

X線应力測定特集号

材 料

第12卷 第123號

1963

1-823/839

71.221
839

第12巻第123号

材 料

目 次

X線応力測定特集号

巻 頭 言

再びX線応力測定に関する特集号の刊行にあたって.....小 島 公 平 829

資 料

写真式X線応力測定装置.....永見初太郎 830
岸 山 盛 太 郎
本 並 豊 太 郎
X線による残留応力測定(写真法)に用いるX線フィルム
の検討.....榎 沢 久 寛 835
堀 藤 紀 久 雄

論 文

鉄鋼材料の塑性変形による残留応力に及ぼす異方性の影響.....K. Kolb 841
E. Macherauch
($\alpha + \beta$) 黄銅引張変形試料のX線の残留応力測定.....辛 島 誠 一 治 848
島 谷 幸 柳 肇
X線による金属材料の残留応力に関する研究(各種炭素鋼に引張塑性変形を与えた場合の残留応力について).....平 吉 修 二 夫 852
岡 靖 夫
軟鋼板の残留応力のX線の測定.....田 丸 武 好 平 861
小 島 公 修 二 夫
X線による応力測定法に関する研究(炭素鋼の弾性係数のX線の測定について).....有 間 淳 助 865
城 山 魁 一 義
X線応力測定に関する新方式の提案.....蒲 地 一 義 871
円筒鋼材の残留応力の測定について(Sachs' 法で求められた残留応力分布とX線応力測定法で求められた表面応力の値との比較).....下 田 秀 夫 875
荒 木 田 豊
X線残留応力測定に及ぼす試料表面の影響.....本 山 盛 太 郎 882
榎 並 豊 太 郎
堀 沢 久 寛
衝撃繰返しによる残留応力の変化のX線による研究.....村 上 裕 則 889
川 辺 敏 弘
佐 々 木
X線による金属材料の疲労破壊に関する研究(切欠底に及ぼす残留応力変化について).....平 林 修 二 夫 894
建 吉
鉄鋼材料の塑性変形並びに破壊に関するX線的研究.....蒲 地 一 義 900

外国文献紹介.....834, 840, 860, 881, 888

会 報.....912

3/c566/17

Vol. 12, No. 123
Dec. 1963

JOURNAL OF THE SOCIETY OF MATERIALS SCIENCE, JAPAN

— CONTENTS —

Special Issue on X-Ray Stress Measurement

From the Authority's Pen

Preface on the Special Issue about the X-Ray Stress
Measurement by K. Kojima 829

Technical Notes

The X-Ray Stress Camera.... by K. Kishi and H. Nagami 830
A Review of X-Ray Films for the Measurement of X-Ray
Residual Stresses (Photographical Method)
.... by M. Motoyama, T. Enami, H. Horizawa and K. Kato 835

Research Papers

Der Heterogenitätseinfluß auf die Verformungseigen-
spannungen von Eisenwerkstoffen
..... von K. Kolb und E. Macherauch 841

The X-Ray Study of Residual Stresses in Extended
($\alpha + \beta$)-Brass Specimens..... by S. Karashima,
K. Shimatani and H. Hitotsuyanagi 848

X-Ray Investigation on the Residual Stress of Metallic
Materials
(On the Residual Stress of Stretched Carbon Steel)
..... by S. Taira and Y. Yoshioka 852

Determination of Residual Stress of Low Carbon Steel
Plates by X-Rays..... by T. Tamaru and K. Kojima 861

The X-Ray Investigation of Stress Measurement
(On the Measurement of Elastic Constants by X-Ray
Method for Several Carbon Steels)
..... by S. Taira, J. Arima and T. Shiroyama 865

A New Method of X-Ray Stress Measurement
..... by K. Kamachi 871

On the Measurement of Residual Stress of Cylindrical
Steel
(Comparison between the Residual Stress Distribution
Obtained by Sachs' Method and the Surface Stress
Obtained by X-Ray Method)
..... by H. Shimoda and Y. Arakida 875

The Influence of the Specimen Surface on the
Measurement of Residual Stress by X-Ray
.... by M. Motoyama, T. Enami, H. Horizawa and K. Kato 882

X-Ray Investigation on the Change in Residual Stress
due to Repeated Impact..... by Y. Murakami,
T. Kawabe and H. Sasaki 889

X-Ray Investigation on the Fatigue Fracture of Notched
Steel Specimens
(On the Changes in Residual Stress at the Notch Root)
..... by S. Taira and K. Hayashi 894

The X-Ray Study of Plastic Deformation and the
Fracture of Iron Material..... by K. Kamachi 900

Current Reviews 834, 840, 860, 881, 888

News from the Office 912

Published by
THE SOCIETY
OF
MATERIALS SCIENCE,
JAPAN

1 Yoshida Izumidono-cho
Sakyo-ku
Kyoto, JAPAN

巻頭言

再び X 線応力測定に関する特集号の刊行にあたって

日本材料学会 X 線応力
測定部門委員会委員長 小 島 公 平

再び日本材料学会の機関紙“材料”12月号が“X線応力測定”に関する特集号として、発行される運びとなったことは、私として喜びこれにすぎないものはありません。

同学会に“X線応力測定部門委員会”が設けられてすでに2年になります。この間、この問題に取り組んで同好の士と共に絶やまない努力を続けて来ました。昨年11月第1回の特集号を出してから後も委員会はもち論、講演会、シンポジウムとたびたび討論の場を作りましたが、今回の特集号はそのシンポジウムの際の研究発表を中心に編集されたものであります。多数の貴重な結果の発表に加えて今回も、

Institut für Metallphysik Am Max Planck-Institut für Metallforschung の Dr. E. Macherauch から Der Heterogenitätseinfluß auf die verformungseigenen Spannungen von Eisenwerkstoffen なる論文の投稿を得たことは、同研究所がこの委員会に不変の関心を持つ結果であることを思い喜びにたえません。同好の士の研究結果と相俟ってこの方面の研究に大きく寄与するであろうことを信じて疑いません。この委員会では、大体1年間の研究成果をまとめて発表し、これを特集号とする方針をたてております。従って、これは読者各位がご覧なさるに際し日本の現状、世界の現状を1目りょう然に把握していただくに便だと思えるからであります。

この方法を現場に如何に応用すべきかの問題については、委員各位の研究により着々その地歩をかためつつあります。今回それを促進する意味において、過日の委員会で“X線応力測定技術標準化分科会”の設置が決まりました。この方法を現場に適応するに際し、あるいはまたこの方法によって得た数値の取り扱いなどに関する問題のすみやかに標準化し、現場の方達へ大きな貢献をするため、この委員会の活動に期待すること大なるものがあります。結晶性材料の応力を殊

に残留応力を含めた内部応力を非破壊的に計る唯一の方法として、この方法の占める立場は非常に重要であります。このように、この測定のやり方は従来の応力測定と根本的に異なる所があり、この方法でなければならないと考えられる場合、あるいはまたこの方法が非常に便利であると思われる場合が相当数多く生産の面に表われて来るだけに、一日も早くこの応用研究の完成を期したいものです。

応力を受けた状態にある結晶が如何なるひずみ方をしているかという問題は、そのひずみ方を測って応力を出そうとするこの方法にとり根本的な問題でありながら、不明の点が可成り沢山あります。それだけ将来の研究にまたねばならない部分が多いわけです。こうした不可解の事共が多数の皆さんの真摯な努力により、一つ一つ明らかにされ、その基礎が確立されたときこの方法の持つ応用面の広さは実に測り知れないものがありましょう。

