

STUDIUM DES EINFLUSSES DER MECHANISCHEN ZUGSPANNUNGEN IM BEREICH DER ELASTISCHEN DEFORMATION AUF DIE BEREICHSTRUKTUR DES EISENS IM REMANENTEN ZUSTAND¹

LADISLAV POTOCKÝ*, Košice

In der Arbeit wird der Einfluß der allmählich steigenden Zugspannung auf die Änderungen der Bereichstruktur polykristalliner Eisenproben, die sich im remanenten Ausgangszustand befinden, studiert. Die experimentell erhaltenen Ergebnisse werden im Bezug auf die Änderungen der Bereichstruktur, die aus der Analyse der energetischen Verhältnisse im elastisch deformierten Ferromagnetikum hervorgehen und im Bezug auf die in der Arbeit [4] angeführten makroskopisch gemessenen Änderungen der Magnetisierung bei der Wirkung der mechanischen Zugspannungen diskutiert.

I. EINLEITUNG

In den Arbeiten [1, 2] wurde auf Grund einer Analyse der energetischen Verhältnisse im elastisch deformierten Ferromagnetikum der kubischen Symmetrie der Einfluß der mechanischen Spannungen auf den magnetischen Zustand untersucht. Aus den in diesen Arbeiten durchgeführten Betrachtungen geht hervor, daß die mechanischen Spannungen mehr oder weniger markante Änderungen der Bereichstruktur des Ferromagnetikums hervorrufen, in Abhängigkeit davon, wie sind seine Anisotropie- und Magnetostruktioneigenschaften. Es wird darauf hingewiesen, daß bei den Ferromagnetika des Eisentyps die mechanischen Spannungen im Grunde zwei qualitativ verschiedene Arten von Änderungen der Bereichstruktur hervorrufen, und zwar: die Entstehung der magnetischen Textur, die durch Verschiebungen der 90°-igen Blochwände hervorgerufen ist und die Entstehung der magnetischen Textur, die durch Drehung des spontanen Magnetisierungsvektors zu der senkrecht zur Richtung der wirkenden Zugspannung stehenden Ebene verursacht wird. Kirenskiĭ, Ignatschenko und Roditschev in ihrer theoretischen

¹ Prof. Dr. V. Hajko zum 50. Geburtstag gewidmet.

* Ústav experimentálnej fyziky SAV, KOŠICE, nám. Februárového víť. 9.

Arbeit [3] zeigten, daß bei den Ferromagnetika des Eisentyps unter dem Einfluß der mechanischen Spannungen auch zu den Verschiebungen der 180°-igen Blochwände kommen kann.

In der Arbeit [4] wurde der Einfluß mechanischer Zugspannungen im Bereich der elastischen Deformation auf die Magnetisierung des verschieden gebildeten remanenten Zustandes polykristalliner Eisendrahte untersucht. Es wurde gezeigt, daß die elastischen Spannungen sehr verschiedene Änderungen der Magnetisierung des remanenten Zustandes hervorruft. Diese Änderungen haben einerseits einen solchen Charakter, welchen man aus der Analyse der energetischen Verhältnisse im elastisch deformierten Ferromagnetikum bevorzugen kann; andererseits geht es um spezifische Änderungen der Bereichsstruktur, die man anhand der vereinfachten Betrachtungen nicht voraussagen kann.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung des Einflusses der äußeren mechanischen Zugspannungen auf die Änderungen der Bereichsstruktur des Eisens im wahren Remanenzzustand. Solche Beobachtungen wurden bisher — unseren Wissens — systematisch nicht vollzogen. Bekannt sind jedoch einige experimentelle Ergebnisse, welche beim Studium des Einflusses der mechanischen Spannungen auf die Bereichsstruktur der ein- und polykristallinen Ferromagnetika, die sich im entmagnetisierten und im verschiedenen anderen Ausgangszuständen (s. z. B. [5—15]) befinden, erhalten wurden.

