

ÜBER DIE CHARAKTERISTISCHE ZERSTORUNG DES ALTERNDEN EISENS BEIM BOMBARDIEREN DURCH IONEN

Von

A. MASÍN

PHYSIKALISCHES LABORATORIUM DES FORSCHUNGSINSTITUTES FÜR VERKEHRSWESEN, RESORTANSTALT
DES VERKEHRSMINISTERIUMS, PRAG

und

V. HAVEL

FORSCHUNGSINSTITUT FÜR EISENHÜTTENWESEN, RESORTANSTALT DES MINISTERIUMS FÜR HÜTTEN-
WESEN UND ERZGRUBEN, PRAG

(Vorgelegt von Z. Gyulai. — Eingegangen: 19. IV. 1958)

In dem vorliegenden Artikel wird das Grundprinzip der charakteristischen Zerstörung des Eisens beim Bombardieren durch Ionen, welche in der Arbeit [1] beobachtet wurde, gelöst. Es wird gezeigt, dass es sich um Teile der Gleitlinien handelt, welche durch das Bombardieren mit Ionen sichtbar gemacht werden. Als Ursache ihrer Sichtbarmachung wird die Anwesenheit der C- und N-Atome in ihrer nächsten Nähe angenommen, ganz ähnlich wie im Falle der Sichtbarmachung der Versetzungen [2]. Diese Atome gelangten infolge des Alterns hierher. Zum Abschluss wird auf die Bedeutung der Zerstörung für das physikalische Studium der Kinetik der Alterungserscheinung nach dem Härten hingewiesen.

Einleitung

In der vorangehenden Arbeit des einen von uns, welche sich mit dem kathodischen Ätzen des Stahles befasst [1], wurde beobachtet, dass bei der Bombardierung des technisch reinen Eisens (Armco-Eisen) durch Ionen in einzelnen Körnern Gebilde in Form von Strecken entstehen, welche eine bestimmte Orientation haben. Bei starker Vergrößerung konnte man dabei feststellen, dass manche der Strecken die Form von kurzen, engen, kleinen Pfeilen haben, welche durch ihr Aussehen in bestimmtem Ausmasse an Nitride erinnern, so wie sie DIJKSTRA [3] und RADAVIDH und WERT [4] beschreiben. Da das technisch reine Eisen ein alterndes Material ist, entstand hier die Frage, ob es sich nicht um Nitride handelt, denn Stickstoff ist eines der Elemente, welche das Altern des Eisens verursachen. Die Muster wurden deshalb noch mit Ätzmitteln zur Feststellung von Nitriden — Fry's Ätzmittel Nr. 1 und 3, Ferrizyankalium und mit einem Gemisch von Pikral und Nital — geätzt, jedoch ohne Ergebnis. Das Studium mittels Elektronenbeugung bestätigt ebenfalls nicht, dass es sich im angeführten Fall um Nitride handelt.

Weil im optischen Mikroskop Vorsprünge und Mulden in der Oberfläche gleich erscheinen und deshalb auch hier die Möglichkeit besteht, dass es sich nicht um Präzipitate sondern um Mulden — Rinnen in der angeätzten Oberfläche handelt, wurde zum Schluss in [1], ohne dass ein Beweis erbracht

wurde und ohne weiteres Forschen, die Vermutung ausgesprochen, dass es sich in der angeätzten Fläche um Rinnen handelt. Weiter wurde dann diese Erscheinung nicht mehr studiert. Erst die vorliegende Arbeit hat das Studium des Grundprinzipes dieser Erscheinung zum Gegenstand.

Experimenteller Teil

a) *Experimentelles Material und Arbeitsvorgang*

Das verwandte Eisen war vom Typ Armco mit folgender chemischer Zusammensetzung: 0,03% C; 0,007% S; 0,012% P; 0,11% Mn; 0,01% Si; 0,15% Cu; 0,05% Ni; 0,006% N.

