

ALTERACIONES ESTRUCTURALES DE LOS METALES POR FATIGA*

Günther JOSEPH**
Gabriel RODRIGUEZ***

RESUMEN

En piezas de acero y de cobre que han estado sometidas a un gran número de sollicitaciones repetidas o alternadas, con períodos de reposo, se han encontrado aspectos metalográficos de subestructuras de poligonización.

La poligonización explicaría el afinamiento de los anillos de difracción Debye - Scherrer de los metales con acritud, a medida que progresa su estado de fatiga. Asimismo da una interpretación para el ablandamiento por fatiga de los metales que se encuentran en este estado.

INTRODUCCION

Las alteraciones estructurales producidas en los metales por fatiga son materia de gran cantidad de trabajos¹. Las características microscópicas han sido resumidas por V. S. Ivanova², haciendo referencia especial a las alteraciones superficiales en probetas fatigadas en ensayos de laboratorio. Estas alteraciones ocurrirían en tres períodos, anteriores a la ruptura de la pieza, posibles de coordinar con los diagramas de Wöhler del material respectivo (Fig. 1.).

El primer período sería un período de incubación en que ocurrirían sólo

*Trabajo presentado a la 4a. Reunión de la Sociedad Chilena de Física.

**Dr. rer. nat., Ing. Civil Industrial, Jefe Laboratorio de Metales IDIEM, Prof. de Fisicoquímica y de Física de Metales de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.

***Químico Industrial, Jefe del Laboratorio de Microscopía Electrónica y del Laboratorio de Calorimetría IDIEM.

fenómenos plásticos en los bordes de grano. En el segundo período comenzarían a aparecer en el interior de los granos, bandas de deslizamiento y dentro de las bandas, fisuras submicroscópicas. También aparecerían en este segundo período los hoyos tubulares mencionados por P.J.E. Forsyth⁸. En el tercer período las bandas de deslizamiento cruzarían los bordes de granos, las fisuras se unirían con los hoyos formando microgrietas y estas crecerían de modo transcristalino o intercristalino según la magnitud de los esfuerzos aplicados.

Los fenómenos mencionados, se describen también en otros trabajos^{4 a 10} que enuncian observaciones de la superficie de probetas. Sin embargo, éstos no contribuyen a explicar el afinamiento de las líneas de los diagramas de retro-reflexión Debye-Scherrer de metales con acritud (endurecidos por trabajo en frío) a medida que progresa su estado de fatiga^{5, 8, 11, 12}. Tampoco explican el ablandamiento de los mismos por idéntica causa^{6, 21}.

El estudio metalográfico de piezas sometidas durante largos períodos a sollicitaciones repetidas o alternadas en el uso industrial, parece agregar algunos elementos de juicio interesantes en este sentido, al estudio de la fatiga. Estas piezas han estado sometidas a sollicitaciones mucho más complejas que las que se emplean en ensayos de laboratorio, con magnitudes extremas variables y cargas estáticas superpuestas. Además, las sollicitaciones han estado interrumpidas por períodos de reposo que parecen tener también, según Jacquesson¹⁴, gran importancia para la vida útil total de los elementos de construcción respectivos.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Muestras estudiadas:

La Tabla I indica los tipos de piezas estudiados y las condiciones de uso a que estuvieron sometidas. Todas las muestras fueron examinadas en su estado original, pero en el caso de los rieles de grúa, se hizo además, un tratamiento térmico a 870° C durante 48 h, seguido de enfriamiento en el horno.

Los análisis químicos de los materiales en estudio se dan en la Tabla II.

Examen Metalográfico:

En el presente trabajo se han estudiado cortes que fueron lijados bajo agua y luego pulidos electrolíticamente hasta eliminar totalmente el material que pudo haberse deformado en el pulimento mecánico.

Para acero se utilizó como electrolito de pulido el reactivo Disa-Elec-

TABLA I

TIPOS DE PIEZAS ESTUDIADOS

Pieza	Uso	Tiempo de uso aprox.
Viga doble T	Riel de puente grúa	35 años
Cilindro forjado	Arbol del crucero Esmeralda desguzado en 1938 y construido en Inglaterra en 1903.	35 años
Eje forjado	Eje usado en coches de pasajeros de FF. CC.	10 a 15 años
Alambre de cobre duro	Parte de un cable de alta tensión de la línea Itahue-Charrúa, con tramos de luz media de 354 m, fija con grapas de suspensión de tipo O. B. 83074. Durante una parte del tiempo de uso se emplearon amortiguadores de vibración en la línea.	5 años

TABLA II

ANALISIS QUIMICOS DE LOS MATERIALES EXAMINADOS

Pieza	Micrografía Fig.	Análisis Químico					
		% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu
Viga doble T	2, 3, 4 y 5	0,235	0,670	0,036	0,022	0,040	- - - -
Eje de carro Nº 1	6	0,36	0,65	0,19	0,016	0,029	- - - -
Eje de carro Nº 2	7	0,38	0,54	0,25	0,015	0,024	- - - -
Arbol Crucero. Esmeralda	8	0,141	0,686	0,094	0,044	0,034	- - - -
Alambre de cobre duro	9 a 13	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	Mayor o igual que 99,92

pol A-2 (solución alcohólica de ácido perclórico). Las muestras fueron luego atacadas con solución al 1% de ácido pícrico en alcohol etílico y después con el reactivo de Work & Case (solución preparada con 22 ml de ácido clorhídrico concentrado, 50 ml de alcohol etílico y 9 g de cloruro cúprico). Schmidtman, Klärner y Schenck¹⁵ afirman que este ataque destaca las dislocaciones en la ferrita, por ser ellas centros de aglomeración de impurezas intersticiales. En otros casos dio mejor resultado un ataque con Nital al 4% posterior al pulido electrolítico.