II. PROBEN UND EXPERIMENTALMETHODIK

Zu den Experimenten wurden Karbonyleisenproben in Form dünner Bänderchen der Abmessungen $60 \times 4 \times 0,32$ mm verwendet. Die Proben wurden vor der Messung 5 Stunden lang wärmebehandelt durch Glühung bei einer Temperatur von 1000 °C in Wasserstoffatmosphäre. Die Abkühlungsgeschwindigkeit der Proben war kleiner als 2 °C/min. Die angewendeten Eisenproben haben folgende Verunreinigungen enthalten: C — 0,0097 %, Mn unter 0,01 %, Si unter 0,01 %, P — 0,004 %, S — 0,012 %, Cu — 0,021 %, Cr — 0,037 %, Al — 0,019 %, N — 0,0033 %, O₂ — 0,0155 %, H₂ — 0,00024 %.²

Die Bereichsstruktur der Proben wurde durch das übliche Kolloidverfahren am metallographischen Lichtmikroskop verfolgt. Die mechanische und elektrolitische Polierung, mit welchen die Vorbereitung der Probe verbunden ist, führten zur Änderung der ursprünglichen Dicke der Probe. Die Dicke der Proben, an denen die eigentlichen Beobachtungen durchgeführt wurden, betrug 0,2—0,27 mm.

² Die chemische Analyse der Proben wurde durch V. H. Z. Praha durchgeführt.

Vor der Beobachtung wurden die Proben durch ein genügend starkes Magnetfeld ($H \approx 500$ Oe) praktisch in den Sättigungszustand und durch die Herabsetzung der Intensität dieses Feldes bis Null in dem remanenten Zustand gebracht. Dann wurden die Proben in eine geeignete Vorrichtung, die die Beobachtung der Bereichsstruktur der Proben bei gleichzeitiger Wirkung der Zugspannung ermöglichte, untergebracht. Die beobachteten Bereichsstrukturen wurden immer im remanenten Ausgangszustand und bei den einzelnen konstanten Werten der Zugspannung σ fotografiert. In Abb. 1—4 ist die Richtung der Zugspannung parallel zu den kürzeren Seiten der Abbildungen. In Abb. 5 ist die Richtung der Zugspannung parallel zu den längeren Seiten der Abbildungen.

III. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND IHRE DISKUSSION

In Abb. 1A ist die Bereichsstruktur, die für ein Korn mit einer zur kristallographischen Ebene des {100} Typs — welche sich durch die zwei leichten Richtungen auszeichnet — wenig geneigten Polierungsebene (um einen Winkel $\approx 2^\circ$) charakteristisch ist, sichtbar gemacht. In den weiteren Abbildungen dieser Serie können wir den Einfluß der allmählich steigenden Zugspannung auf die Änderungen der Bereichsstruktur eines solchen Typs beobachten. Wir sehen hier einen typischen Fall, bei dem durch die Blochwandverschiebung zur Vergrößerung solcher spontanen Magnetisierungsbereiche kommt, welche in der Richtung der wirkenden Zugspannung magnetisiert sind, zum Nachteil der Bereiche, die senkrecht magnetisiert sind.

In Abb. 2 sehen wir die Bereichsstruktur zweier Körner. Die Polierungsebene eines von ihnen (Korn I) ist zur kristallographischen Ebene des {110} Typs, welche eine leichte Magnetisierungsrichtung hat, wenig geneigt; die Bereichsstruktur des zweiten Kornes (Korn II) ist ähnlich wie in Abb. 1. Außer den Blochwandverschiebungen, die jene Bereiche der spontanen Magnetisierung hervorbringen, welche in der Nähe der Richtung der äußeren Zugspannung magnetisiert sind (Korn II), beobachten wir am Korn I folgende besonderen Änderungen der Bereichsstruktur:

a) es erscheinen sehr ausdrucksvolle 180°-igen Wandverschiebungen (s. die Bereiche „a“ und „b“),

b) es kommt zur Bildung neuer Grundbereiche mit den 180°-igen Wänden durch das Anwachsen der keilförmigen Bereiche (der Bereich „c“).

Einen solchen Prozeß beobachteten auch die Autoren der Arbeit [7] an der {011} Ebene des Fe—Si Einkristalls, der sich im entmagnetisierten Ausgangszustand befand. (Die Bildung neuer Grundbereiche durch das Anwachsen der keilförmigen Bereiche ist auch in Abb. 1 — Bereich „a“ und in Abb. 2 — Korn II — Bereich „a“, ersichtlich).