Zur Feststellung, ob die beschriebene Erscheinung mit dem Altern zusammenhängt, wurde ausser dem oben angeführten Eisen zu den Experimenten noch ein mit Aluminium beruhigtes Eisen verwendet, welches nicht altert. Dieses Eisen hatte folgende chemische Zusammensetzung: 0,04% C; 0,2% Mn; 0,17% Si; 0,07% Cu; 0,012% Ni; 0,015% Al; 0,004% N, die übrigen Elemente in Spuren.

Bei beiden Materialien wurde zum Hervorrufen der Alterung die gleiche Wärmebearbeitung durchgeführt, und zwar wurde sie bei beiden Materialien gleichzeitig durchgeführt. Ausserdem wurde ein Teil der Muster noch nach der Härtung durch Druck deformiert und ebenfalls der Alterung überlassen (siehe Tabelle I). Die einzelnen Wärmebearbeitungen sind in der Tabelle I enthalten.

Die verwandten Muster hatten die Form von Zylindern mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 6 mm. Nach der Härtung wurden sie an einer ihrer Stirnseiten metallographisch geschliffen und poliert und diese Oberfläche wurde dann durch Ionen bombardiert.

Die Bombardierung durch Ionen wurde mit einem in der Arbeit [5] ausführlich beschriebenen Apparat, welcher eine Analogie des in Arbeit [1] und auch in der Arbeit [2] verwendeten Apparates ist, durchgeführt. Es wurde mit Gleichstrom von 1700—1900 V und bei einer Intensität des Stromes von 3 mA gearbeitet. Die Ätzzeit bewegte sich zwischen 50—80 min. Längere Zeit als 80 min. äusserte sich bloss in der Ausgeprägtheit der Spuren, die Grösse, Form und Anordnung änderten sich dabei nicht. Die Muster wurden während der Bombardierung durch zirkulierendes Wasser gekühlt.

Zur Feststellung des Mechanismus der Zerstörung bei der Bombardierung durch Ionen von reinem Ferrit und Martensit, der im Grunde genommen eine übersättigte feste Lösung des Kohlenstoffes, eventuell Stickstoffes, im Alfa-Eisen (Ferrit) ist und deshalb also dem gehärteten technisch reinen Eisen nahesteht, wurde die Bombardierung durch Ionen auch an Mustern von einer Eisenlegierung mit 0,4% C durchgeführt. Die Muster von gleicher

Form wie im vorangehenden Fall wurden auf eine Temperatur von 950° C erwärmt, von dieser Wärme wurden sie langsam in einem Ofen (während einer Stunde) auf die Temperatur von 750° C abgekühlt und von dieser Temperatur in Wasser gehärtet. Der Rückgang der Temperatur von 950° C auf 750° C vor dem Härten wurde deshalb gewählt, um damit das Ausscheiden von freiem, kohlenstofflosem Ferrit zu erreichen. Ein Teil der Muster wurde nach dem Härten noch auf 600° C in 1 Stunde angelassen. Sämtliche Wärmebearbeitungen wurden in dem Vakuumofen eines Laboratoriums durchgeführt.

Zum Studium der Grundfrage, ob es sich im erwähnten Falle um Erhöhungen oder Vertiefungen — Rinnen — in der angeätzten Oberfläche handelt, wurde ein Elektronenmikroskop und die Methode des direkten Abdruckes benützt*). Auf dem direkten Abdruck bekommen wir nämlich bei dieser Methode ein Reliefbild der Oberfläche, wo die Rinnen in der angeätzten Oberfläche den Vorsprüngen auf dem Abdruck und umgekehrt die Vertiefungen auf dem Abdruck wieder den Vorsprüngen auf der untersuchten Oberfläche entsprechen, sodass sich dann mit Hilfe von Schattierung genau feststellen lässt, ob es sich bei dem angeätzten Muster um Vertiefungen oder Vorsprünge handelt. Es wurden mit Chrom schattierte Kolloidabdrücke verwendet. Das angewandte Elektronenmikroskop war ein Tesla-Erzeugnis.