前記 Max Planck Institut の Dr. Glocker が、この方法の可能性を提案されて以来約30年の年日が流れました。その間、ドイツ並びにわが国を中心に研究が進められ今日に至っております。その間、比較的少数の人々が山積する問題に直面し、たどたどしい研究をすすめて来たわけですが、今日ドイツと共に世界の研究をリードし、一つの学会がこの問題のみを取り上げて毎年その特集号を出すというわが国の現状はまことに驚くべきものがあり、今昔の感に堪えません。

昨年に引き続き、今回発行される第2回特集号がすでにこの方面の仕事に従事しておられる人々だけのためでなく、さらに一人でも多くの同好の士をうることに役立つであろうことを思い、大きな喜びを感じます。こうした特集号が機縁となって、さらに多くの同好の士を得、みんなの協力の元に活発な研究が促進され、わが国を中心としてこの研究の発展をみるであろうことを確信する次第です。

写真式X線応力測定装置*

永見初太郎** 岸 敬**

The X-Ray Stress Camera

by

Kei KISHI and Hatsutarō NAGAMI

(Tokyo-Shibaura Electric Co. Ltd., Tamagawa Works, Tokyo)

In this paper is described the X-ray stress camera specially designed for stress measurement by a photographic method. This apparatus may be used by either grocker's method, Schaa's Method or $\sin^2\psi$ method.

We tried to record a diffraction pattern in a short time's exposure, using a specially designed short anode X-ray tube, with reduced distance between the object and the focus.

The microphotometer, the film puncher and the electro polisher are also developed in consequence.

(Received Sep. 16, 1963)

1. 緒 言

X線によって、試料に存在する応力を測定する技術は近年、沢山の研究者の努力によって著しく発展をみるようになり、この技術に適応する装置も多くの人々から要求されるようになった。

今回報告する装置は、この要求を満足せんとして開発されたもので、X線フィルムによって試料よりの回折X線を記録し、その直径をマイクロフォトメータによって測定するものである。

2. 構 成

下記の諸部分より構成される。

1. X線発生装置

高圧発生器 制御器 X線管

2. 写真式X線応力測定器

3. フィルター (Ni, V, Fe)

4. ミクロフォトメータ

5. 電解研磨装置

6. フィルムパンチャ

3. 性 能

(I) X線発生装置

この部分は、X線管に印加する高電圧を発生する高圧発生器とこれの制御器、応力測定専用のX線管、冷却リレーよりなる。

(i) 高圧発生器 (Photo. 1)

入力 A.C. 100 V

出力 30 KV, 10 mA 平滑回路 連続使用可能
全体は油槽内に高級絶縁油によって絶縁され、完全な防電撃構造になっている。

(ii) 制御器 (Photo. 2) X線管に印加する管電圧、管電流を制御するもので、下記の性能を有する。

X線管印加電圧 連続可変 0~30 KV

X線管電流 連続可変 0~10 mA

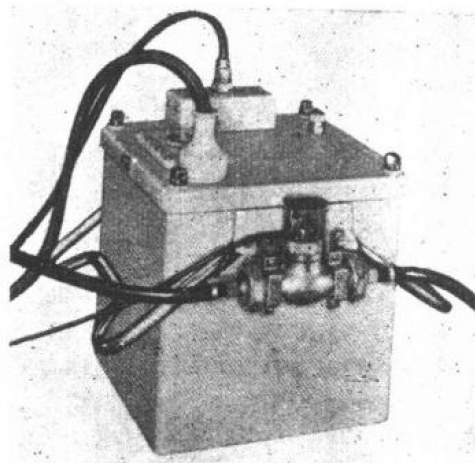


Photo. 1 High tension generator and cooling relay

* 原稿受付 昭和38年9月16日、当学会第2回X線応力測定シンポジウムにて講演(昭38.7)

** 川崎市久本30 東芝玉川工場技術部

(iii) **X 線管** (Photo. 3) 本 X 線管は、応力測定装置用に特に設計製作されたもので、陽極部分の外径を特に細くし (25 mm ϕ) X 線焦点と測定試料面との距離を著しく短くするようにした。このため、写真式 X 線応力測定器との組み合わせで、回折 X 線を撮影した場合、きわめて短時間に充分なる黒化度を得ることができる。

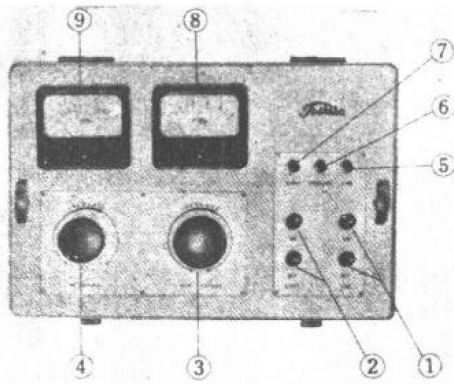


Photo. 2 Controller

- | | |
|------------------------------|-----------------|
| 1 Line switch | 2 X-ray switch |
| 3 Tube voltage controller | |
| 4 Tube current controller | |
| 5 Pilot lamp for line source | |
| 6 Pilot lamp for cooling | |
| 7 Pilot lamp for X-ray | |
| 8 Volt meter | 9 Current meter |



Photo. 3 X-ray tube (Type A-30)

X 線の放射窓には 0.5 mm 厚のベリリウムを使い X 線吸収を少なくし、陽極は水冷して使用する。

ターゲットは Co, Cr, Cu の 3 種が製作されている。X 線の実効焦点は 2 mm $\times$ 4 mm、ターゲットの傾きは 20° である。このタイプの X 線管を A-30 形と称している。

X 線管を下記の応力測定器に格納する場合には、高圧発生器と高圧ケーブルによって接続され、完全に防電撃構造となる。

(II) 写真式 X 線応力測定器 (Fig. 1, Photo. 1, Photo. 5)

本部分はこの装置の主体をなすもので、Fig. 4 に示すように、X 線管容器に格納された X 線管の焦点より発生した特性 X 線は、コリメータ④を通して細い X 線束 (1~2 mm ϕ) となり、試料③に投射される。この際

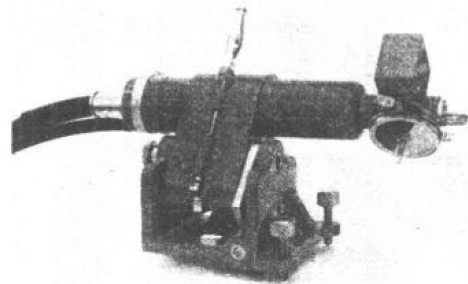


Photo. 4 X-ray stress camera



Photo. 5 Film cassette and sector mask

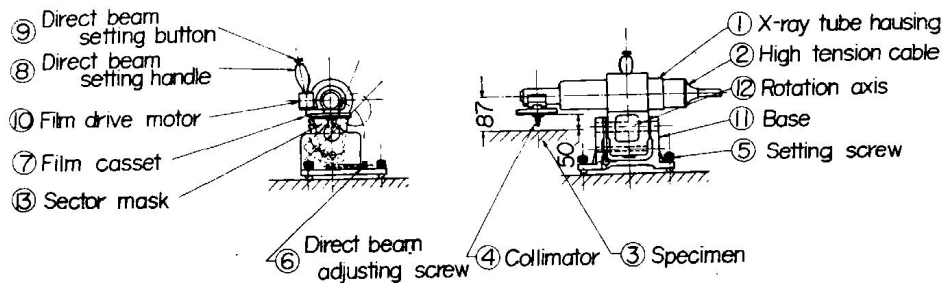


Fig. 1 X-ray stress camera

X線焦点と試料間の距離をできるだけ短くし、(87 mm) きわめて強力な特性 X 線が試料面に投射するようにした。

試料から背面に回折した X 線は、フィルムカセット⑦に装てんされた X 線フィルム上に露出される。

試料フィルム間距離は 50 mm に設計し、フィルムカセットの前側には Photo. 5 のセクタマスクが置かれ、一枚のフィルム上に多重露出できる。前者のマスクはいわゆる Schaal 法に後者は Grocker 法の場合に使用される。