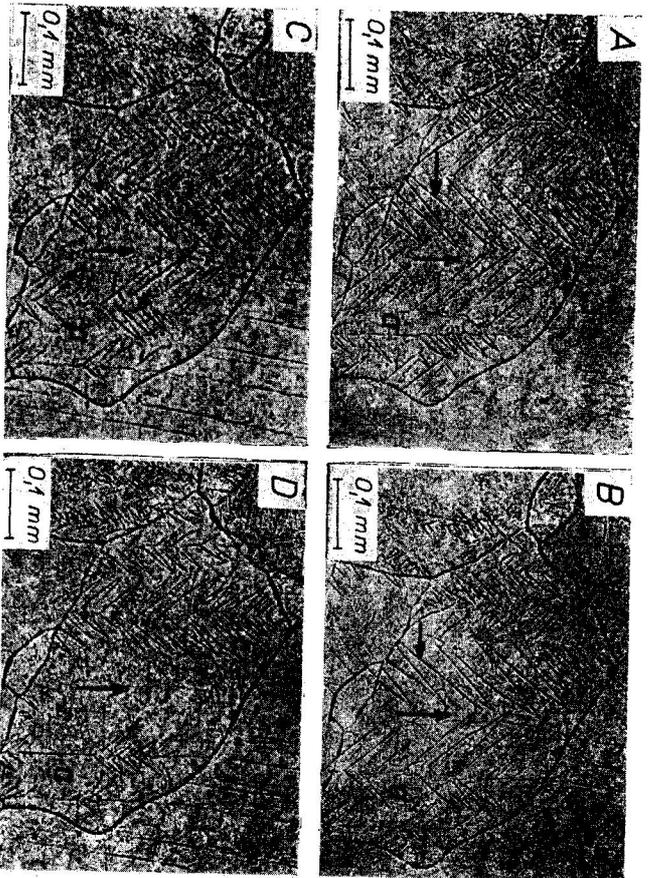


Abb. 1. Einfluß der allmählich steigenden äußeren mechanischen Zugspannung σ auf die Änderung der Bereichsstruktur des ausgewählten Kornes. A: $\sigma = 0$; B: $\sigma = 1,77$ kp/mm²; C: $\sigma = 2,74$ kp/mm²; D: $\sigma = 3,87$ kp/mm².

e) die plastische Verformung ruft die ausdrucksvolle Krümmung der Bereichswände (z. B. die Wände „e“ und „f“) hervor, was nach [17] mit der Drehung des Kristallgitters im Prozeß der plastischen Verformung zusammenhängen kann.

Die Verschiebungen der 180°-igen Wände sowie auch das Anwachsen der Keilbereiche wurden sehr gut an vielen der Körner verfolgt. In der Arbeit [7] wird festgestellt, daß auch die Änderung der Breite der Grundbereiche damit zusammenhängt, daß die Zugspannung eine gewisse kristallographische Richtung als die Vorzugsrichtung bestimmt. So werden einige Schließungsbereiche an den Korngrenzen im Bezug zur Richtung der wirkenden Zugspannung nachteilig orientiert, es kommt zur Verkleinerung ihrer Volumina durch das Bröckeln in den kleineren Bereichen und so auch zur Verkleinerung der Breite der 180°-igen Grundbereiche, die mit ihnen verbunden sind. Solche Änderungen der Schließungsbereiche haben wir aber an den Korngrenzen nicht beobachtet, obgleich wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, die Anzahl der 180°-igen Wände mit dem Anwachsen der Zugspannung in der Regel wächst.



Abb. 2. Einfluß der allmählich steigenden äußeren mechanischen Zugspannung σ auf die Änderung der Bereichsstruktur des ausgewählten Kornes. A: $\sigma = 0$; B: $\sigma = 0,87$ kp/mm²; C: $\sigma = 1,73$ kp/mm²; D: $\sigma = 3,78$ kp/mm²; E: $\sigma = 6,06$ kp/mm²; F: $\sigma = 15,10$ kp/mm².