b) *Die experimentellen Ergebnisse*

Das Aussehen der charakteristischen Zerstörung in einzelnen Körnern so wie sie unter dem Mikroskop erschien, ist auf den Bildern 1—5 sichtbar. Einzelne Spuren sind entweder parallel (Abb. 1) oder bilden gemeinsam verschiedene Winkel, aber kreuzen sich nicht (Abb. 2) oder bilden verschiedene Gebiete von gleich orientierten Spuren in denselben einzelnen Körnern (Abb. 3). Wie aus der Detailansicht der einzelnen Spuren hervorgeht, sind beide Enden in Pfeile zugespitzt und das Gesamtaussehen ähnelt eher einer Zigarre als einem Plättchen, wie aus der Abb. 4 ersichtlich ist.

Die beschriebene Zerstörung kommt nur in zwei Fällen vor: Wenn die Muster nach dem Härten 24 Stunden hindurch auf der Temperatur von 20° C belassen und der Bombardierung durch Ionen unterzogen wurden, oder wenn sie nach einem 24-stündigen Abliegen bei 20° C auf 250° C für 15 Minuten erwärmt und dann bombardiert wurden. In anderen Fällen wurde diese charakteristische Zerstörung nicht beobachtet, und zwar nicht einmal in dem Falle, wenn das Muster bei 20° C 1000 Stunden oder 3

* Die Arbeiten mit dem Elektronenmikroskop hat Dr. J. JEŽEK vom Forschungsinstitut für Material und Technologie in Prag durchgeführt, und es ist uns eine angenehme Pflicht, ihm für diese Arbeit zu danken.

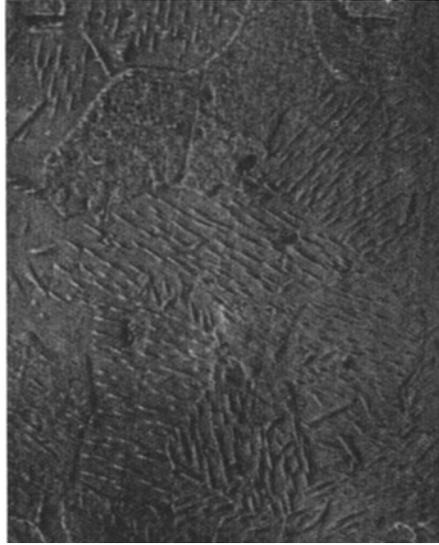


Fig. 1. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×

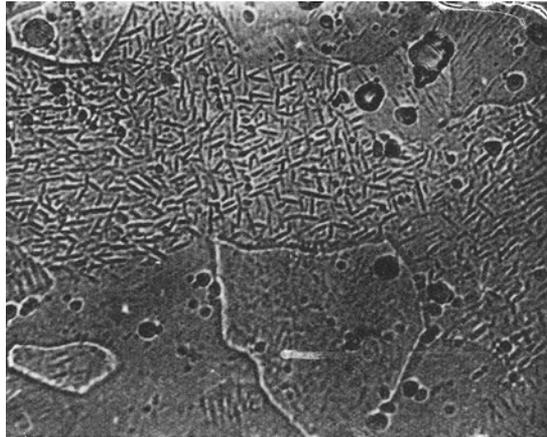


Fig. 2. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×

Jahre alterte, oder wenn die Muster nach einer Verformung gealtert wurden, und zwar sowohl natürlich bei 20° C als auch künstlich durch Anwärmung auf 50° C oder 250° C nach einem 24-stündigen Abliegen bei 20° C, oder nach einem 1000-stündigen Abliegen bei 20° C.