Las muestras de alambre de cobre duro fueron electropulidas con reactivo Disa-Electropol D-2 (solución alcohólica de ácido fosfórico). Las preparaciones para el microscopio electrónico se hicieron por el método de la réplica de plástico-cromo (Triafol-cromo) colocando sobre la muestra pulida y atacada, una lámina de Triafol de 0,1 mm de espesor reblandecida con una gota de acetona. Sobre esta réplica se depositó una película de cromo a un ángulo aproximado de 20° (previo depósito de una delgada capa a 90°), en una cámara de vaporización de alto vacío Siemens modelo VBG 350a, a un vacío mejor que 10⁻⁴ mm de mercurio. Para proteger la película de cromo se depositó sobre la misma, una delgada capa de parafina sólida. Acto seguido se disolvió el Triafol en acetato de metilo saturado con parafina y finalmente las réplicas de cromo se dejaron libres disolviendo la parafina en un baño de toluol. Desde allí fueron recogidas en porta-objetos con soportes de carbón.

Las réplicas fueron observadas en un microscopio electrónico Siemens Elmiskop I, tomándose los negativos en película cortada Kodalith, revelada normalmente en revelador Kodak D-11 (1:1).

RESULTADOS

La Fig. 2 y 3 presenta aspectos de un corte longitudinal de un trozo de riel de grúa, observado con luz polarizada, con 1000 diámetros de aumento. La Fig. 2 permite apreciar en los granos marcados con letra P, una fina red de subdivisiones, que por analogía con otras vistas similares de la literatura^{15,16} se han interpretado como subestructuras de poligonización. En cambio, otros granos se presentan parcial o totalmente atravesados por líneas negras, las que se han interpretado como microgrietas transcristalinas. Los bordes de grano muy marcados se han interpretado como grietas intercristalinas. En la Fig. 3 se ve además, que los granos de ferrita pueden manifestar un fino estriado.

Las Fig. 4 y 5 muestran el mismo material con 500 y 1000 aumentos respectivamente, luego de un tratamiento térmico de 48 h a 870° C. Se observa

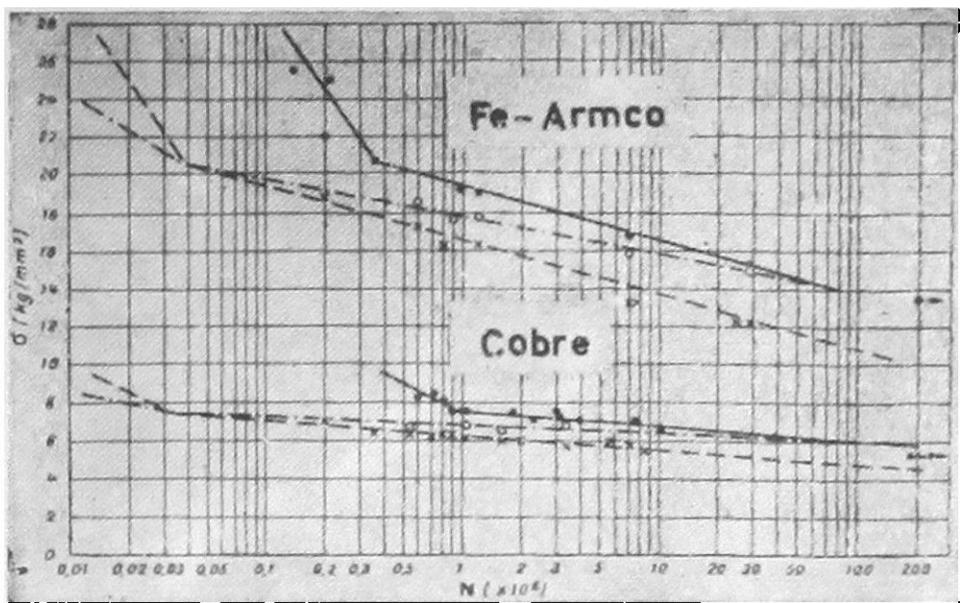
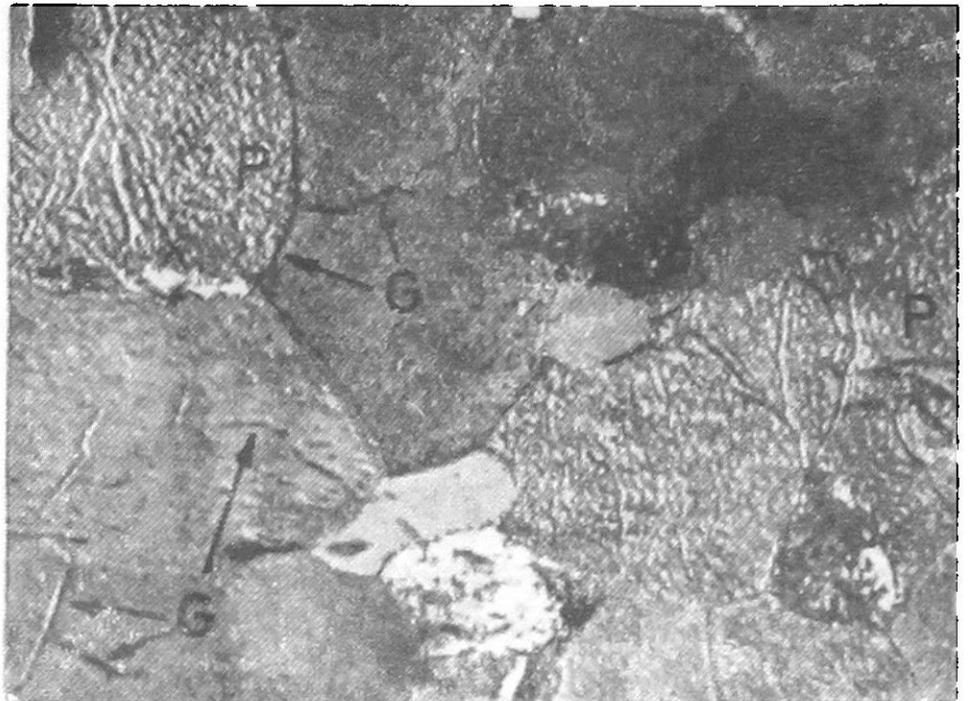


Fig. 1. Diagrama experimental de fatiga del hierro Armco y del cobre (según V. S. Ivanova, Rev. Metallurgia LV N° 6 1958.)