In Abb. 3 ist ein Korn im remanenten Ausgangszustand ersichtlich, das sich im Grunde durch die Tropfenstruktur auszeichnet. Eine solche Struktur ist für jene Oberfläche charakteristisch, die zu der Kristallebene des {110} Typs eine Neigung von 4–7° [18] hat. (Die Unregelmäßigkeiten der Struktur im Ausgangszustand hängen mit den Restspannungen im Material zusammen.) Durch das Anwachsen der Spannung vergrößern sich allmählich die einzelnen

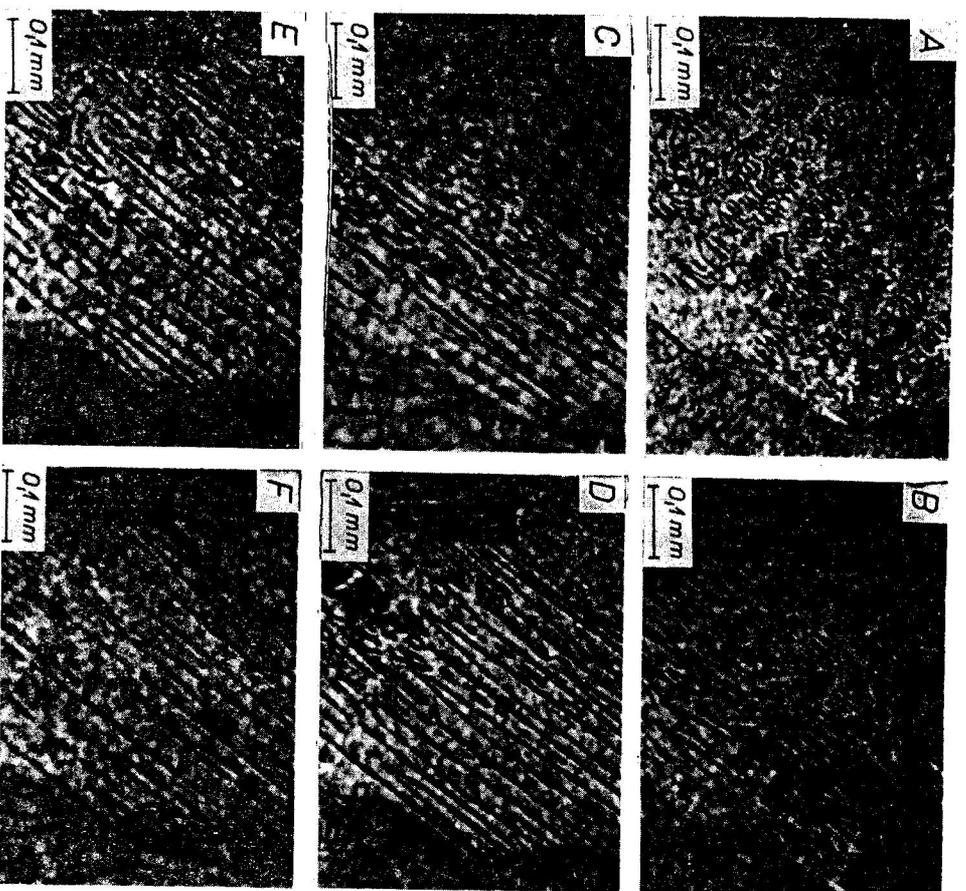


Abb. 3. Einfluß der allmählich steigenden äußeren mechanischen Zugspannung σ auf die Änderung der Bereichstruktur des ausgewählten Kornes. A: $\sigma = 0$; B: $\sigma = 4,45$ kp/mm²; C: $\sigma = 6,87$ kp/mm²; D: $\sigma = 12,50$ kp/mm²; E: $\sigma = 15,51$ kp/mm²; F: $\sigma = 18,80$ kp/mm².

Tropfen, bis eine Keilstruktur entsteht. W. Paxton und T. Nilan [18] zeigten, daß die Keilstruktur an der Oberfläche erscheint, die zu der Kristallebene des {110} Typs eine Neigung von $2-4^\circ$ hat. Die beobachtete allmähliche Änderung der Bereichstruktur hat einen solchen Charakter, als ob es durch das Anwachsen der Spannung zur Drehung des Vektors der spontanen Mag-

netisierung in die Richtung der wirkenden Zugspannung käme. Auf einen solchen Prozeß der Drehung haben die Autoren der Arbeiten [10, 11] hingewiesen. In der Arbeit [7] wurde das Verhalten der Tropfenstruktur unter dem Einfluß der elastischen Zugspannungen untersucht. Die Autoren dieser Arbeit zeigten, daß die Änderungen der Bereichstruktur in einem solchen Fall damit zusammenhängen, daß es bei der Wirkung der Spannung zur Vergrößerung der Ausmaße der Bereiche kommt, welche vorteilhaftig zur Richtung der Zugspannung orientiert sind, zum Nachteil der Bereiche, die energetisch nachteilig orientiert sind. Weiter zeigten diese Autoren auf Grund von bestimmten Modellvorstellungen, daß mit der an der Oberfläche beobachteten Tropfenstruktur, unmittelbar einige Schließungsbereiche im Inneren der Ferromagnetika verbunden sein können, die ihrerseits wieder für die gewählte Belastungsrichtung nachteilig orientiert sein können. Durch das Anwachsen der Zugspannung verkleinern sich dann allmählich die Schließungsbereiche und es kommt schließlich zum Verschwinden der Tropfenstruktur ohne Rücksicht darauf, daß damit eine gewisse Steigerung der magnetostatischen Energie verbunden ist.