Bei Mustern von nichtalterndem Eisen wurde diese charakteristische Zerstörung in keinem Fall beobachtet. Durch das Bombardieren durch Ionen kamen bei allen Alternativen der Wärmebearbeitung laut Tabelle I bloss



Fig. 3. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×

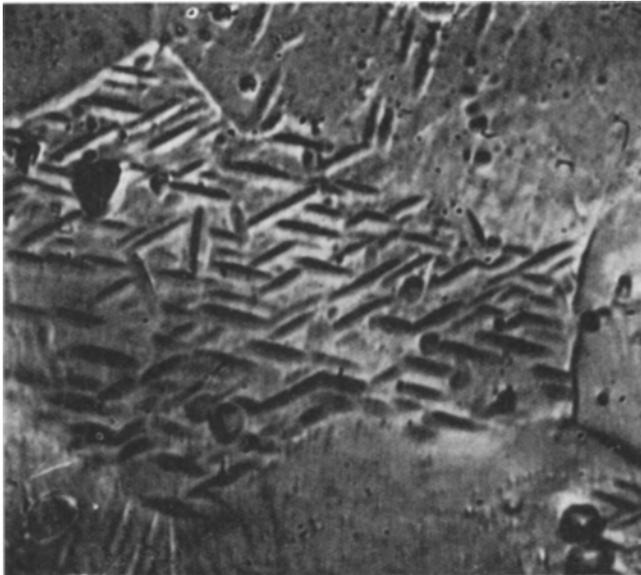


Fig. 4. ursprüngl. Vergrößerung 1300 ×

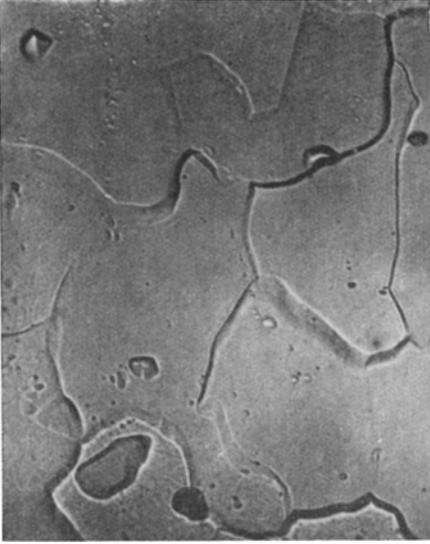


Fig. 5. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×



Fig. 6. ursprüngl. Vergrößerung 1300 ×



Fig. 7. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×



Fig. 8. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×

Korngrenzen ohne jedwedes einzelnes Detail innerhalb der Körner zum Vorschein. Im Ganzen ist dem geglühten Muster (Abb. 5) von nichtalterndem Eisen gegenüber die Oberfläche des angeätzten Musters grob und im Höhenrelief bedeutend durchgezeichnet (Abb. 6).

Auf den Mustern von alterndem wie auch von nichtalterndem Material, das nach dem Härten zusammengedrückt wurde, kamen auf der polierten Fläche Gleitlinien zum Vorschein (Abb. 7). Das Bombardieren durch Ionen beeinflusste bloss ihren Kontrast; die Schärfe der Linien verminderte sich sodass die Gesamtansicht dadurch unklar — verschwommen — schien, wie aus der Abb. 8 zu ersehen ist.

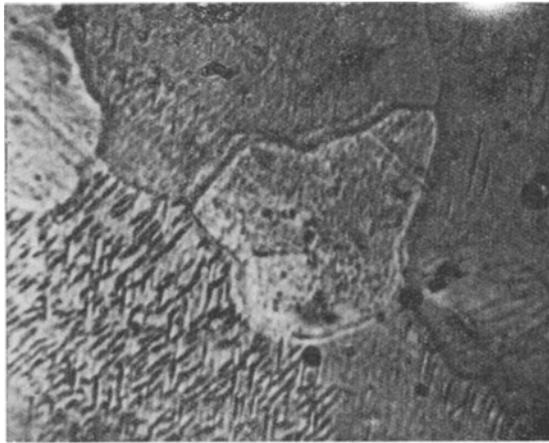


Fig. 9. ursprüngl. Vergrößerung 680 ×

Die Gleitlinien bei den nichtalternden Materialien verhielten sich beim Ätzen gleich denen bei den alternden, bei ihnen kam es ebenfalls zur Verminderung des Kontrasts und dadurch auch zur Verminderung der Schärfe des ganzen Bildes.

