJŠ, KOŠICE, nám. Febrúarového vÍf. 9.

\*\* Ústav experimentálnej fyziky SAV, KOŠICE, nám. Febrúarového vÍf. 9.

im Grunde genommen zwei Effekte verantwortlich, und zwar die Reptation und Bascule-négative-Effekte. Während der erste zu gleichen Magnetisierungsänderungen auf beiden Enden der unsymmetrischen Schleife führt, kommt der zweite nur bei niederen Werten von  $n$  zur Geltung und führt zur Drehung der unsymmetrischen Schleife im Uhrzeiger Sinn. Die Bascule und Reptation-Effekte kommen gleichzeitig zur Geltung und die Magnetisierungsänderung in den Endpunkten der unsymmetrischen Schleife ist die Folge der Überlagerung dieser beiden Effekte.

Die Existenz der Reptation und Bascule-Effekte wurde von Nèel [2—4] theoretisch begründet und experimentell wurden diese Effekte insbesondere von Nguyen van Dang (siehe z. B. [5—8]), Hajko, Daniel-Szabó und Gengnagel (siehe z. B. [9—12]) untersucht.

In den Arbeiten [13—15] wurde der Charakter der mikrostrukturellen Änderungen, die sich im Prozeß der unsymmetrischen Ummagnetisierung verwicklichen, untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß sich die Reptation und Bascule-Effekte auf charakteristische Weise auch in den beobachteten Änderungen der Bereichstruktur äußern.

Mit Rücksicht auf die angeführte Analogie zwischen der zyklischen Belastung und der nacheinanderfolgenden unsymmetrischen Ummagnetisierung des Ferrromagnetikums, so wäit es sich um makroskopisch gemessene Magnetisierungsänderungen handelt, zeigt es sich als vorteilhaft auch den Einfluß der zyklisch abgenommenen und angelegten mechanischen Zugspannung auf den Charakter der Bereichstruktur zu untersuchen. Solche Messungen wurden unseren Wissens bisher systematisch nicht durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der zyklischen Belastung auf die Bereichstruktur ausgewählter Körner von polykristallinen Fe—Si Proben im remanenten Zustand, verfolgt.

## II. PROBEN UND MEßMETHODE

Die Änderungen der Bereichstruktur im Prozeß der zyklischen Entlastung und Belastung wurden auf polykristallinen Fe—Si Blechen (3,2 % Si) vom Ausmaß  $65 \times 5 \times 0,2$  mm untersucht. Die Proben wurden vor der Messung auf eine geeignete Korngröße ausgeglüht. Die mittlere Größe der verfolgten Körner bewegte sich zwischen 2—4  $\mu$ m. Die so vorbereiteten Proben wurden in eine Einspannvorrichtung befestigt, die mit einer geeigneten Windung zur Magnetisierung versehen war.

Die Beobachtung der Bereichstruktur wurde nach der Bitter-Akulovschen Pulvermethode mit einem metallographischen Mikroskop durchgeführt. Die Wahl der Körner, auf denen die Beobachtungen gemacht wurden, richtete sich allein nach der Forderung, daß die Bereichstruktur auf der Oberfläche

der Proben die allereinfachste sei. Es wurden deshalb Körner ausgewählt, deren Schlitfebene praktisch identisch mit der Ebene des Typs {110} ist. Auf der Oberfläche solcher Körner entsteht, wie bekannt, eine einfache Bereichstruktur, die durch  $180^\circ$  Bloch-Wände charakterisiert ist.