In Abb. 4 sehen wir einen Prozeß der Änderung der Bereichstruktur, welcher mit der Entstehung der Ummagnetisierungskeime und ihrem Wachstum verbunden ist. Eine solche Änderung haben zum ersten Mal an Fe—Si L. Dijkstra und U. Martius [5] beobachtet. Wie ersichtlich, durch das Anwachsen der Zugspannung verschwindet allmählich die ursprüngliche Struktur, an den Korngrenzen (Abb. 4E) erscheinen die Keime der neuen Struktur und diese allmählich wachsen. Die oben erwähnten Autoren zeigten, daß auch in diesem Fall die Änderungen der Bereichstruktur damit verbunden sind, daß zu den leichtesten Magnetisierungsrichtungen jene kristallographischen Richtungen werden, welche am günstigsten zur äußeren Zugspannung orientiert sind. Es führt zur Entstehung von neuen, energetisch am günstigsten orientierten Bereichen.

In Abb. 5 ist eine oft beobachtete Änderung der Bereichstruktur, bei welcher es als Folge der wirkenden Zugspannung, zur Ausrichtung der ursprünglich gekrümmten 180° -igen Blochwände kommt, ersichtlich. Die Störung des geradlinigen Verlaufes der 180° -igen Grenzen im Ausgangszustand ($\sigma = 0$) hängt mit den folgenden Ursachen zusammen:

- a) eine beträchtliche Inhomogenität der Kristallstruktur hervorgerufen hauptsächlich durch die inhomogenen inneren Spannungen führt zur Störung der Parallelität der Spinen schon im Rahmen eines Bereiches [6],
- b) die inhomogenen inneren Spannungen können örtlich eine andere leichte Magnetisierungsrichtung bestimmen als die Magnetisierungsrichtung des Grundbereiches ist [6],
- c) Die Schließungsbereiche, die als Folge der verschiedenen Defekte in der