In dem Fall, wo ein Muster zusammengedrückt wurde, auf dem bereits durch Bombardieren durch Ionen Spuren der Zerstörung hervorgerufen waren (Alternative 9, Tabelle I), erschienen an der Oberfläche ausser den Spuren der Zerstörung noch neue Spuren, welche schief zu ihnen lagen und zwischen den einzelnen Spuren verliefen, sodass sie einen stufenartigen Charakter des Bildes hervorriefen (Abb. 9).

Muster aus der Eisenlegierung mit 0,4% C hatten nach dem Härten ein martensitisches Gefüge mit Inseln von ausgeschiedenem Ferrit. Das Aussehen dieses Gefüges nach dem Anätzen durch Nital ist aus der Abb. 10 ersichtlich. Abb. 11 entspricht demselben Muster nach dem Bombardieren durch Ionen. Wie zu ersehen ist, ätzt sich der Martensit beim Bombardieren

Tabelle I

Die Bearbeitung der Muster zum Zweck des natürlichen und künstlichen Alterns

Nr. der Operation	Bearbeitung*
1	920° C/20 Minuten, im Ofen abgekühlt
2	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser und 24 Stunden Abliegen bei 20° C
3	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser und 1000 Stunden Abliegen bei 20° C
4	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser, 24 Stunden Abliegen bei 20° C und 50° C/3 Stunden
5	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser, 24 Stunden Abliegen bei 20° C und 250 C/15 Minuten
6	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser und deformiert
7	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser, deformiert, 24 Stunden Abliegen bei 20° C und 50° C/3 Stunden
8	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser, deformiert, 24 Stunden Abliegen bei 20° C und 250° C/15 Minuten
9	720° C/1 Stunde/gehärtet in Wasser, deformiert, 1000 Stunden Abliegen bei 20° C und a) 250° C/15 Minuten b) 450° C/15 Minuten.
10	Alternative 2 und nach der Bombardierung durch Ionen noch verformt.

* Bezogen auf den Augenblick der Bombardierung durch Ionen.

durch Ionen sehr intensiv und die ganze Fläche weist im Höhenrelief ein ausdrucksvolles Durchzeichnen der einzelnen martensitischen Nadeln auf. Durch das Anlassen auf die Temperatur von 600° C wandelte sich der Martensit in Sorbit um, vereinzelte Inseln von reinem Ferrit blieben unterdessen erhalten. Beim Bombardieren durch Ionen kamen diese Ferrit-Inseln klar zum Vorschein, indem sie ausdrucksvoll aus dem sorbitischen Gefüge hervortraten. Einzelne Alfa-Körner des Sorbits weisen eine Oberflächenzerstörung, ähnlich der Zerschlagung in kleine Teile, auf, wie aus der Abb. 12 zu ersehen ist. Die Durchzeichnung des Reliefs der einzelnen Alfa-Körner bei Sorbit, so wie sie im Falle von Martensit beobachtet wurde, existiert bei diesen Körnern nicht mehr.

Die Ergebnisse mit dem Elektronenmikroskop sind auf den Abbildungen 13 und 14 enthalten. Einzelne Spuren der Zerstörung erscheinen auf dem schattierten Kolloidabdruck als Vorsprünge, welche in ihrem Aussehen mit feinen Gleitlinien oder Zwillingelinien (Neumann-Streifen) identisch sind. Pfeile, die in [1] beschrieben wurden (siehe Abb. 5 der zitierten Arbeit), wurden bloss sehr vereinzelt beobachtet.