Als Anfangszustand wurde für die entsprechenden Beobachtungen der wahre remanente Zustand ausgewählt. Dieser Zustand wurde nach der Aufmagnetisierung der Probe in einem Magnetfeld der Feldstärke von 250 Oe und seiner Ausschaltung erzielt. Die Experimente haben gezeigt, daß schon bei einer viel kleineren Feldstärke die Bereichstruktur auf der Oberfläche der gegebenen Proben verschwindet. Auf die Probe, die sich im remanenten Zustand befand, legten wir eine Zugspannung an ( $\sigma = 4,8$  kp/mm<sup>2</sup>), die in den Bereich der elastischen Deformation fällt. Bei dem weiteren Meßverfahren wurde diese Spannung abwechselnd abgenommen und angelegt. In den einzelnen belasteten und entlasteten Zuständen haben wir die Bereichstruktur photographiert und die Verschiebungen der Blochwände mittels eines Meßmikroskops gemessen. In der Abb. 1 (Bild a) sehen wir die Aufnahme der Bereichstruktur eines typischen Kornes auf dem die Messungen gemacht wurden sowie die schematische Skizze dieser Struktur mit der Bezeichnung der einzelnen Wände (Bild b). Wir bezeichnen die Breite eines ausgesuchten Bereiches in den Zuständen mit angelegter Spannung für den  $n$ -ten Zyklus  $S_{\sigma,n}$  und in den entlasteten Zuständen  $S_{0,n}$ ; im Anfangszustand, den wir durch die Anlegung der Spannung auf den remanenten Ausgangszustand erreichen, bezeichnen wir die Bereichbreite  $S_{\sigma,0}$  und nach Abnahme dieser Spannung ist die Bereichbreite  $S_{0,0}$ . Die entsprechenden Änderungen der Bereichbreite gegen den so gewählten Ausgangszustand sind:  $\Delta S_{\sigma,n} = S_{\sigma,n} - S_{\sigma,0}$ ,  $\Delta S_{0,n} = S_{0,n} - S_{0,0}$ .

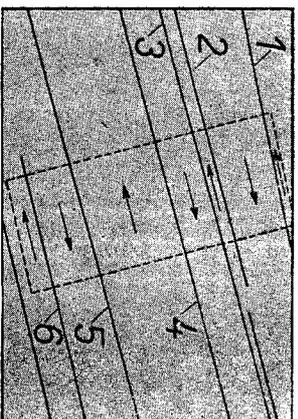
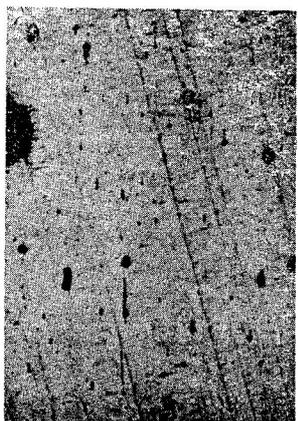


Abb. 1. a. Die Bereichstruktur eines typischen Kornes an dem die Untersuchungen gemacht wurden. b. Schematische Skizze der Bereichstruktur aus der Abb. 1a mit der Bezeichnung einzelner Wände.