- Datos de resistencia a la fatiga.
- Datos de comienzo de agrietamiento de los límites de grano.
- x Datos de comienzo de agrietamiento transcristalino.

x 1.000



x 1.000

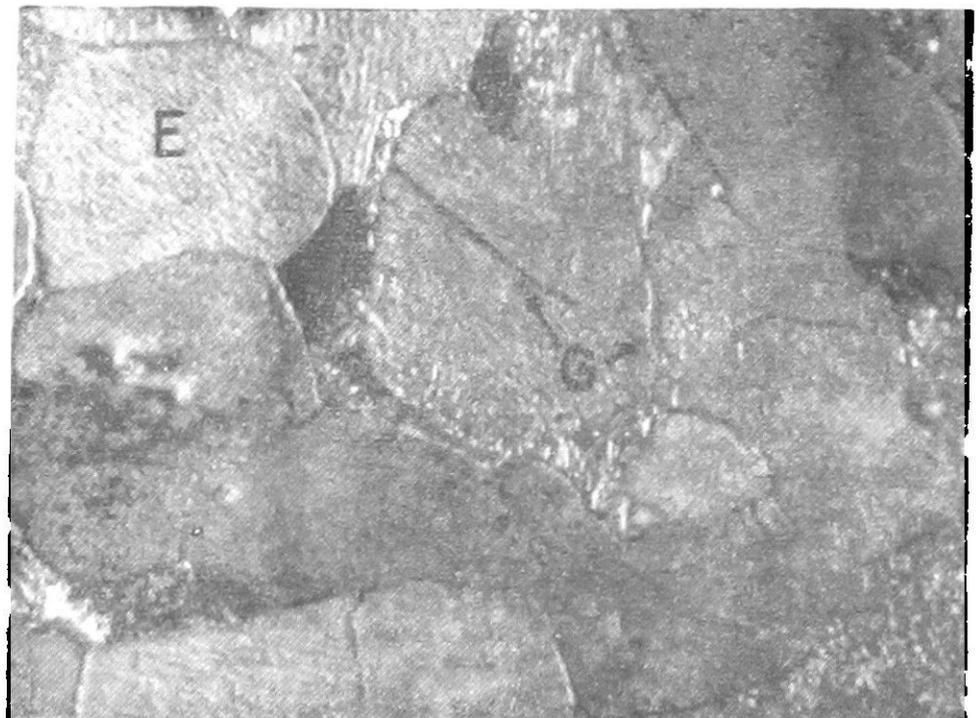
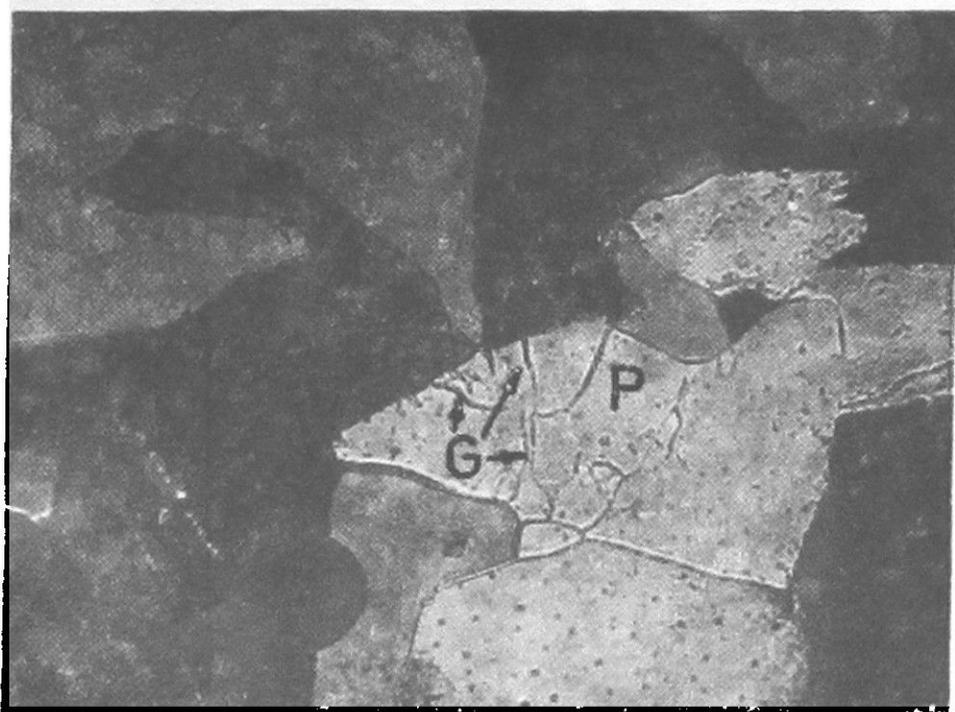


Fig. 2. y 3.: Corte longitudinal de un riel de grúa. Pulido electroquímicamente: Reactivo Disa Electropol A-2. Ataque: ácido pícrico en alcohol al 1 o/o y reactivo de Work & Case.