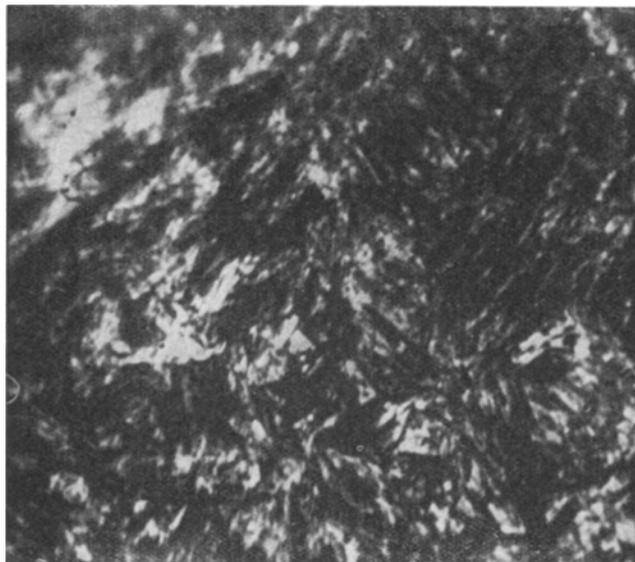


Fig. 10. ursprüngl. Vergrößerung 1300 ×

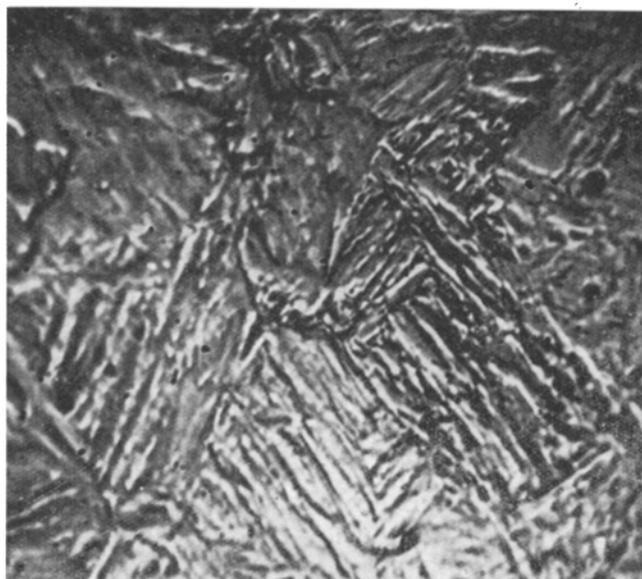


Fig. 11. ursprüngl. Vergrößerung 1300 ×



Fig. 12. ursprüngl. Vergrößerung 1300 ×



Fig. 13.
ursprüngl. Vergrößerung 5000 ×

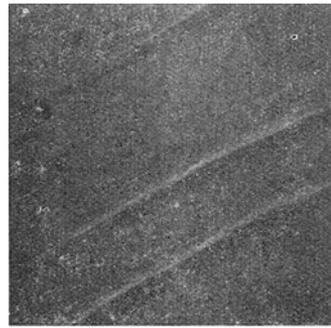


Fig. 14.
ursprüngl. Vergrößerung 5000 ×

Erörterung der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen des Studiums mittels des Elektronenmikroskops geht also eindeutig hervor, dass die einzelnen Spuren der Zerstörung Vertiefungen sind — Rinnen in der angeätzten Oberfläche, welche entweder den Gleitlinien oder den Zwillingslinien entsprechen. Wie BARRETT [6] anführt, unterscheiden sich die Zwillingslinien und Gleitlinien untereinander durch zwei charakteristische Merkmale :

1. Die Zwillingslinien sind nach dem Polieren und Anätzen sichtbar, die Gleitlinien hingegen nicht.

2. Die Zwillingslinien haben eine bestimmte Endbreite und bei stärkerer Vergrößerung kann man bei jeder Linie zwei Grenzen sehen, die Gleitlinien sind dagegen immer nur als enge Linien sichtbar.

Es handelt sich also im gegebenen Fall — mit Hinsicht darauf, dass die Sichtbarmachung bloss in manchen Fällen der Wärmebearbeitung auftritt, weiterhin mit Hinsicht auf das Nichtanätzen durch chemische Reagenzien und auf die Einfachheit des Aussehens, das sich mit der Dauer der Bombardierung durch Ionen nicht ändert und bloss die Tiefe des Ausätzens wächst, um Teile der Gleitlinien.