回折 X 線がやや Spotty な場合には、カセット駆動モータ⑩によって 10° カセットとセクタマスクを一体とし、定速度で振動させ、像の均一化をはかることができる。傾斜角調整レバー⑧を握り、その先端の押釦⑨を押すと X 線管、コリメータ、フィルムカセットの全体が試料表面に対して傾き、X 線は試料表面の法線に対し $\psi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の四つの方向より投射することができる。また、この部分に附属するウォームギヤを回転することにより、試料面に対する傾きを調整することができる。

これらの傾斜機構によって 45° 傾斜法、Schaal 法、Grocker 法、 $\sin^2\psi$ 法のいずれの方式でもきわめて容易に使用することができる。

試料表面フィルム間距離はコリメータ部分に挿入される設定ジグによって正確に位置定めされる。

(III) フィルタ (Photo. 6)

試料の表面より生ずる散乱並重 X 線を除去し、回折 X 線像の background を減少させるために Co $K\alpha$ 線に対しては鉄箔 Cr $K\alpha$ 線に対してはヴァナジウム箔 Cu $K\alpha$ 線に対してはニッケル箔を使用する。

(IV) 応力測定用マイクロフォトメータ (Photo. 7)

フィルム上に記録された回折 X 線像の直径を測定するためのマイクロフォトメータを製作した。その基本光

学系を Fig. 2 に示す。すなわち、光源のランプより発した光は、 L_1, L_2 のレンズを通して平行光束となり、基台上に 2 枚の平面ガラスによってはさまれたフィルムに投射される。

フィルムを透過した光は対物レンズによってスリット S_1 上に集光し、一部は反射鏡 M_1 によって 90° 曲げられ、スクリーン上に焦点を結ぶ。スクリーンを観察することによって、フィルムの設定位置を調整することができる。

対物レンズ L_3 は倍率 $\times 4$ である。これは回折 X 線像は発光分析のスペクトルと異なり、一般に broad なラインが多く、むやみに拡大することはかえって像を正確に記録しないためである。

以上の光学系は固定され、フィルムと 2 枚の平面ガラスをのせた基台は手動によって粗動または微動できる。また長さ 20 mm の範囲は小形のシンクロナモータによって一方向に送ることができる。

フィルムを乗せた基台は 1 mm ごとに刻まれた、標準ガラススケールを取り付けてあり、この移動距離を顕微鏡によって 0.02 mm の精度で読みとることができる。

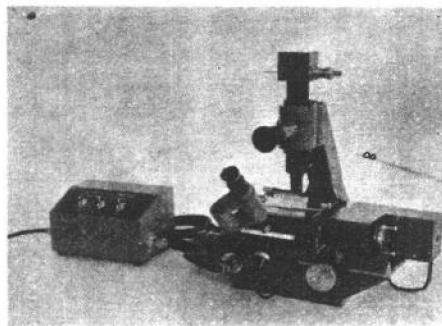


Photo. 7 Micro-photometer

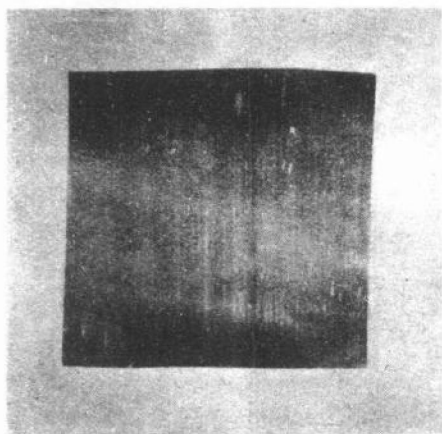


Photo. 6 Vanadium filter

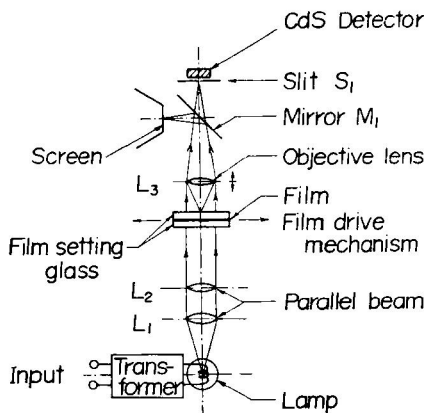


Fig. 2

スリット S_1 は幅と高さの両方を微調整できる。スリット S_1 を通過した光は硫化カドミウム光電体 Photo. 8 に入射してその光量に比例した抵抗変化を示す。この変化分は記録計によって連続記録される。この光量の変化曲線よりピーク位置を求めることができ、さらにそのピーク間距離は精密に測定できる。

なお、CdS 光電体をスリットの後側に 2 個置き、Schaal 法によって記録された 2 本の回折 X 線像をその赤道線に沿って 1 回の scanning で記録することができる。この方法は日産自動車技術研究所の本山、榎並、堀沢、加藤の諸氏によって初めて試みられた方法である。この場合には 2 点ペンレコーダ (Photo. 9) を使用する。

(V) 電解研磨装置

X 線による応力の測定では、特性 X 線を試料表面に投射し、その回折 X 線を記録するのであるから、当然その表面状態に大いに影響される。従来、この表面処

理は、ペーパー仕上、エッチング等の組み合わせで各測定者によってその仕上げ程度もまちまちであった。X 線応力値が必ずしも良い値を示さないのは、その表面処理の方法がその担当者によって異なることに一つの理由がある。

筆者等はこれらの個人差を除くために、電解研磨装置を開発した (Photo. 10)。

この図において、ガラス製タンクに充てんされた電解液は、外部に設けられたモータによって回転されるポンプによって、試料表面に押し着けられた研磨ヘッドに吸い上げられ、2 本のホースによってタンクと試料表面を環流する。この際試料を (-) に研磨ヘッドの電極を (+) にしておき、この間に適当な直流電圧を印加すれば、試料表面をきわめて短時間に光沢ある電解面に仕上げることができる。

また研磨ヘッドを試料より離れた際には、電解液は自動的に環流を停止するバルブを有している。全体は容易に移動でき、相当複雑なる構造物の表面でも研磨することができる。

(VI) フィルムパンチャ (Photo. 11)