- G – microgrieta
- P – grano poligonizado
- E – estrías

x 500



x 1000

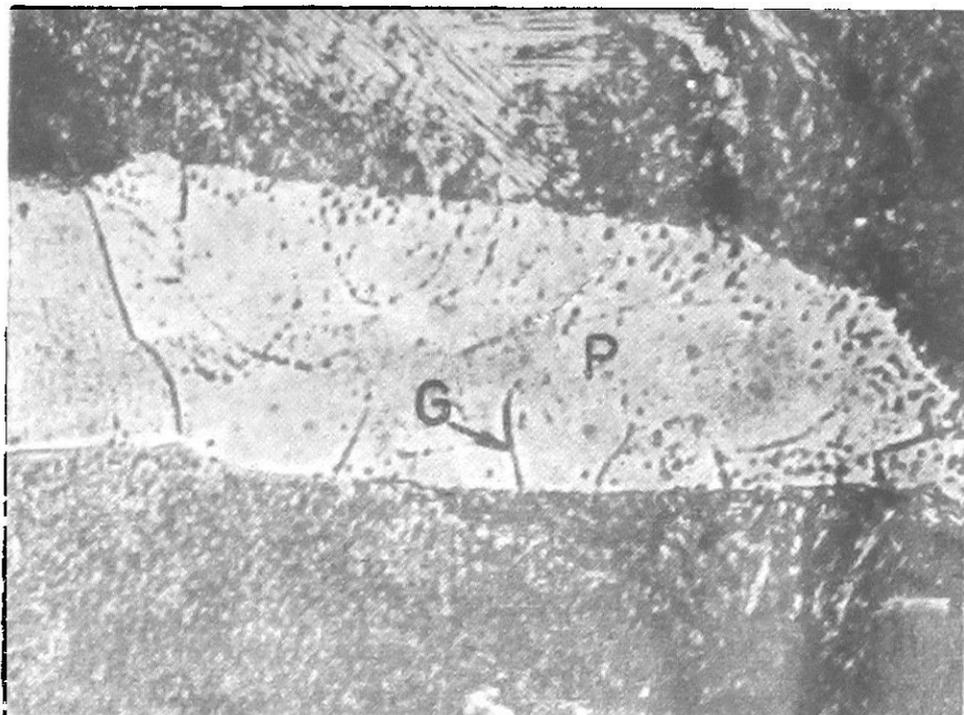


Fig. 4. y 5. Corte longitudinal de un ri de grúa luego de tratamiento térmico 48 h / 870° C / horno. Pulido electro tico con reactivo Disa Electropol A - Ataque: Solución al 1 o/o de ácido p crico y reactivo de Work & Case.

G - microgrietas
P - grano poligonizado

x 1000

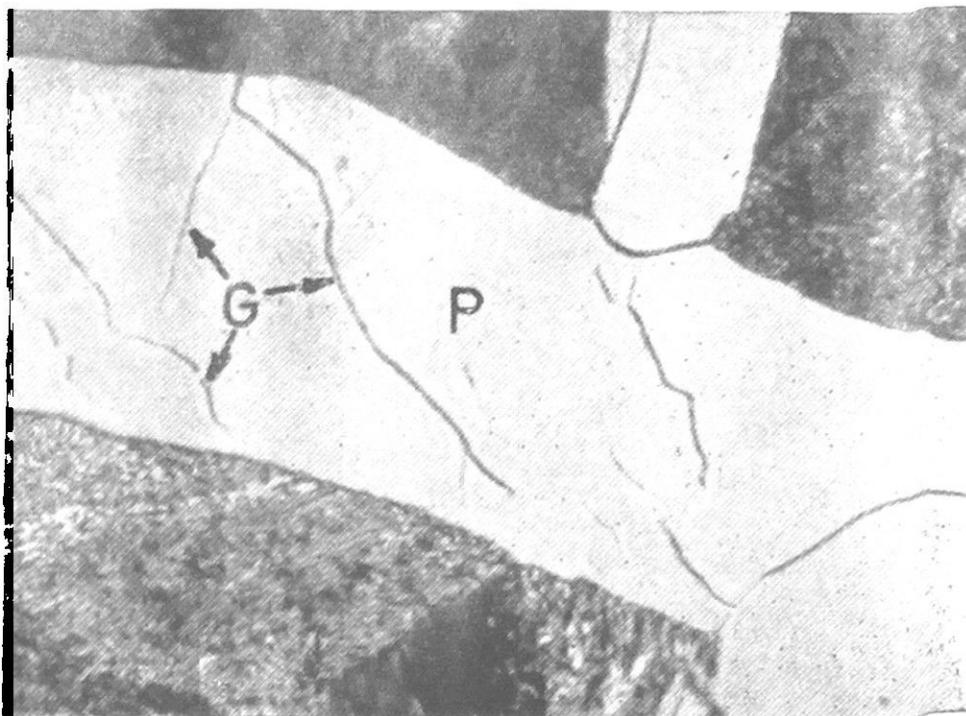


Fig. 6. Corte longitudinal de eje de ferrocarril. Pulido electrolítico con reactivo Disa Electropol A-2. Ataque: solución alcohólica al 1 o/o de ácido picrico y reactivo de Work & Case.

G - grietas
P - grano poligonizado

que la estructura de poligonización de los granos de ferrita persiste después del tratamiento térmico, lo que estaría de acuerdo con su identificación¹⁶. El aspecto punteado de los reticulados se debe, a que ellos están constituidos por acumulaciones de figuras de corrosión. Las mismas aparecen también fuera de esta ubicación, distribuidas homogéneamente sobre algunos granos. Algunos bordes de subgranos de poligonización se encuentran, a trechos, muy marcadamente teñidos, lo que se interpreta como inicio de separación del material (agrietamiento).

Las Figs. 6 y 7 muestran sendos cortes transversales de ejes de acero de ferrocarril con aumentos de 1000 y 500 diámetros respectivamente. En ellas puede distinguirse claramente, por su color negro intenso, los bordes de granos y de subgranos de poligonización, en que se ha iniciado una separación de material.