Die Tatsache, dass das Sichtbarmachen eines Teiles der Gleitlinien nach der Bombardierung durch Ionen bloss beim alternden Eisen und bloss in Fällen, wo die Muster nach dem Härten 24 Stunden bei 20° C liegen blieben oder nach diesem Abliegen noch auf 250° C erwärmt wurden (künstliches Altern), vorkommt, beweist dann, dass ein bestimmter, wenn auch nicht allgemeiner, Zusammenhang zwischen der beobachteten Zerstörung und dem Altern besteht.

Dieser Zusammenhang zwischen dem Sichtbarmachen der Gleitlinien und dem Altern ist dann die Grundlage zur Klärung der eigentlichen Ursache, die zur Zerstörung und dadurch auch zu ihrer Sichtbarmachung führt.

Beim Altern kommt es, wie bekannt [7], zu Diffusionsverschiebungen von Kohlenstoff- und Stickstoffatomen, zu den Versetzungen oder anderen kristallischen Störungen und also auch zu den Gleitlinien. Die Anwesenheit dieser Verunreinigungen bei den Gleitlinien kann man dann für die Ursache ihrer Sichtbarmachung halten, ähnlich wie im Falle der Sichtbarmachung von Versetzungen [2]. Von den Gleitlinien werden auch nur jene Teile sichtbar gemacht, in denen Atome der Verunreinigungen anwesend sind, die anderen Teile dagegen, wo sich diese Atome nicht befinden, werden nicht sichtbar gemacht. Ähnlich werden bei Mustern aus nichtalterndem Eisen, bei denen es nicht zur Verschiebung der Atome der Verunreinigungen (die hier durch Aluminium gebunden werden) kommt, die Gleitlinien nicht einmal nach der Bombardierung durch Ionen sichtbar gemacht.

Im Einklang mit der oben angeführten Schlussfolgerung und teilweise ihre indirekte Bestätigung ist auch die geringfügige Zerstörung der kleinen Inseln des einzelnen Ferrits durch das Bombardieren durch Ionen in der Legierung mit 0,4% C im Vergleich mit den martensitischen Nadeln und den Alfa-Körnern des angelassenen Martensits (Sorbit), die eine merkbare Zerstörung aufwiesen. Im Ferrit, der während des Härtens ausgeschieden wird, ist nämlich Kohlenstoff nicht anwesend und nach dem Obenangeführten sind hier auch keine geeigneten Bedingungen für die Zerstörung vorhanden. Im Martensit und in Alfa-Körnern des angelassenen Martensits (beim An-

lassen auf 600° C) dagegen ist Kohlenstoff in der festen Lösung aufgelöst und deswegen werden diese — im Einklang mit dem oben Angeführten — beim Bombardieren durch Ionen stark zerstört.

Was den Zustand der Atome der Verunreinigungen, der zur Zerstörung führt, betrifft, sind unsere derzeitigen Kenntnisse der physikalischen Seite des Alterns von interstitiellen Legierungen zu ungenügend, als dass es möglich wäre zu bestimmen, wie eigentlich ihre Anordnung in der Umgebung der Gleitlinien ist. Die blosse Existenz der Zerstörung in speziellen Fällen, welche oben angeführt wurden, beweist aber klar, dass der Zustand nach dem 24-stündigen Abliegen bei 20° C nach der Härtung von dem Zustand verschieden ist, der beim Altern bei dieser Temperatur während 1000 Stunden oder 3 Jahren entsteht, und dass vom Standpunkt der Zerstörung durch Bombardierung durch Ionen dieser Zustand dieselben Folgen hat wie der Zustand, der durch das Erwärmen eines Musters auf 250° C entsteht, welches vorher nach dem Härten 24 Stunden hindurch bei 20° C gealtert wurde. Die Ergebnisse zeugen ebenfalls dafür, dass die Gleitlinien im gehärteten Eisen vom Standpunkt des Alterns für das stabile Festhalten der Atome der Verunreinigungen energetisch weniger vorteilhaft sind als die Störungen an den Grenzen der Körner und Subkörner, sodass sich fremde Atome an ihnen nur vorübergehend festhalten können und zu ihrem Sichtbarmachen kommt es infolgedessen nur in besonderen Fällen.