### III. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE DISKUSSION

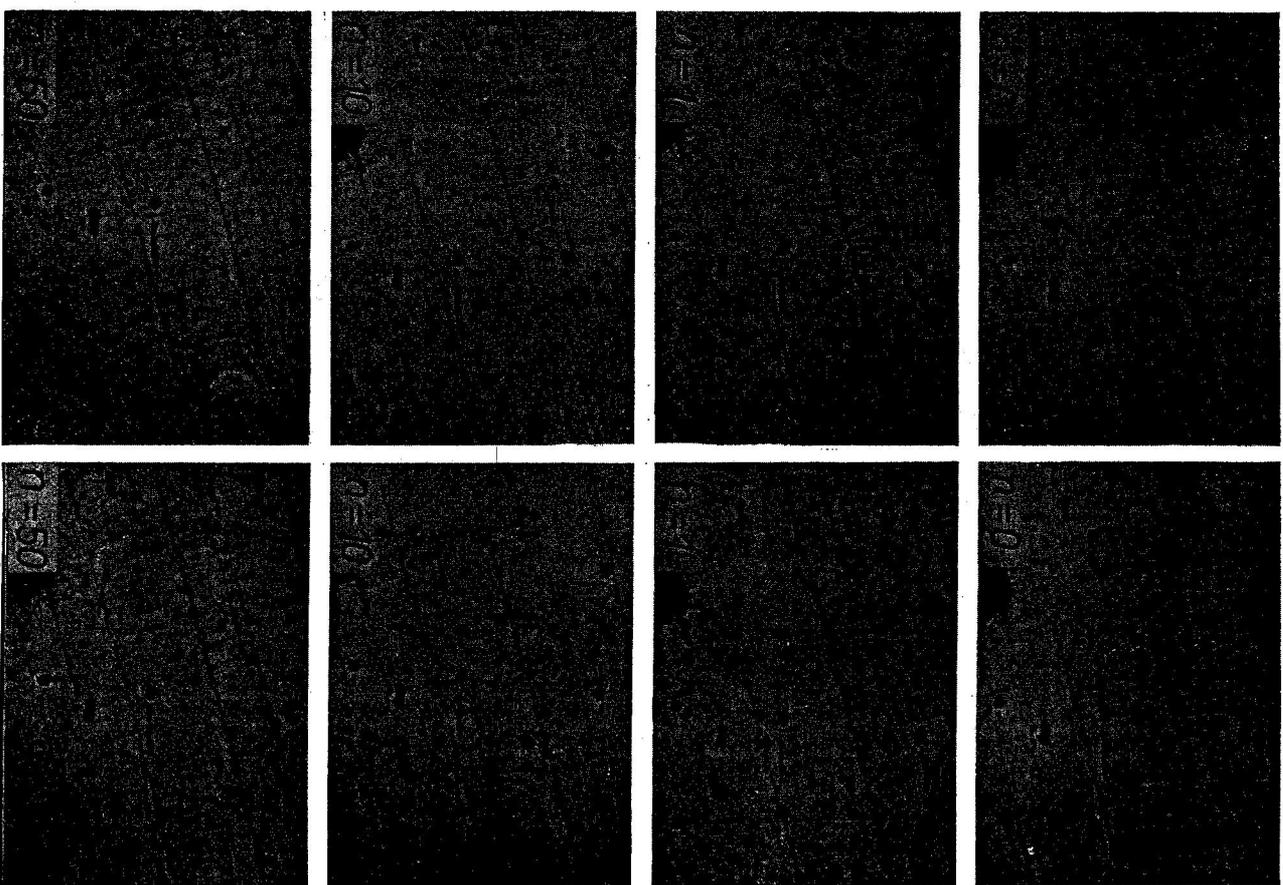
In Abb. 2 sind zur Illustration die Aufnahmen der Bereichstrukturen für einige Werte  $n = 0, 1, 10, 50$  im belasteten (Bild a) sowie im entlasteten Zustand (Bild b) an einem ausgewählten Korn Nr. 1 dargestellt. Das aufsteigende Stadium der einzelnen Bilder mit dem Mikroskop zeigt, daß es im Verlauf der zyklischen Entlastungen (oder Belastungen) zu nacheinanderfolgenden irreversiblen Verschiebungen der Blochwände zu energetisch günstigeren Lagen kommt. Der Charakter der Änderungen der einzelnen Wände ist verschieden. Einige von ihnen ändern ihre Lage ausdrucksvoller bei niederen Werten von  $n$  und haben die Tendenz bei höheren  $n$  ihre Lage zu stabilisieren; andere Wände wieder beginnen sich erst bei höheren Werten von  $n$  zu bewegen und man findet auch Wände, deren Lage sich im Prozeß der zyklischen Belastung in komplizierter Art ändert.

Bei der Verarbeitung der Ergebnisse zeigte es sich als vorteilhaft die Abhängigkeit der Bereichbreite von der Anzahl der Zyklen  $n$  zu studieren. So sind in Abb. 3 die Abhängigkeiten der Breite einzelner Bereiche für zwei Körner — in Bezug auf ihre Anfangsbreite bei  $n = 0$  — von dem Wert  $\lg n$  dargestellt. Die unterbrochenen und ausgezogenen Kurven bilden — mit Rücksicht auf die Ungenauigkeit der Messung — den wahrscheinlichen Verlauf der Änderung  $\Delta S$  für die einzelnen Bereiche ab; diese werden im rechten Teil der Bilder mit den Nummern der Wände, die den gegebenen Bereich begrenzen, bezeichnet. Die Ungenauigkeit bei der Bestimmung  $\Delta S$ , die durch eine ganze Reihe von verschiedenen Ursachen bedingt ist (z. B. durch unterschiedliche Dicke des Pulverbildes der Wand, lokale Wandkrümmung, Bildungscharakter, u. dgl.), war für verschiedene experimentelle Punkte verschieden und im allgemeinen kleiner als  $3 \mu\text{m}$ .