X 線応力測定器に装てんするフィルムは直径 80mm の円形で、しかもその中心に 11mmφ のコリメータ用の孔を穿ける必要がある。この作業を暗室内で容易に

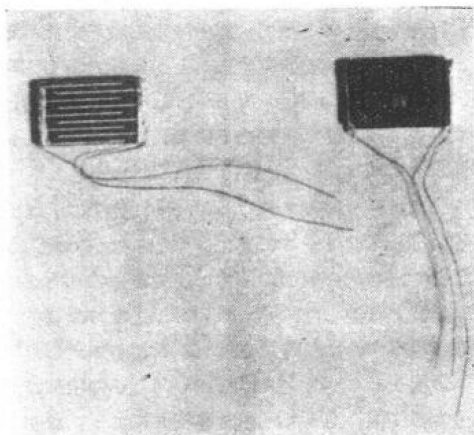


Photo. 8 CdS. photocell

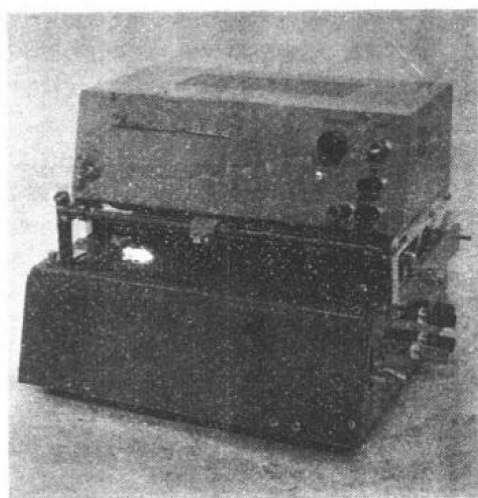


Photo. 9 2pen. chart recorder

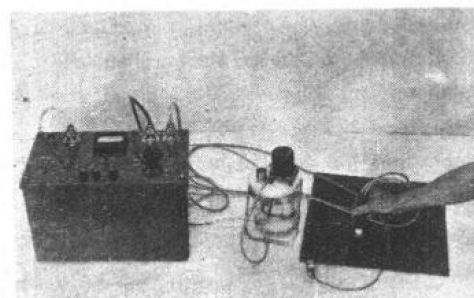


Photo. 10 Electro-Polisher

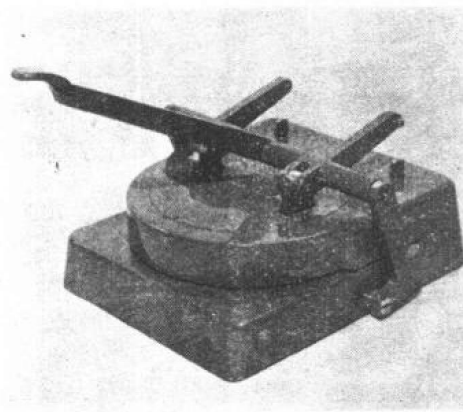


Photo. 11 Film puncher

行なうために、フィルムパンチヤを開発した。写真のハンドルを下側に押し下げることによって、円形フィルムを切り出すことができる。

4. 結 語

本装置の開発は未だ緒についたばかりであり、今後の検討に待つ点も多い。材料学会諸氏の一層のご指導をお願い申し上げます。

なお、本装置の開発にあたって特に、京都大学平修二先生、日産自動車 本山盛太郎氏、榎並豊一郎氏、堀沢寛氏、加藤紀久雄氏、岡山大学 本田和男先生に沢山の有益なご教示にあずかりました。ここに記して厚く感謝の意を表します。

なお、次回の報告には本装置の使用例につき発表する予定であります。

外国文献紹介

金 属 材 料

黄銅、ニッケルおよび鋼に静荷重および変動荷重が作用する場合のX線回折線、ヒステリシスおよび表面組織の変化 (III. アームコ鉄および25Cr Mo4鋼の曲げ疲労強度に対するX線および機械的研究) Die Veränderung von Röntgeninterferenzen, Hysteresis und Oberflächenbild bei ein- und wechselsinniger Beanspruchung von Messing, Nickel und Stahl (III. Röntgenographische und mechanische Untersuchungen zur Biegewechselfestigkeit von Armcoeisen und 25CrMo4-Stahl) Von Randolph J. Hartmann und Eckard Macherauch. Z. Metallkunde, Bb. 54, H. 5, s282~286 (1963)

X線回折線像に与える変動荷重の影響は今まで、鉄や鋼については系統的な研究はない。しかし、疲労破損にいたる過程は塑性的なものであるから、凝集長さの減少および不均一な微視的ひずみの形成において、また、X線回折線の幅の増加においてあらわれるであろう。

このような見地に立って、今日のX線技術を用いて、鉄および鋼が変動荷重を受けたときの挙動を連続的にとらえることができるかどうか、さらにできることな

ら、固有な特徴によって、疲労強度の限界を調べることができるか否かを研究することが目的である。25Cr Mo4鋼とアームコ鉄が $(0.6 \sim 1.3)\sigma_s$ の範囲で曲げ疲労試験され、X線回折線の半価幅、表面の主応力および機械的ヒステリシスが測定された。

降伏点以下で試験された25Cr Mo4鋼では、半価幅あるいはヒステリシスに変化は見られなかった。X線により測定された表面の応力は疲労寿命の10%までの試験期間では減した。寿命の10%以上では微視的クラックが観察された。降伏点以上の荷重が加えられたとき半価幅とヒステリシスは増加した。この増加は溶質原子の転位線に沿った応力誘導拡散によって説明されるだろう。

アームコ鉄では、降伏点以上の荷重を加えたときでさえも、X線回折線の半価幅はほとんど影響されなかった。内部摩擦の測定結果は初期加工硬化の低いことを示している。微視的なクラックは主として粒界に発生し、限界の大きさ 20μ に達する。また、クラック発生機構が論議されている。

(城山魁助)

(840頁へ)

X線による残留応力測定(写真法)に用いる

X線フィルムの検討*

本山盛太郎** 榎並豊一郎*** 堀沢 寛** 加藤紀久雄**

A Review of X-Ray Films for the Measurement of X-Ray Residual Stresses (Photographical Method)

by

Moritaro MOTOYAMA, Toyochiro ENAMI, Hiroshi HORIZAWA
and Kikuo KATO

(Engineering Laboratory, Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka)

It is a matter of common knowledge that there are two ways, namely counter method and photo method, to measure X-ray residual stresses. it is a recent tendency that reinforcement of the counter method by a photographic method has been gradually prevailing at laboratories.

At the same time, the manufactures of X-ray stress measuring apparatuses are trying to adapt the photo method every way.

To cope with the above-mentioned situation, "Konishiroku" and "Fuji", both Japanese typical makers of X-ray films that form the basis of the photo method, have made efforts to review X-ray films, and carried out sufficient testings on X-ray films for both industrial and medical uses.

However, there are few data for X-ray area concerning the measurement of X-ray residual stresses. Therefore, our laboratory investigated in photo sensitivity, grain size, fixing time and the like, for five varieties of Types N, S, Y, RR, and R films, which are altogether the products of the "Konishiroku", and carried out testings to determine the X-ray film best suited for the measurement of X-ray residual stresses.

Putting their results together, Type N is superior to any other types in sensitivity and contrast, while it is very much inferior to any other types in grain size and fixing time.

Type-S is inferior to Type N in sensitivity, and about equal in contrast, while the former is very much superior to the latter in grain size and fixing time.

Type Y is shorter than any other types in fixing time, while it is equal to Type S and very much superior to Type N in grain size.

Although Types RR and R are characterized as excellent in contrast in their maker's catalog, it has been proved that even when 30 minutes' exposure has been processed in such a condition as when it is used by us, they did not turn in the straight line area, so such films are not of any practical use.

Therefore, it has been concluded that Type S is the best one for use in the measurement of X-ray residual stresses, because it is superior in contrast, grain size and fixing time, though it is a little inferior to the best Type N in sensitivity.

Furthermore, in the process of these tests, has been ascertained again the efficiency of X-ray filter, that was reported in the special issue of the Society Journal last year, concerning X-ray stress measurement as mentioned below.

According to the characteristic density curve of X-ray film shown when the X-ray filter is not used, the density of diffraction line becomes high in a short time, while the density of the background becomes high. Therefore, the value of the density of diffraction line minus the background density namely the effective density decreases.