En un estudio del material de desguace del crucero Esmeralda se han encontrado en el árbol de la hélice, señales de fatiga similares. La Fig. 8 presenta un corte transversal de esta pieza con 500 aumentos. Se aprecian en ella, grietas intercristalinas y grietas transcristalinas que siguen bordes de subgranos de poligonización.

La Fig. 9 presenta con 1000 aumentos, un corte longitudinal aproximadamente diametral de un alambre de cobre duro perteneciente a un cable en que una hebra se rompió por fatiga. Se aprecian granos muy alargados, en que se insinúan algunas microgrietas. El aspecto al microscopio electrónico de réplicas del mismo material se presenta en las Figs 10 a 13. Las Figs 10 y 11 permiten apreciar campos estriados, campos cubiertos de figuras de corrosión y campos lisos, todos los cuales corresponden a subgranos. La formación de estos subgranos se atribuye a poligonización por fatiga. La Fig. 10 presenta además en los costados, una sucesión de subgranos alargados en forma casi paralela, que corresponden a maclas.

La Fig. 12 con 8000 aumentos, presenta una vista de bandas onduladas de deslizamiento que cruzan bordes de subgrano. Una visión de microgrietas a lo largo de bordes de grano y rodeando una inclusión, se presenta en la Fig. 13. En ella se insinúa sólo débilmente, la estructura fina de los granos, estando acorde las variaciones de inclinación del estriado con la existencia posible de una subestructura de poligonización.

DISCUSION

Las muestras examinadas dan cierto grado de evidencia micrográfica de poligonización producida por la aplicación de esfuerzos repetidos o alternados

de flexión y torsión, tanto en la ferrita como en el cobre. En tal hipótesis se podría explicar de un modo simple, el afinamiento de las líneas de los diagramas de difracción de rayos X. En efecto, la poligonización consiste en la transformación de un cristal deformado mecánicamente en varios subgranos o pequeños cristales de estructura cristalina perfecta¹⁶. De esta manera, los planos reticulares deformados, cuya intersección con un plano daría una línea curva, pasan a una nueva condición en la que la línea de intersección es quebrada, correspondiendo cada segmento de ella a un pequeño cristal o subgrano. Siendo, por otra parte, las líneas de los diagramas de difracción de cristales deformados, anchas, y la de los cristales perfectos, finas¹⁸, la suposición de poligonización hecha por los autores a partir de la observación metalográfica, estaría de acuerdo con los elementos de juicio sobre el avance del estado de fatiga que la cristalografía de rayos X aporta.

Como el mecanismo de formación de las subestructuras de poligonización ha sido explicado por una migración de dislocaciones, para que las sollicitaciones repetidas pudieran ocasionarlas, debieran dar movilidad a las mismas. Este punto ha sido demostrado por A. H. Meleka y A. V. Evershed¹⁹. Ellos se basan en el cálculo de la disminución de esfuerzo por cizalle necesario para la fluencia continua en monocristales metálicos por efecto de vibraciones superpuestas, hecho por F. Blaha & B. Langenecker²⁰. Un desarrollo termodinámico hecho por R. Jacquesson¹⁴ permite relacionar, por otra parte, la inyección a un metal de cuantos de energía de deformación plástica alternada, con su tendencia a experimentar transformaciones de estructura del tipo de la recristalización.

Bastaría para ello que se sobrepasaran ciertos umbrales o niveles mínimos de de trabajo mecánico absorbido y que la temperatura sea suficientemente elevada para permitir la propagación del fenómeno.

La formación de estructuras poligonizadas por fatiga, justifica asimismo la dureza intermedia entre el estado duro con acritud por trabajo en frío, y el estado blando, recristalizado, encontrado por D. S. Kemsley para cobre⁸, e interpretaría el concepto de recuperación (recovery) usado por este autor en relación con esta particularidad. Esta concepción se opone, sin embargo, al mecanismo que proponen W. A. Wood y R. L. Segall²¹. Estos autores dicen que el ablandamiento se produciría por el efecto de entalladura que la fatiga causa en la superficie de las probetas por una extrusión de metal a lo largo de bandas de deslizamiento.

Cabe añadir que en las aleaciones examinadas no se han podido observar los canales tubulares en bandas de deslizamientos, descritos por P. J. E. Forsyth¹.

x 500

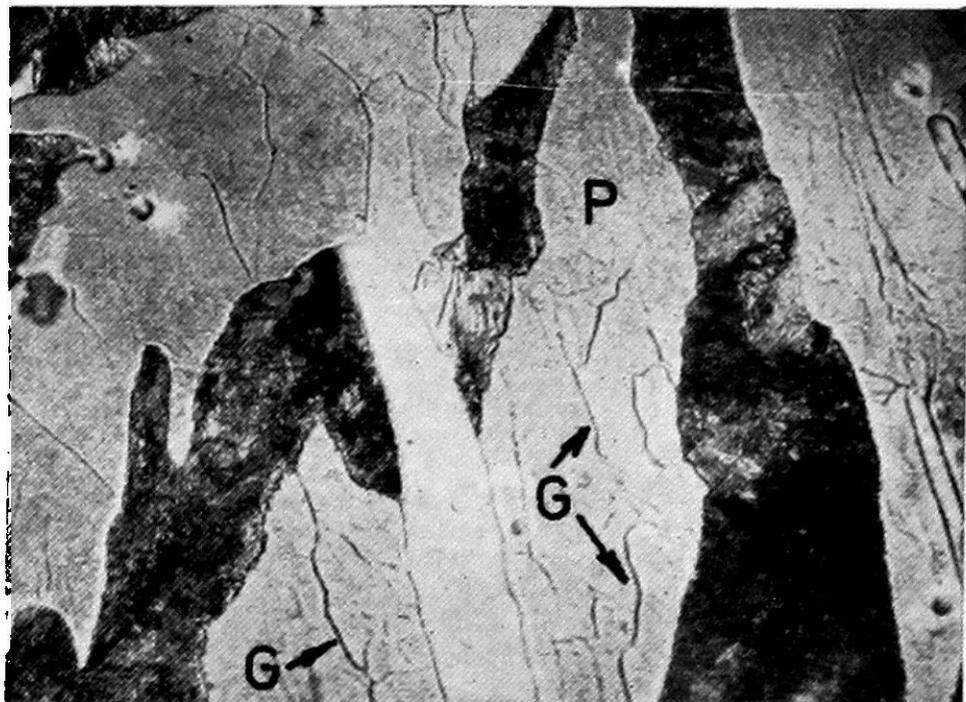


Fig. 7. Corte longitudinal de eje de ferrocarril. Pulido electrolítico con reactivo Disa Electropol A-2. Ataque: solución alcohólica al 1 o/o de ácido picrico y reactivo de Work & Case.