Bild Nr. 3 zeigt, daß es bei der Mehrzahl der Bereiche während der zyklischen Belastung zur systematischen Änderung der Breite kommt; bei einigen Bereichen ändert sich die Breite nur wenig (Bild a, Bereiche 2—3 und 3—4) oder es kommt zur Änderung nur bei höheren Werten von  $n$  (Bild b, Bereich 1—2). Zur graphischen Darstellung der entsprechenden Abhängigkeit zeigte es sich als vorteilhaft für das  $n$  die logarithmische Skala zu verwenden. Analoge Ergebnisse haben wir auch bei den Messungen an reinen Eisenproben gewonnen.

Die irreversiblen Änderungen der pauschalen Magnetisierung, die makroskopisch bei der zyklischen Belastung von Ferromagnetika beobachtet wurden,

Abb. 2. Aufnahmen der Bereichstruktur für  $n = 0, 1, 10, 50$  im belasteten (Bild a) und entlasteten (Bild b) Zustand.



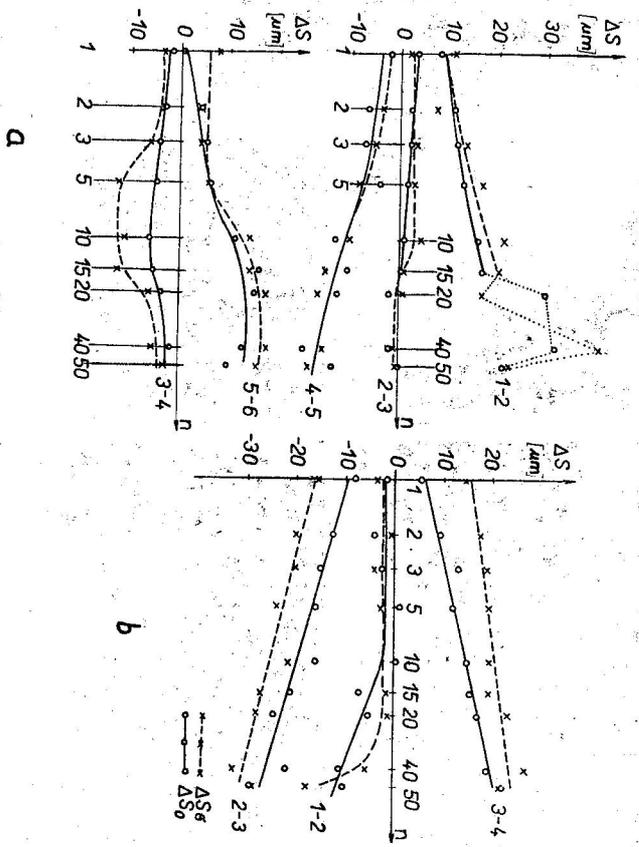


Abb. 3. Die Abhängigkeit der Bereichsbreiten mit Rücksicht auf ihre Anfangsstreuen bei  $n = 0$  von  $\lg n$ ; a. Korn 1, b. Korn 2.

erfüllen gut — zumindest für höhere Werte von  $n$  — die lineare Abhängigkeit  $\Delta J \sim \sqrt{\lg n}$ . Diese, makroskopisch beobachteten Effekte, sind natürlich das Ergebnis einer großen Anzahl von Mikroprozessen, die sich in den einzelnen Teilen des Ferromagnetikums abspielen. Auf Grund unserer Messungen, die auf der Oberfläche der geeignet ausgewählten Körner durchgeführt wurden, können wir natürlich keine Schlüsse über den Charakter dieser Effekte ziehen. Gewisse Informationen, wenigstens über die Änderungen der Oberflächemagnetisierung auf der geeignet gewählten Oberfläche, können wir gewinnen, falls wir in den einzelnen Zuständen der belasteten oder entlasteten Probe die Breite einzelner Bereiche registrieren und die Unterschiede der Flächen der in einer bzw. anderer Richtung orientierten Bereiche berechnen. Die Abhängigkeit dieser Größe  $\Delta M$  von  $n$  bzw.  $\lg n$  für das relativ größere Zahl der Blochwände besitzende Korn 1 wird in Abb. 4 und 5 gezeigt. Wie aus dem letzten Bild ersichtlich ist, hat die Abhängigkeit  $\Delta M$  ( $\lg n$ ) einen unregelmäßigen linearen Charakter. Die schematische Skizze eines Teiles der Probenoberfläche auf der diese Messungen gemacht wurden ist in Abb. 1b gestrichelt abgegrenzt.