However, in the case of the characteristic curve of X-ray film with the use of the X-ray filter,

* 原稿受付 昭和38年9月4日, 当学会第2回X線応力測定シンポジウムにて講演(昭38.7)

** 日産自動車(株)研究所 *** 正員 日産自動車(株)研究所

the density of diffraction line does not become so high in a short time. But as the density of background does not become high, even if the exposure time becomes longer, the latter is superior to the former in the effective density and contrast.

As a result, it has been made clear that the efficiency of such an X-ray filter is to be greatly enhanced by setting it before the X-ray film, so as to absorb the diffused reflection of X-ray besides making the characteristic X-ray, unicolorous which is the main purpose of this filter.

(Received Sep. 4, 1963)

1. ま え が き

X線による残留応力測定法には、GM 計数管を用いた、Counter 法と、Photofilm を用いる写真法の2方法があることは周知のとおりである。最近の傾向として Counter 法を用いているところでも、写真法を併用するところが増えてきた。また、国内のX線応力測定装置のメーカーも写真法の装置を試作中である。

このように写真法が注目された現在、写真法のもととなるX線フィルムについての検討は無に等しい。国内のX線フィルムのメーカーである小西六、富士両社とも工業用、医療用あわせて数種のX線フィルムを製造しているが、それらX線フィルムの資料は工業用、医療用のX線領域についての検討は充分なされ、多くの資料があるが、われわれの使用するX線領域で、しかも、回折されたX線についての資料は前記のように零である。このような現状において、当所以外の写真法を採用しているほとんどのところは、X線フィルムとして Type N (小西六) または #200 (富士) を使用している。当所においては前記 Type のX線フィルムは感度はすぐれているが、粒状性が劣るので、感度は多少犠牲にしても粒状性の富んだ方が写真法に用いるX線フィルムの必須の条件と判断し、医療用、Type Y を使用していたが、この点を明確にすべく、一連の実験を行ない一応の結論が得られたので報告する。

2. 実験条件

(I) 供試 X 線フィルムの種類

Type N (富士 #200 相当)

" RR (" 100 ")

" R (" 80 ")

" S (" 400 ")

" Y

(II) X 線照射条件

特性 X 線 CrK α 線

照射面積 4.5×3.0 mm

照射角度 90°

管電圧 40 KVP

管電流 8 mA

回折試料 調質鋼 (SCM 45)

露出時間 測定結果を参照されたい

(III) 現像条件

現像液 Konidol, X

現像温度 20°C

現像時間 5 min

3. 実験結果

(I) 濃度測定

濃度測定は小西六写真工業株式会社日野工場、製品研究室で行ない、自社製の電子管式濃度計を使用した。

Photo. 1 は本実験により得られた回折写真の一例であって、一枚のX線フィルムを半分にわけ、異なる露出を与えたもので、英字はX線フィルムの Type を示し、数字は露出時間を表わしている。測定箇所は回折線の最高濃度点、および back ground の2箇所を測定した。測定結果の一例として Type N の測定結果を Fig. 1 に示す。なお、測定結果より有効濃度 (回折線の濃度より back ground の濃度を差し引いた

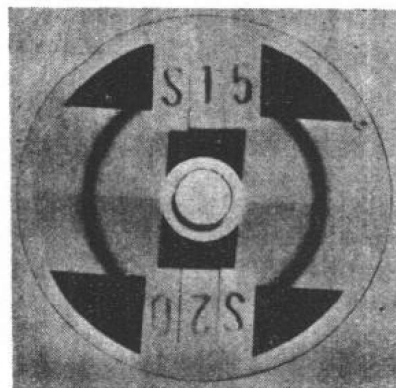


Photo. 1 An example of taken diffraction pattern

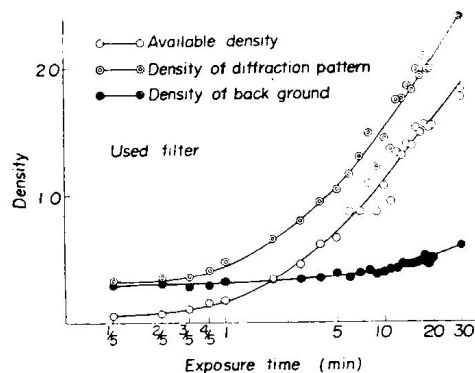


Fig. 1 Effect of X-ray bilten Type N

値)からの特性曲線を Fig. 2 にまとめてみた。その結果、写真感度の優劣は図より了解されるように Type N が最高である。

次は Type S であって、Type S は透過試験で使用する場合、蛍光増感紙を使用し撮影するもので、この場合、最高の感度が得られるX線フィルムであるが、われわれが使用しているX線領域ではX線フィルムの前面に蛍光増感紙を置くとX線は吸収される。したがって本実験では、蛍光増感紙を使用していないため、Type N より写真感度は劣っている。Type Y は医療用であって工業用フィルムと、その特性を比較した例はなく、その特性はわからなかったが、本実験により Type N, S につぐX線フィルムであることが了解できた。Type RR, R については透過試験に使用する場合、非常に高い Contrast であるといわれているが、われわれの使用領域では30分露出を行なっても特性曲線は直線域に達しないことがわかった。

(II) 粒状性

X線フィルムの粒状性はX線写真像(透過試験)の鮮鋭度を決定する因子である。また、X線による残留応力測定用として使用する場合、回折線をマイクロホトメーターにより濃度曲線を記録して測定するため、粒状性は濃度曲線の良否をも左右する。したがって、X線フィルムの粒状性は前項の写真感度とともにX線フィルムの使用価値を決定する要因となる。

以上の理由により Type N, S, Y, 3種類のX線フィルムについて粒状性を調べた。Type RR, R については写真感度が非常に低く、実用性に乏しいので本実験より除外した。Photo. 2~4 に Type N, S, Y の現像銀粒子の拡大写真を示す。拡大写真の条件は3種

の type とも濃度値の等しい回折写真を50倍で撮影した。次に粒状性が濃度曲線の記録にどのように影響するかを調べた。その結果を Fig. 3~5 に示す。濃度曲線記録の条件は現像銀粒子の拡大写真と同様に濃度値の等しい回折写真を選び、10倍のマイクロホトメーターで記録を行なった。以上の結果から了解できるように