G - grietas
P - grano poligonizado

x 500

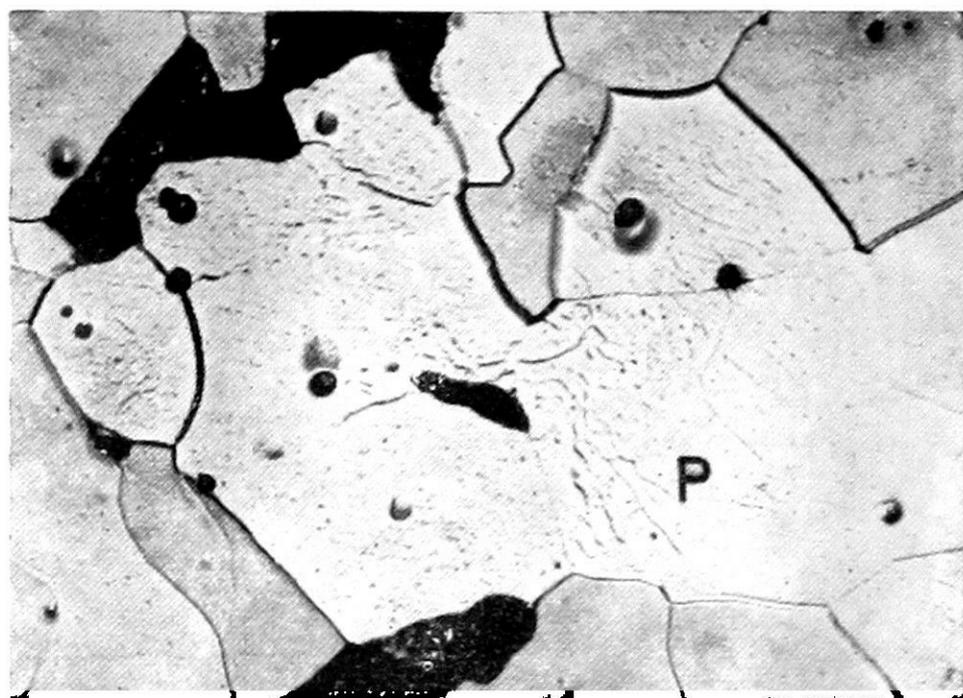


Fig. 8 Corte transversal del árbol del crucero Esmeralda. Pulido electrolítico con reactivo Disa Electropol A-2. Ataque: Nital 4 o/o.

x 1000

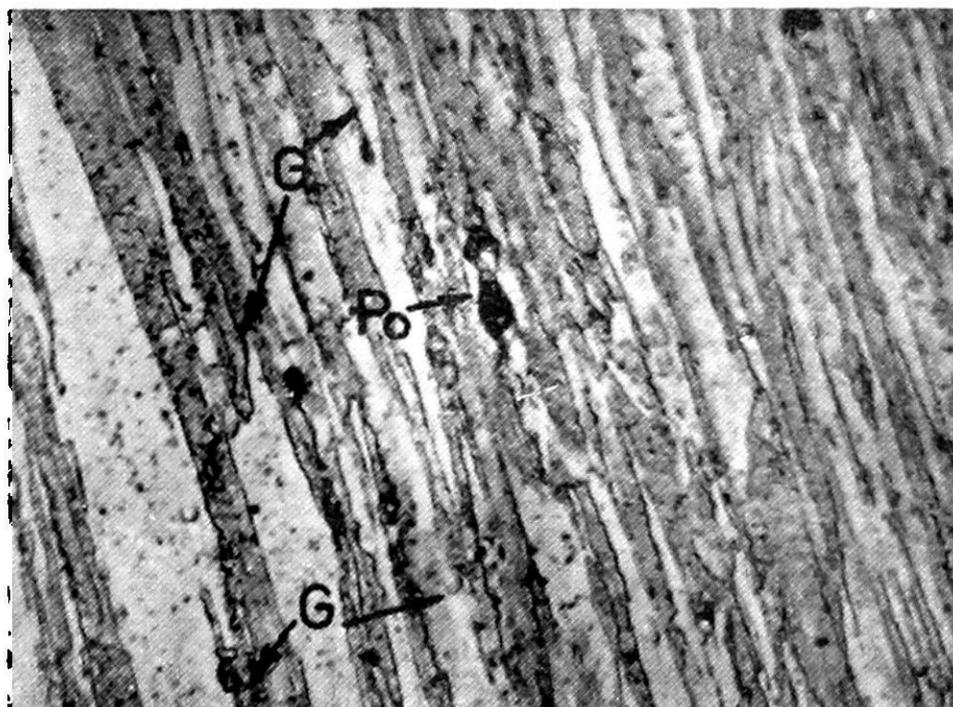


Fig. 9. Corte longitudinal de un alambre de cobre duro fatigado Pulido y ataque electrolítico con reactivo Disa Electropol D-2.