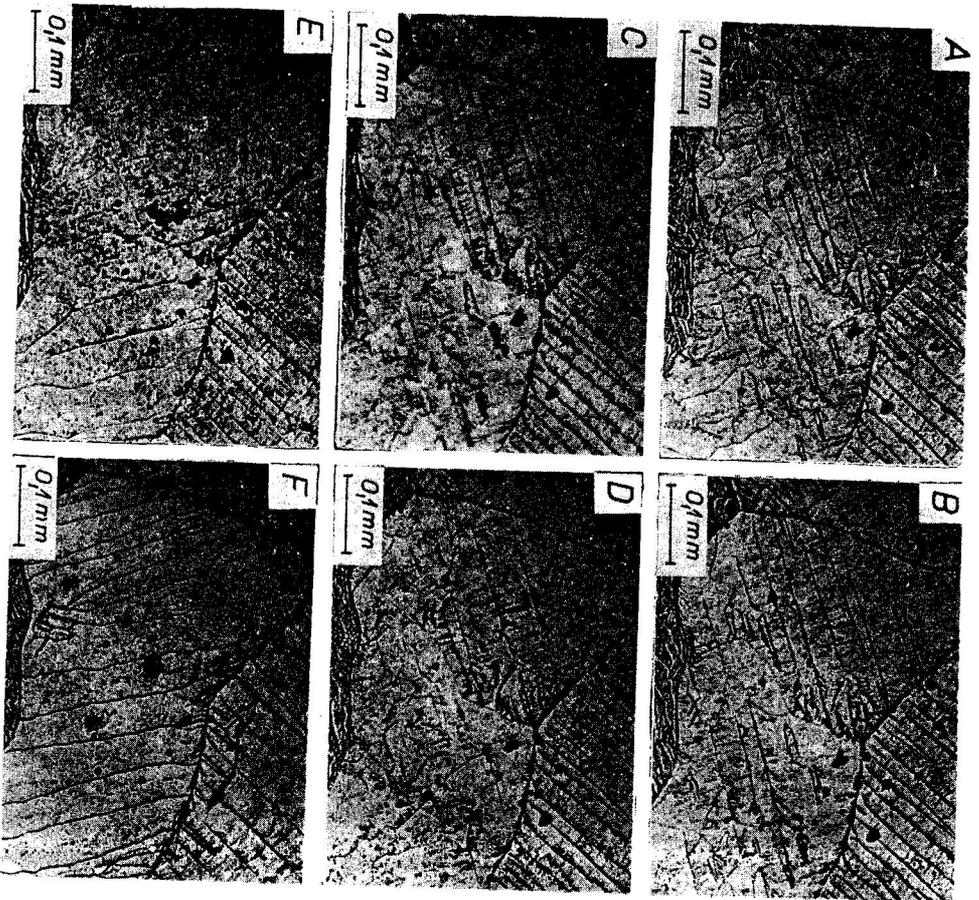


Abb. 4. Einfluß der allmählich steigenden äußeren mechanischen Zugspannung σ auf die Änderung der Bereichstruktur des ausgewählten Korns. A: $\sigma = 0$; B: $\sigma = 1,37$ kp/mm²; C: $\sigma = 2,73$ kp/mm²; D: $\sigma = 4,22$ kp/mm²; E: $\sigma = 5,96$ kp/mm²; F: $\sigma = 7,70$ kp/mm².

Nähe der 180°-igen Wände entstehen, können sich zu diesen Grenzen durch die Vermittlung der Bereiche, welche eine andere leichte Magnetisierungsrichtung als die Magnetisierungsrichtung der Grundbereiche ist und welche an der Oberfläche schwer sichtbar zu machen sind, anschließen [7]. Diese Erscheinung führt zur Deformation der 180°-igen Wände.

Die mechanischen Zugspannungen, welche die zur Richtung der Belastung

am nächsten liegenden kristallographischen Richtungen bevorzugen und welche die Parallelität der Spinen im Rahmen eines Bereiches erhöhen, führen zur Ausrichtung der 180°-igen Wände.

Die experimentellen Ergebnisse, erhalten bei der Untersuchung des Einflusses der elastischen Spannungen auf die Änderungen der Bereichstruktur des Eisens im remanenten Zustand erlauben zu konstatieren:

1. Die Form der beobachteten Strukturen im wahren remanenten Ausgangszustand bestätigt völlig die Vorstellungen über die Bereichstruktur des remanenten Zustandes, und zwar:

a) im remanenten Zustand existieren außer den Grundbereichen der spontanen Magnetisierung die Inversen- und Schließungsbereiche,

b) als Folge der Inhomogenität der inneren Spannungen und anderer Defekten entsteht eine Lokalablenkung der elementaren magnetischen Momente von den leichten Magnetisierungsrichtungen (s. die Störung des geradlinigen Verlaufes der 180°-igen Wände),

c) die inneren Restspannungen beeinflussen die Verteilung der spontanen Magnetisierungsvektoren (s. Abb. 3A).

2. Die beobachteten Änderungen der Bereichstruktur, hervorgerufen durch die Wirkung der elastischen Spannungen am Eisen, welches sich im wahren remanenten Zustand befindet, sind analogisch den Änderungen, die an den befindenden ein- und polykristallinen Fe-Si Proben beobachtet wurden, obwohl sich das Eisen mit einer mehr ausgeprägten Anisotropie der Magnetostriktion auszeichnet. Auf Grund der Beobachtungsergebnisse kann man annehmen, daß die durch die mechanischen Zugspannungen hervorgerufenen makroskopischen Magnetisierungsänderungen [4] im entscheidenden Maß dadurch bestimmt sind, daß durch die Wirkung der äußeren Spannung jene kristallographischen Richtungen zu den leichten Richtungen werden, die den kleinsten Winkel mit der Spannungsrichtung schließen. Dieser Prozeß kann so verlaufen, daß die schon existierenden günstig orientierten Bereiche wachsen oder es kommt zur Entstehung von neuen, energetisch günstig orientierten, Ummagnetisierungskernen, welche durch das Anwachsen der Spannung allmählich wachsen. Mit Rücksicht auf die energetische Gleichwertigkeit der gegeneinander entgegengesetzt orientierten Richtungen ist das Vorzeichen der resultierenden Magnetisierungsänderung bei diesem Prozeß von der relativen Verrückung der spontanen Magnetisierungsbereiche im Ausgangszustand abhängig.