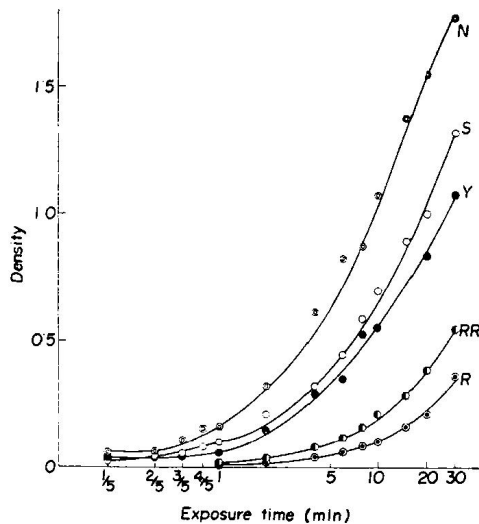
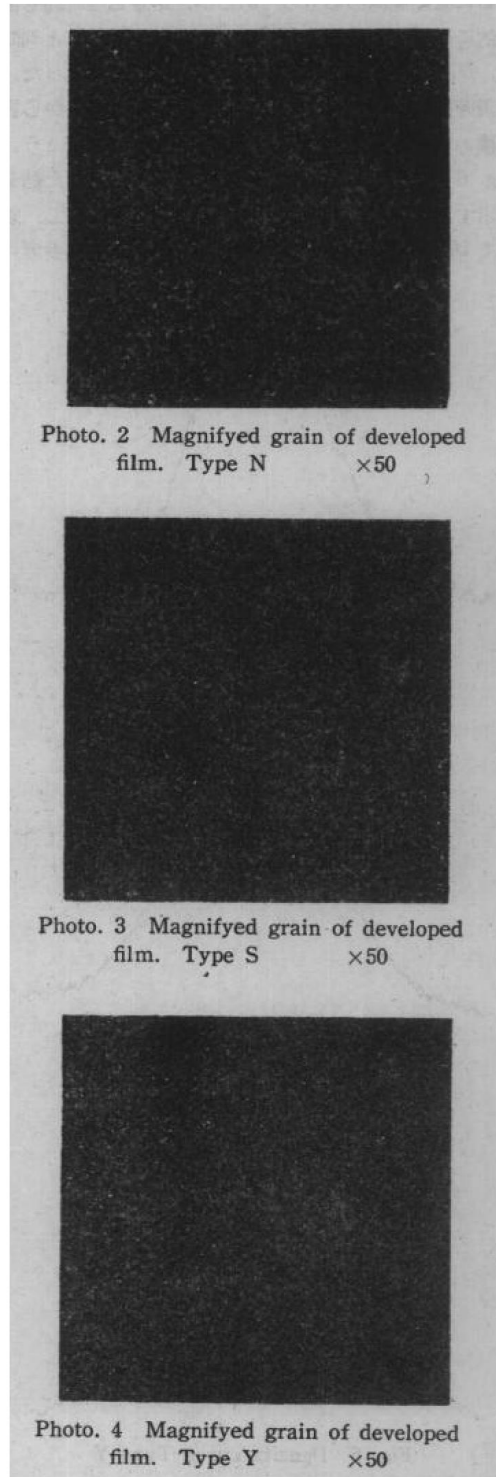


Fig. 2 Several kinds of X-ray film characteristic curves



現像銀粒子の拡大写真および濃度曲線とも Type N は粒状性の悪いことがわかり, Type S, および Y は Type N より粒状性が良く, 両 Type の差はほとんどみられない。

(III) 定着処理時間

前項までの実験は, X線フィルムの使用価値を決定するに直接関係あるものであるが, 定着処理時間も間接的には使用価値を決定する要因の一つであると判断し, N, S, Y 3種の Type について実験を行なった。定着時間とはX線フィルムを定着液に浸漬してから乳剤膜の黄色が消え, 透明になるまでの時間をいう。Fig. 6 に Type N, S, Y の定着時間を測定した結果を示す。定着液の条件は「Konifix-X」を使用し, 新液で 20°C 一定にたもち実験を行なった。なお参考に

メーカーで測定した, 「Konifix-X」の Type N, S, Y に対する定着能力曲線を Fig. 7 に示した。定着能力曲線とは, 定着液はフィルム処理量が増加すると, 定着能力が低下する。この状況を表わすものである。

上記の結果 Type Y の定着処理時間は一番短く, また定着能力曲線も非常にすぐれている, Type Y について S, N の順になっており, このことは乳剤膜の厚さに関係するものである。

4. 結 論

濃度測定および粒状性, 定着時間を総合してみると, Type N は写真感度, Contrast と他 Type よりすぐれているが, 粒状性, 定着時間は他の Type より非常に劣っている。Type S については写真感度は Type N より劣るが, Contrast は Type N と同程度あり, 粒状性, 定着時間は Type N よりはるかにす

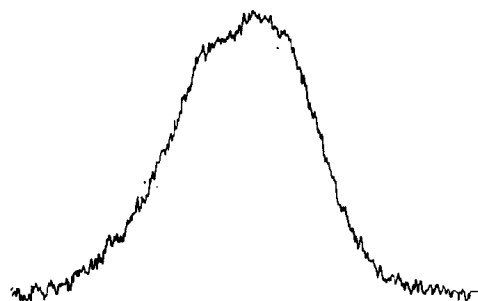


Fig. 3 Density curve Type N



Fig. 4 Density curve Type S



Fig. 5 Density curve Type Y

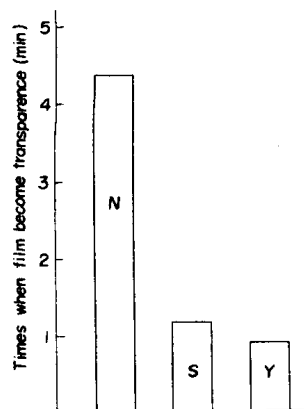


Fig. 6 Effect of fixing time

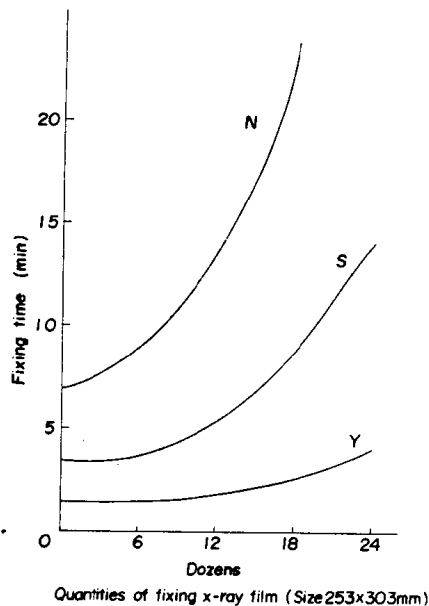


Fig. 7 Fatigue curve of fixing solution

ぐれている。Type Y については、定着時間は他の Type と比べ非常に短く、粒状性は Type S と同じく Type N よりはるかにすぐれているが、写真感度、Contrast は一番劣っていることがわかった。以上の結論より判断するに、写真感度は最高感度の Type N より劣るが、Contrast 粒状性、定着時間のすぐれている Type S が現在のところ、X線による残留応力測定用のX線フィルムとして最適である。このことはまえがきで記した。当所だけが Type Y を使用していた、そのことを正当づける本実験の主旨にそわぬ結果となった。

なお Type S について写真感度を少しでも高めるため、X線フィルムの後面に軟X線用の蛍光増感紙をおき、回折写真を撮影し濃度測定を行ない、特性曲線を求め、また粒状性をも調べた。その結果を Fig. 8~9 および Photo. 5 に示した。蛍光増感紙を使用しない場合と、特性曲線の比較を行なった特性曲線が示すように感度も高く、Contrast も上った。また、粒状性は蛍光増感紙を使用しても悪くならないことがわかつ

た。

以上の結果より今後当所においては、X線フィルムとして SAKURA、工業用 Type S を使用し、X線フィルムの後面に軟X線用の蛍光増感紙をおくことに決定した。

5. 付 記

X線フィルターの効果はすでに本会誌の特集号で記したが、その効果を本実験の過程において再確認することができたのであわせて報告する。当所においては既報のようにX線フィルターをX線フィルムの前面におき、X線フィルターを使用する主たる目的のほか、試料面より乱反射されるX線をもX線フィルターにより吸収させた。その時の濃度測定は3(I)項で示したが、本項ではX線フィルターを使用しない時の回折線の濃度と background の濃度を測定し、3(I)項で示した結果と比較した。測定結果の一例として、Type