x 9000

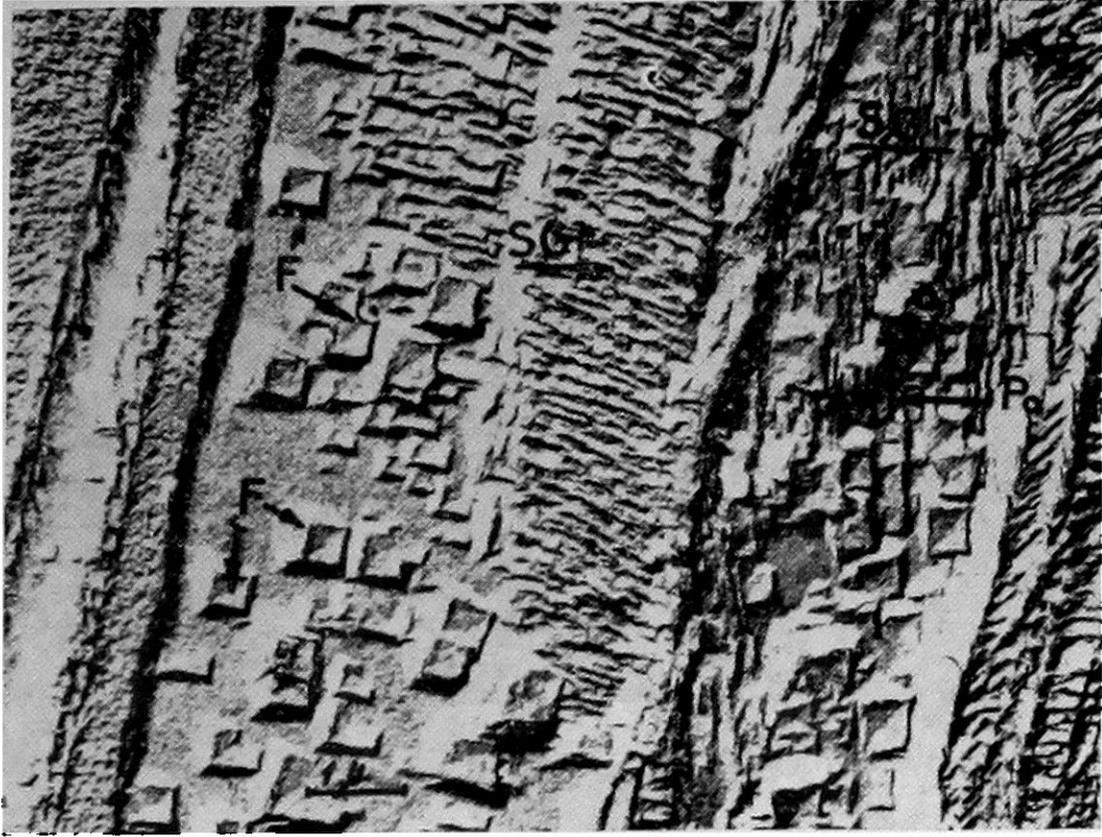


Fig 10. y 11.: Micrografías electrónicas de réplicas de cortes longitudinales de alambres de cobre duro fatigados.

- SGr - subgranos
- G - Microgrietas
- Po - poro
- F - microfigura de corrosión

x 17.500



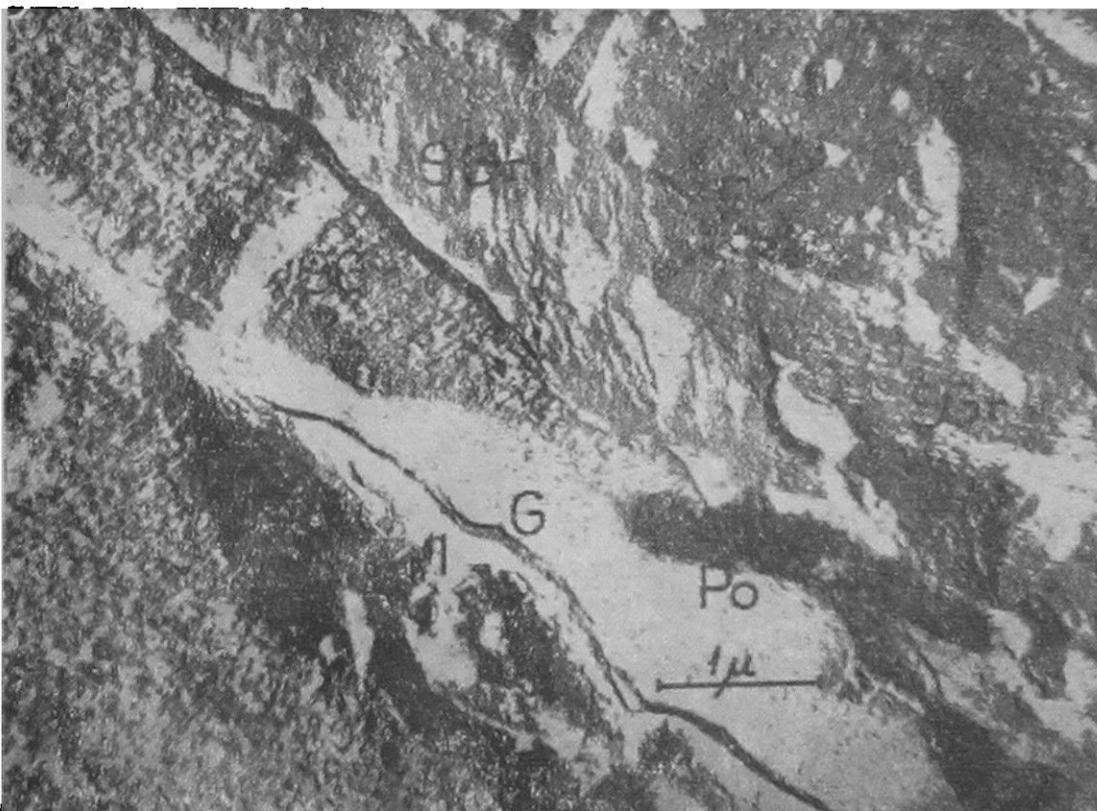
x 8.500



Fig. 12. y 13.: Micrografías electrónicas de réplicas de cortes longitudinales de alambres de cobre duro fatigados.