Die gewonnenen experimentellen Ergebnisse sind analog denen, die die Autoren der Arbeiten [13—14] beim Studium der Mikroprozesse, die sich bei der nacheinanderfolgenden unsymmetrischen Ummagnetisierung metallischer Ferromagneteika verwickeln, und die im Grunde für die makroskopisch beobachtbaren Reptation und Bascule-negative-Effekte verantwortlich sind, gewonnen haben.

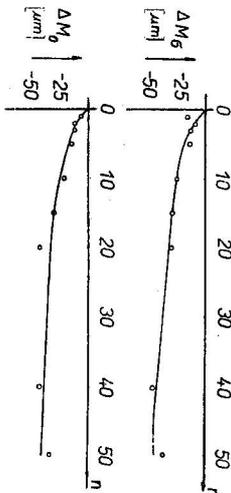
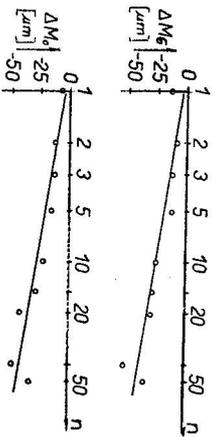


Abb. 4. Änderung der Größe  $\Delta M$  des Kornes 1 in Abhängigkeit von  $n$ .

Abb. 5. Änderung der Größe  $\Delta M$  des Kornes 1 in Abhängigkeit von  $\lg n$ .



In der Arbeit [1] wurde gezeigt, daß sich der Einfluß der zyklischen Belastung von ferromagnetischen Proben makroskopisch wie der Einfluß der zyklischen unsymmetrischen Ummagnetisierung von Ferromagneteika äußert. Unsere Ergebnisse weisen auch auf die Analogie im Verlauf von Mikroprozessen hin. Bei der zyklischen Belastung der Ferromagneteika kommt es zu ähnlichen Änderungen der Bereichstruktur wie bei der unsymmetrischen Ummagnetisierung. Es scheint also, und es ist im vollen Einklang mit der Néel'schen Theorie des Reptation-Effektes, daß die makroskopisch gemessenen Magnetisierungsänderungen bei der zyklischen Belastung von Ferromagneteika einen analogen mikrophysikalischen Grund haben, wie die entsprechenden Effekte bei der unsymmetrischen Ummagnetisierung.

SCHRIFTTUM

[1] Daniel Szabó J., Potocký L., Fyz. čas. SAV 19 (1969), 154.  
 [2] Néel L., Compt. Rendus 244 (1957), 2668.

- [3] Neel L., *Compt. Rendus* 246 (1958), 2313, 2963.
- [4] Neel L., *Phys. et le Radium* 20 (1959), 222.
- [5] Nguyen van Dang., *Compt. Rendus* 246 (1958), 2357, 3034.
- [6] Nguyen van Dang., *J. Phys. et le Radium* 20 (1959), 215.
- [7] Nguyen van Dang., *Phys. Stat. sol.* 3 (1963), 128.
- [8] Nguyen van Dang, *Phys. Stat. Sol.* 7 (1964), 293.
- [9] Daniel-Szabó J., *Gengnagel H., Phys. Stat. Sol.* 1 (1961), 512.
- [10] Hajko V., *Czech. J. Phys. B* 14 (1964), 203.
- [11] Hajko V., Daniel-Szabó J., Kavečanský V., *Czech. J. Phys. B* 12 (1962), 867.
- [12] Daniel-Szabó J., Hajko V., Gengnagel H., *Phys. Stat. Sol.* 9 (1965), 201.
- [13] Gengnagel H., Hajko V., Daniel-Szabó J., *Czech. J. Phys. B* 12 (1962), 714.
- [14] Kavečanský V., Hajko V., Daniel-Szabó J., *Mat. fyz. čas. SAV* 13 (1963), 1.
- [15] Widmann D., *Z. angew. Phys.* 22 (1967), 112.

Bingegangen am 3. 8. 1970