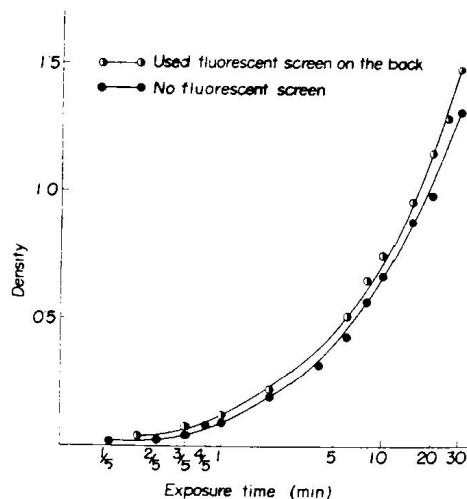


Fig. 8 Effect of fluorescent screen

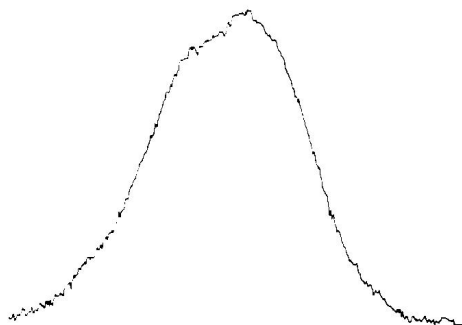


Fig. 9 Density curve Type S (This is setted fluorescent screen on the block)

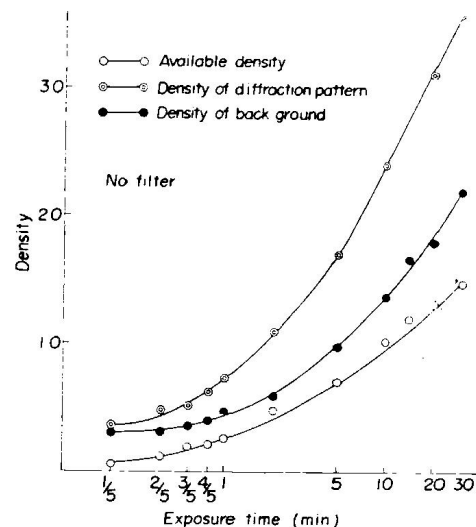


Fig. 10 Density-Exposure time Type N

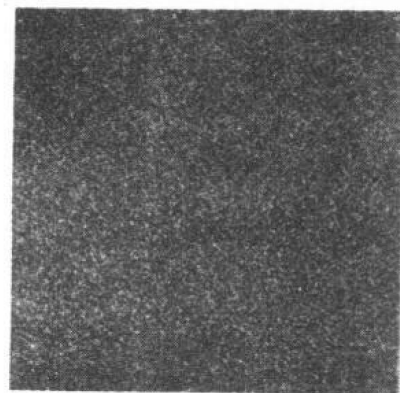


Photo. 5 Magnified graid of developed film. Type S (Fluorescent ×50 screen)

Nの測定を行ない、測定結果からの特性曲線を Fig. 10に示す。3 (I)項と本項の測定結果を比較するとX線フィルターを使用しない回折線の濃度 level は短時間に上昇するが、同時に background の濃度 level も高くなる。したがって有効濃度は低くなり、Contrast も悪くなる。X線フィルターを使用した場合、回折線の濃度 level はX線フィルターを使用しない時のように短時間に上昇はしない。しかし background の濃度 level は特性曲線が示すように低い値を示し、有効濃度はX線フィルターを使用しない時より高い値を示し、Contrast も良くなっている。したがってX線フ

ィルターはX線回折に不必要なX線を吸収させ、単色化された特性X線を得るため、管球のX線口におくが、X線フィルムの前面、すなわち検出側にもX線フィルターをおけば試料面より乱反射されるX線も吸収することができる。

以上の結果よりX線フィルターの効果は了解されたと思う。

なお、本実験実施にあたり、種々ご援助をいただきました小西六写真工業株式会社、日野工場の方々に厚くお礼申し上げます。

(834頁より)

塑性ひずみの領域における X 線応力測定 (X-ray Stress Measurement in the Range of Plastic Strains) by V. Hauk Pre-prints of Papers Presented Fourth International Conference on Non-destructive Testing, p. 226-229 (Sept. 1963)

鋼、アルミニウム合金および黄銅に引張変形を与えその残留応力をX線によって測定した結果を述べ、塑性変形後の金属材料の残留応力をX線によって測定する場合に生ずる種々の因子について考察を行なっている。

測定には計数管ゴニオメータを用い、 $\sin^2\psi$ 法を採用している。まず0.8% C炭素鋼の板状試験片に6%の引張変形を与えた後、 $\text{Co K}\alpha_1$, $\text{Mo K}\alpha_1$, $\text{Cr K}\alpha_1$ および $\text{Fe K}\alpha_1$ 線による (310), (732)/(651), (211) および (220) 面について、それぞれその引張方向の表面残留応力を測定し、機械的測定値から得られるひずみ硬化による圧縮応力との対比を行なっている。(732)/(651), (211), (220) 面における値はほぼ機械的応力と対応しているが、(310) 面による値は明らかに高い圧縮応力を示した。次に均質と考えられる材料として、Bessemer 鋼 (0.02% C, 0.23% Mn, etc.) について25%引張変形後その表面の残留応力を測定した結果

(310) 面には圧縮、(220) 面ではわずかに引張、(211) 面ではほとんど零の値を示した。すなわちこの結果から材料の弾性異方性の影響が考慮されなければならないことは明らかである。

これらの試料について電解腐食法により両面から表面層を除去し、その各段階で新表面の残留応力を測定した結果、試料の全断面にわたって内部においても表面とほぼ同じ値をもつ一定の圧縮残留応力の存在することを示した。これはAl Cu Mg 合金に4.5%, Al Zn Mg Cu 合金に5.5% 引張変形を与えた場合でも同様である。これらの結果を表面効果、ひずみ硬化異方性によって説明することは不可能である。すなわち第2種あるいは第3種残留応力の寄与を考える必要がある。

また鋼における Fe_3C , Al 合金における Al_2Cu のように、不均質な材料においては相応力を考慮せねばならない。たとえば引張変形後の ($\alpha+\beta$) 黄銅において、 α 相の (420) 面について測定した圧縮残留応力は (222) 面のものより低い値を示し、 α 相の (220) および β 相の (211) 面は引張残留応力を示す。均質な材料においては結晶粒内、結晶粒界およびその中間の領域の変形の相違が考えられる。

(田丸武好)

(860頁へ)

論 文

鉄鋼材料の塑性変形による残留応力に及ぼす異方性の影響*

Der Heterogenitätseinfluß auf die Verformungseigenstressen von Eisenwerkstoffen

von

Klaus KOLB** und Eckard MACHERAUCH**

(Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart, Deutschland)

1. Einleitung

In letzter Zeit hat sich—wie Mitte der fünfziger Jahre—das Interesse auf dem Gebiete der röntgenographischen Spannungsmessung wieder stärker dem Problem der verformungseigenen Spannungen heterogener Werkstoffe und hier vor allem der von Stählen zugewandt. Dies wurde durch den nunmehr zweifelsfreien Nachweis ausgelöst, daß in bestimmten Fällen röntgenographisch ermittelte Eigenstressen nicht mit Eigenstressen I. Art identisch sind, obwohl sie sich in ihren Dehnungsverteilungen genau wie diese auswirken. In früheren Arbeiten haben wir mehrfach darauf hingewiesen, daß besonders Untersuchungen unter systematischer Variation des Heterogenitätsgrades zur Klärung dieses Fragenkomplexes beitragen können. Nach Abschluß einer größeren Meßserie an unlegierten Stählen wurden von uns inzwischen auch Messungen an mehreren legierten Stählen vom Typ X MoCr 4 durchgeführt. Auf diese Weise gelang ein Einblick in die Gesetzmäßigkeiten, durch die der Aufbau der Verformungseigenstressen bei diesen Stahlsorten charakterisiert ist. Nachfolgend werden einige typische Ergebnisse beider Versuchsserien gegenübergestellt und besprochen.

2. Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung

Aus einer Serie normalisierter unlegierter Stähle mit Kohlenstoffgehalten von 0.015% bis zu 1.15% und einer Serie normalisierter Molybdän-

Chrom-Stählen mit Kohlenstoffgehalten von 0.04% bis zu 1.18% wurden je drei Stähle für die vergleichenden Betrachtungen ausgewählt. Ihre Analysenwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Messungen erfolgten an 100 mm langen zylindrischen Probestäben, die in der Mitte auf einer Länge von 50 mm einen Durchmesser von 4 mm, an den je 25 mm langen Einspannenden einen Durchmesser von 6 mm hatten. Die Proben wurden nach der Herstellung zwei Stunden bei 690°C im Hochvakuum eigenspannungsfrei geglüht und anschließend im Ofen abgekühlt. Danach wurden von jeder Probe etwa 5/100 mm durch elektrolytisches Polieren abgetragen.

Die röntgenographischen Last- und Eigenstressbestimmungen erfolgten nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren, wobei hauptsächlich mit Cr-K α -Strahlung, seltener mit Co-K α - und Fe-K α -Strahlung gearbeitet wurde. Die belasteten Proben wurden

Table 1 Zusammensetzung der untersuchten unlegierten und legierten Stähle

Bezeichnung	Gehalt in (%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
V-Min	0.03	0.10	0.15	—	—	0.012	0.009
UB 60	0.34	0.25	0.51	—	—	0.012	0.009
ES 2	1.15	0.23	0.20	—	—	0.106	0.006
Legierte Stähle							
0 MoCr 4	0.04	0.28	0.71	0.45	0.40	0.010	0.07
25 MoCr 4	0.25	0.37	0.70	0.51	0.42	0.020	0.023
75 MoCr 4	0.75	0.32	0.74	0.49	0.40	0.106	0.021

* 原稿受付 昭和38年10月3日

** Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart, Deutschland

in einer Zugmaschine (Bauart Zwick) mit Hilfe einer Translationsvorrichtung¹⁸⁾, die verformten Proben in einer Translations-Rotationsvorrichtung¹⁶⁾ vermessen. Zur Ermittlung der Eigenspannungsverteilung über dem Probenquerschnitt wurde eine rotationssymmetrische Abätzmethode^{16)~18)} angewandt

3. Gitterdehnungsmessungen während und nach elastischer Verformung

Bei elastisch beanspruchten homogenen Werkstoffen wurde bisher stets ein linearer Zusammenhang zwischen Gitterdehnungen und wirksamer äußerer Spannung beobachtet. Im Gegensatz dazu liegen bei den Eisenwerkstoffen uneinheitliche Ergebnisse vor. Während einige Autoren bei Zug-, Druck- bzw. Biegeversuchen einen linearen Zusammenhang zwischen Gitterdehnung und Lastspannung bis zur Streckgrenze fanden, beobachteten andere unterhalb der Streckgrenze bereits Abweichungen davon und Druckeigenspannungen in den Oberflächenschichten nach Entlastung¹⁹⁾. Für das Problem der Verformungseigenspannungen war es daher notwendig, zu klären, ob es sich bei den genannten Beobachtungen um zufällige oder gesetzmäßige Befunde handelt. Die beobachteten Gesetzmäßigkeiten können durch die an einem unlegierten Stahl mit 0,34 % C gewonnenen Einzelergebnisse veranschaulicht werden. Wegen Einzelheiten sei auf die Originalarbeit²⁰⁾ verwiesen. In Fig. 1 sind als Funktion der Lastspannung die Steigungen m^* der gemessenen $da/a - \sin^2\psi$ -Geraden aufgetragen, von denen einige in Fig. 2 wiedergegeben sind. Während nach Entlastung von 24 kg/mm² noch keine Eigenspannungen auftreten, wird bei Belastungen oberhalb 25 kg/mm² ein mit Eigenspannungsausbildung verbundener Rückgang von m^* gefunden (vgl. Diagramm c und d in Fig. 2). Die nach Entlasten von 30 kg/mm² gemessene Gittereigendehnungsverteilung (Diagramm b) unterscheidet sich deutlich von der im Ausgangszustand (Diagramm a) und zeigt Druckeigenspannungen in den erfaßten Oberflächenkristalliten an. Das bedeutet, daß ein Streckgrenzenunterschied zwischen den röntgenographisch erfaßten Oberflächenschichten und der Gasamprobe besteht und die Ferritkristalle der Oberfläche sich bereits bei einer Spannung unterhalb der makroskopischen Streckgrenze plastisch verformen. Fig. 3 gibt die

Werte der makroskopischen Streckgrenze für untereutektoidische Stähle und deren durch rönt-

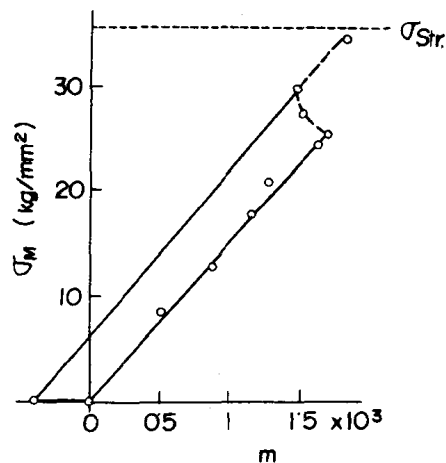


Fig. 1 $\sigma_M - m^*$ -Verlauf bei Verformung im elastischen Bereich.

(σ_M = Lastspannung, $\sigma_{Str.}$ = Streckgrenze, m^* = Anstieg der Gitterdehnungen im $da/a - \sin^2\psi$ -Diagramm)

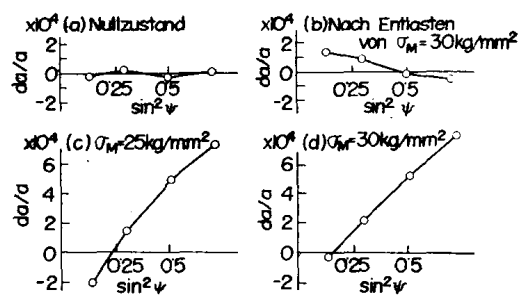


Fig. 2 Typische Gitterdehnungsverteilungen über $\sin^2\psi$

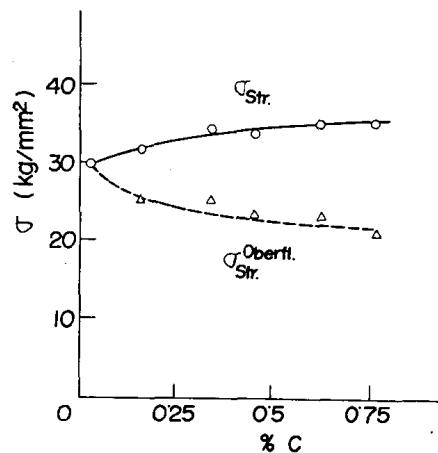


Fig. 3 Werte der Streckgrenze ($\sigma_{Str.}$) und der Oberflächenstreckgrenze ($\sigma_{Str. OberPL.}$) unlegierter Stähle als Funktion des C-Gehaltes