Schlussfolgerung

Der Artikel hat die Klärung des Grundprinzips der charakteristischen Zerstörung von Eisen beim Bombardieren durch Ionen zum Gegenstand, welche in der Arbeit [1] beobachtet wurde. Mit Hilfe eines Elektronenmikroskopes wurde bewiesen, dass es sich um Teile von Gleitlinien handelt, welche durch das Bombardieren durch Ionen sichtbar gemacht wurden. Das Sichtbarmachen ist in direktem Zusammenhang mit dem Altern des Eisens, und es wird deshalb angenommen, dass sein Entstehen durch die Anwesenheit der Kohlenstoff- und Stickstoffatome, die bei diesen Gleitlinien anwesend sind, bedingt wird, ähnlich wie im Falle der Versetzungen [2].

Die Existenz der Gleitlinien im gehärteten Eisen wurde bei der Klärung des Mechanismus der Kinetik des Alterns nach dem Härten hier nicht in Erwägung gezogen. Es ist wahrscheinlich, dass das Einbeziehen ihrer Existenz in die Kinetik des Alterns in bedeutendem Masse zur Klärung der hier verlaufenden mikrophysikalischen Vorgänge beitragen kann, insbesondere dann in der ersten Periode des Alterns, wo es zu einer markanten Steigerung der Härte [7] kommt und gleichzeitig auch zu merkbaren Änderungen in der Umgebung der Linien, wofür auch ihre Sichtbarmachung beim Bombardieren

durch Ionen zeugt, im Gegensatz zu der weiteren Periode des Alterns, wo ein Herabsinken der Härte auftritt und die Linien nicht sichtbar gemacht werden. Zieht man den Zusammenhang der plastischen Verformung, welche das Messen der Härte begleitet, mit den Gleitlinien einerseits und dem Blockieren der Versetzungsbewegungen durch Atome der Verunreinigungen andererseits in Betracht, so scheint die Identität des Sichtbarmachens der Gleitlinien nach einem 24-stündigen Abliegen bei 20° mit den Härteänderungen nicht bloss zufällig zu sein.

LITERATUR

1. V. HAVEL und D. TLUSTÁ, *Hutnické listy*, **10**, 96, 1955.
2. A. MAŠÍN und V. HAVEL, *Acta Phys. Hung.*, **9**, 471, 1959.
3. L. J. DIJKSTRA, *Journal of Metals*, **1**, 252, 1949.
4. J. RADAČIČ und CH. WERT, *Journ. Appl. Phys.*, **22**, 367, 1951.
5. V. HAVEL und A. MAŠÍN, *Čs. čas. fys.*, **9**, 32, 1959.
6. CH. BARRET, *Structure of metals*, S. 309. Mc Graw-Hill, N. Y., 1943.
7. A. H. COTTRELL, *Dislocations and plastic flow in crystals*, Oxford University Press, 1953.

ХАРАКТЕРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СТАРЕЮЩЕГО ЖЕЛЕЗА ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

А. МАШИН и В. ГАВЕЛ

Резюме

В настоящей работе приводится решение природы характерного разрушения стареющего железа в виде коротких ориентированных отрезков или стрелок [1]. Был определен вид и упорядочение отдельных следов (рис. 1—5) и зависимость между их возникновением и термической обработкой или искусственным старением. Для устранения влияния старения ионная бомбардировка проводилась одновременно и на образцах одинаково обработанных из нестареющего железа. На образце из такого железа характерное разрушение ни в одном случае не было обнаружено. С помощью электронного микроскопа было доказано (рис. 13, 14), что здесь мы имеем дело с частью линий скольжения, выявленных путем ионной бомбардировки. Причиной выявления можно считать наличие атомов углерода и азота в их непосредственной окрестности, проникших туда в результате старения точно так же, как это имеет место в случае выявления дислокаций [2]. Обращается внимание на значение линий скольжения в закаленном железе при физическом изучении кинетики явления старения после закалки.