- SGr – subgranos
- G – microgrietas
- I – inclusiones
- Po – poro
- F – microfigura de corrosión
- B – banda de deslizamiento
- BSGr – borde de subgrano

x 19.000



Desde el punto de vista de las deformaciones y microgrietas, todos los metales alcanzaron el grado III de la escala de V. S. Ivanova².

CONCLUSIONES

- 1.- Se han observado evidencias metalográficas de poligonización en piezas de acero, suave, semi-suave y duro, así como en alambres de cobre, fatigados con períodos intermedios de reposo.
- 2.- La característica anotada permitiría explicar por efecto de fatiga el angostamiento de las líneas en los espectros de difracción de rayos X de metales duros por trabajo en frío. Asimismo, la poligonización proporciona una explicación para el ablandamiento por fatiga de los metales con acritud por trabajo en frío.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la entusiasta colaboración de la Sra. Irena DUMLER por las preparaciones para Microscopía Electrónica y del Sr. Juan FIGUEROA que realizó el trabajo metalográfico para Microscopía Óptica.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ver los excelentes resúmenes dados por:
G. E. DIETER Jr.: *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw - Hill, New York, Toronto, London 1961 p. 307 y siguientes; J. A. POPE: *Metal Fatigue*, Chapman & Hall, London 1959 p. 7 y siguientes; W. J. HARRIS: *Metallic Fatigue*, Pergamon Press, New York, Oxford, London, Paris 1961.
- 2.- V. S. IVANOVA: Etude de certaines Lois du Processus de Fatigue des Métaux, *Rev. Metallurgie* 55, Nº 6, p. 562, 1958.
- 3.- P. J. E. FORSYTH: Some Observations on the Nature of Fatigue Damage, *Phil. Mag.*, Ser. 8, vol. 2, Nº 16, p 437, 1957.
- 4.- F. WEVER. M. HEMPEL, A. SCHRADER: *Archiv. Eisenhüttenwes.*, 26 Nº 12, 1955.
- 5.- M. HEMPEL: *Verformungserscheinungen in Stählen*, Colloquium on Fatigue, Proceedings, Stockholm 25 - 27 Mai 1955, Springer-Verlag/Berlin - Göttingen - Heidelberg 1956.

- 6.- D. S. KEMSLEY: Crack Paths in Fatigued Copper, *Journ. Inst. Metals*, 1956-57 vol. 85 p. 420.
- 7.- D. S. KEMSLEY: Effects of Cyclic Stress and Frequency on Deformation Markings in Fatigued Copper. *Journ, Inst. of Metals*, Dec. 1956 p. 153.
- 8.- D. S. KEMSLEY: The Behaviour of Cold Worked Copper in Fatigue. *Journ. Inst. of Metals*, 1958-59, vol. 87 Sept. 1958 p. 10.
- 9.- A. H. MELEKA, W. BARR, A. A. BAKER: The effect of Persistent Slip Bands on the Fatigue of Copper, *Journ. Inst. Metals* Jan. 1961, T. N. 28 p. 176.
- 10.- W. J. CRAIG.: *An Electron Microscope Study of the Development of Fatigue Failures*, Proc. ASTM vol. 52 p. 877-889, 1962.
- 11.- S. TAIRA y K. HONDA: X-Ray Study of Fatigue Damage in Metallic Materials. Proc. 3rd Jap. Cong. Test. Mat. 1960 p. 56.
- 12.- S. TAIRA y K. HONDA: Fatigue Damage of Metals Under Varying Stress Amplitude. Proc. 4 th Jap. Cong. Test. Mat. 1961 p. 17.
- 13.- U. DEHLINGER, *Z. Metallkde* 44 1953 p. 240/2.
- 14.- R. JACQUESSON: *Modifications de Texture Cristalline Produites Par des Efforts Alternés*. Colloquium on Fatigue, Proceedings, op. cit.
- 15.- E. SCHMIDTMANN, H. F. KLARNER y H. SCHENK: Nackweiss von Versetzungen in Eisenlegierungen. *Arch. Eisenhüttenwes.* 32 Heft 11 (November 1961) p: 769.
- 16.- J. TALBOT: Etude des Phénomènes de Polygonisation et leurs Applications Pratiques, *Chimie et Industrie*, vol. 75 N° 3, Mars 1956.
- 17.- J. TALBOT: *Nouvelles Propriétés Physiques et Chimiques des Métaux de très haute Pureté*, Colloques Internationales de C. N. R. S. Paris 12-14 Octobre 1959, C. N. R. S. 1960.
- 18.- R. GLOCKER: *Materialprüfung mit Röntgenstrahlen unter besonderer Berücksichtigung der Röntgenmetallkunde*, 4 Aufl. Berlin/ Göttingen Heidelberg 1958.
- 19.- A. H. MELEKA y A. V. EVERSLED: The Dependence of Creep Behaviour of a superimposed Fatigue Stress, *Journ. of the Inst. of Met.*, May 1960, p. 407.
- 20.- F. BLAHA y B. LANGENECKER, *Acta Met.* 7, 1959, p. 93.
- 21.- W. A. WOOD y R. L. SEGALL: Softening of Cold Worked Metal by Alternating Strain. *Journ. Inst. Met.*, Jan. 1958 p. 225.

**MODIFICATION OF METAL STRUCTURE
BY FATIGUE**

SUMMARY:

In different uses of steel and copper as engineering materials, repeated or alternated stresses seem to lead to poligonization substructures.

Poligonization would explain the increasing sharpness of X ray Diffraction lines of cold worked metal, as fatigue progresses. Also it would explain softening of such metals due to fatigue.