3. An den Magnetisierungsänderungen des remanenten Zustandes bei der Wirkung der elastischen Spannungen beteiligen sich auch die Verschiebungen der 180°-igen Blochwände. Der Beitrag des gegebenen Kristallits kann dabei damit zusammenhängen, daß die Zugspannung gewisse kristallographische

Richtungen als Vorzugsrichtungen bestimmt aber auch damit, daß die verschiedenen Änderungen der Bereichsstruktur in den benachbarten Körnern die Änderungen der magnetischen Poldichte an der angehörigen Korngränze hervorrufen. Wie in der Arbeit [3] gezeigt wurde, beeinflußt dieser Faktor

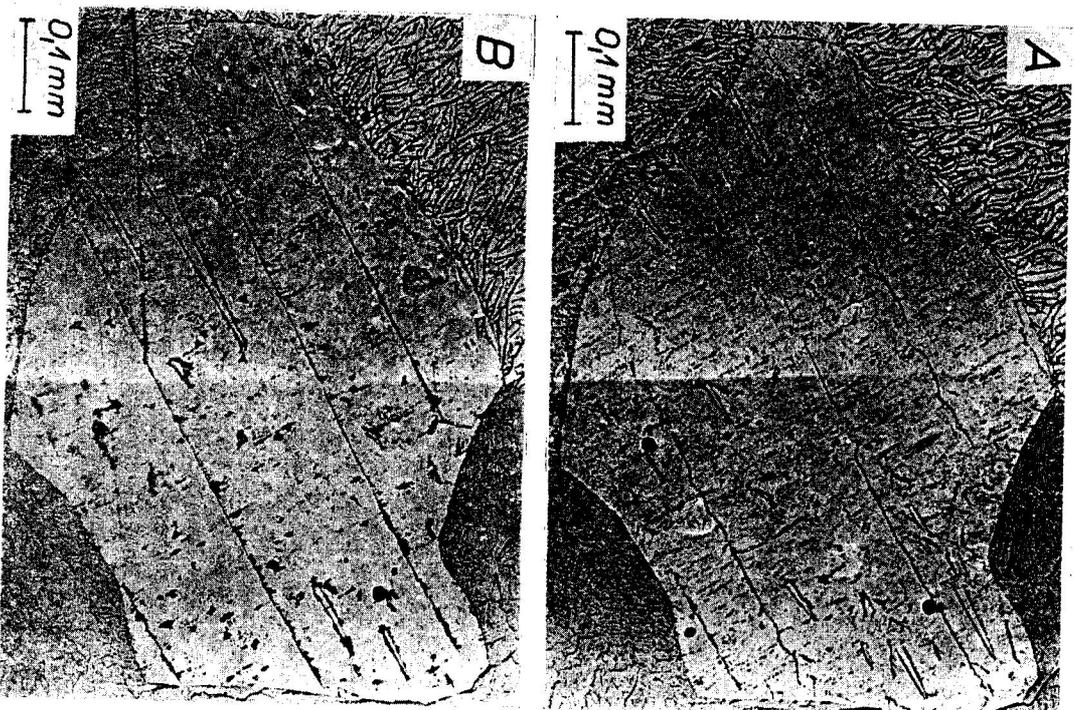


Abb. 5. Einfluß der allmählich steigenden äußeren mechanischen Zugspannung σ auf die Änderung der Bereichsstruktur des ausgewählten Kornes. A: $\sigma = 0$; B: $\sigma = 2,5 \text{ kp/mm}^2$.

maßgeblich das Verhalten der 180° -igen Wände der Grundbereiche im Kristallit. Da die Orientierung der Körner in einem polykristallinen Material zufällig ist (wenn sich das Material mit keiner Textur auszeichnet) und die einzelnen Körner sich befinden in verschiedener Umgebung, es ist nicht allein die Kornorientierung, die die Änderungen der Bereichsstruktur hervorrufen durch die Zugspannung, bestimmt.

4. Die Erhöhung der Spinparallelität im Rahmen eines Bereiches, welche durch die elastische Spannung hervorgerufen ist, beteiligt sich ebenfalls auf gewisse Art an den makroskopisch gemessenen Magnetisierungsänderungen.

5. Auf Grund der erhaltenen experimentellen Ergebnisse ist es unmöglich sich eindeutig zur Drehung des spontanen Magnetisierungsvektors, durch die Wirkung der Zugspannung hervorgerufen, zu äußern. An den Oberflächen der Proben wurde bis jetzt nur eine Krümmung der Blochwände, und nur an plastisch verformten Proben, beobachtet. Wie schon angeführt wurde, L. J. Dijkstra und U. M. Martius [17] bringen diese Krümmung mit dem Prozeß der Verformung des Kristallgitters im Zusammenhang.

Einziges bisher bekanntes experimentelles Material, welches die Vorstellung über die Drehung des spontanen Magnetisierungsvektors in die Richtung der wirkenden Zugspannung unterstützt, ist die beobachtete Änderung der Tropfenstruktur bei der allmählich wachsenden äußeren Zugspannung. Auf Grund von gewissen experimentellen Ergebnissen und der Bereichsstrukturmodelle, die in der Arbeit [16] angeführt sind, ist eine solche Vorstellung der Kritik unterworfen (s. [7]), obwohl die in der Arbeit [16] erhaltenen Ergebnisse nur solche ferromagnetischen Proben betreffen, bei welchen es angenommen werden kann, daß die an der Oberfläche beobachtete Bereichsstruktur durch die ganze Dicke der Probe übergeht. Da man bisher kein hinreichendes Belegmaterial besitzt, das ein überzeugendes Bild über die Änderung der tropfenförmigen Struktur bei der Wirkung der elastischen Spannung geben würde, kann man sich keiner der erwähnten Vorstellung eindeutig anlehnen. Diese Frage, wie es scheint, ist bisher offen. Die Grundursache, natürlich, steckt darin, daß die Prozesse im Inneren des Ferromagnetikums der experimentellen Beobachtung praktisch unzugänglich sind. Deswegen ist es nötig mit Modellvorstellungen, welche die reale Situation nur in sehr vereinfachten Fällen widerspiegeln können, zu arbeiten.

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

Den Herren Dr. H. Gengnagel und W. Schwab vom IMW Jena danke ich für die Hilfe bei der Vorbereitung der Proben.

SCHRIJFTUМ

- [1] Дунаев Ф. И., Изв. АН СССР, сер. физ., 23 (1961), 1502.
- [2] Дунаев Ф. И., Уч. зап. Урал. гос. ун-ва, сер. физ., 62 (1967), 31.
- [3] Киренский Л. В., Пиначенко В. А., Родичев А. М., ЖЕТФ 39 (1960), 1263.
- [4] Rotosky L., Fiz. čas. SAV 20 (1970), 96.
- [5] Dijkstra L. J., Martius C. M., Rev. Mod. Phys. 25 (1953), 146.
- [6] Зайкова В. А., Шур Я. С., ФММ 16 (1963), 614.
- [7] Драгошанский Ю. Н., Зайкова В. А., Шур Я. С., ФММ 25 (1968), 289.
- [8] Шур Я. С., Абельс В. Р., Зайкова В. А., Изв. АН СССР, сер. физ., 21 (1957), 1162.
- [9] Киренский Л. В., Дилгеров В. Д., Савченко М. К., Изв. АН СССР, сер. физ., 21 (1957), 1168.
- [10] Шур Я. С., Зайкова В. А., ФММ 6 (1958), 545.
- [11] Зайкова В. А., Шур Я. С., Уч. зап. АН СССР, сер. физ., 22 (1958), 1185.
- [12] Киренский Л. В., Савченко М. К., Родичев А. М., Изв. АН СССР, сер. физ., 22 (1958), 1181.
- [13] Киренский Л. В., Савченко М. К., Изв. высш. уч. зав., Физика (1958), № 1, 35, 39.
- [14] Киренский Л. В., Савченко М. К., Изв. высш. уч. зав., Физика (1958), № 3, 141.
- [15] Зайкова В. А., Шур Я. С., ФММ 21 (1966), 664.
- [16] Шур Я. С., Драгошанский Ю. Н., ФММ 22 (1966), 702.
- [17] Dijkstra L. J., Martius C. M., Phys. Rev. 85 (1952), 714.
- [18] Raxton W., Nilan T., Journ. Appl. Phys. 26 (1955), 994.

Бингенанген ам. 22. 5. 1970