

Evaluación de la fase magnética en acero inoxidable AISI 304 trabajado en frío y su recuperación por tratamiento térmico

Evaluation of the magnetic phase in stainless steel AISI 304 worked in cold and its recovery by heat treatment

Eusebio Dionicio P.*, Oswaldo Gonzales R.*, Víctor A. Vega G.*, Edgardo Tabuchi M.*, Héctor Villacorta A.*

RESUMEN

El proyecto de investigación: Evaluación de la fase magnética en acero inoxidable AISI 304 trabajado en frío y su recuperación por tratamiento térmico, ha determinado que el material al ser sometido a cargas por compresión se magnetice, aumentando la dureza y transformándose parcialmente la estructura austenita en martensita.

El material de estructura transformada fue sometido a tratamiento térmico a 700 °C y 800 °C respectivamente, lo que originó la recuperación de la estructura.

Palabras clave: Aceros inoxidables metaestables, transformación por deformación en frío, transformación en martensita, recuperación de fase por tratamiento térmico.

ABSTRACT

The Project of Investigation called: Evaluation of the magnetic phase in Stainless steel AISI 304, worked in cold and its recovery by Heat Treatment has determined that the material of testing submitted to loads by compression is magnetized, which increasing its hardness and transforming partially the austenitic structure in martensitic.

The material of transformed structure was submitted to heat treatment to 700 °C and 800 °C respectively which origins the recovery of the structure.

Keywords: Metaestable stainless steel, Transformation by deformation, Induced martensitic, Heat treatment.

* Docentes de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
E-mail: edionisiop@unmsm.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Descripción del material

Aceros al cromo-níquel inoxidables

La introducción de una cantidad suficiente de níquel en el acero 18% cromo lo hace austenítico, lo que asegura mejores propiedades mecánicas, menor tendencia al crecimiento del grano y lo hace más resistente a la corrosión y no frágil en frío.

Los aceros inoxidables con 18% de Cr y el 10% de Ni son los que más se emplean en la construcción de maquinaria, en artículos de empleo masivo, en la arquitectura, etc.

La formación de fases en las aleaciones cromo-níquel inoxidables la da el sistema Fe-Cr-Ni.

La figura 1 representa el corte horizontal a 650° C del sistema Fe-Cr-Ni.

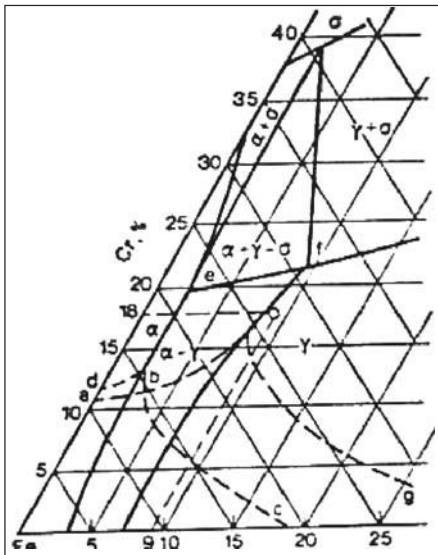


Fig. 1. Ángulo correspondiente al hierro del sistema Fe - Cr - Ni. Las líneas de trazo continuo representan el corte isotérmico a 650° C.

(líneas continuas). Las regiones de una sola fase \bar{a} y \acute{a} están separadas por la de dos fases $\bar{a} + \acute{a}$ cuando el contenido de cromo sobrepasa el 20% aparece la fase j (compuesto químico FeCr). La posición de la región de dos fases $\bar{a} + \acute{a}$ depende de la temperatura. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 650° C, la región $\bar{a} + \acute{a}$ se desplaza hacia la derecha y su posición extrema, a 20° C, se indica por medio de las líneas punteadas que terminan en los puntos c y g; y cuando la temperatura se eleva, esta región se desplaza hacia la izquierda y su posición extrema, a 1100° C, se indica por medio de las líneas punteadas que terminan en los puntos a, d.

De aquí se deduce que las aleaciones que se encuentran por debajo de la línea abc tienen recristalización $\bar{a} = \acute{a}$ completa con la estructura de ferrita a la

temperatura ambiente. Entre las líneas abc y defg están comprendidas las aleaciones semiferríticas (o semiausteníticas) con transformación $\bar{a} = \acute{a}$ parcial. Las aleaciones que se hallan a la izquierda de la línea be son ferríticas, y las que están a la derecha de fg son las austeníticas.

Las aleaciones 18-9 están representadas en este sistema por un punto. No es difícil ver para obtener, con un 18% de Cr, la estructura austenítica, deberá haber necesariamente un 9% de Ni; si disminuye el contenido de níquel, la aleación será de dos fases en todo el intervalo de temperaturas, incluida la temperatura ambiente. El aumento del cromo (por encima del 18%, siendo del 9% el contenido de Ni) conduce a los mismos resultados. Cuando el contenido de cromo es menor que 14-15%, en la estructura aparece la fase \acute{a} ; a temperaturas inferiores a 650° C, la formación de la fase transcurre según el mecanismo martensítico.

La austenita del acero con 18% de Cr y el 8-10% de Ni es inestable; su enfriamiento en la región de temperaturas negativas o la deformación plástica a la temperatura ambiente hacen que se forme martensita.

Influencia de la acritud

La acritud, provocada por la deformación en frío de los aceros austeníticos, causa un endurecimiento mucho mayor que el que aparece en los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos con el mismo tipo de deformación. Este endurecimiento puede atribuirse, en parte, a la inestabilidad de la austenita que se transforma parcialmente en martensita, contribuyendo a un endurecimiento excepcional del metal. Sin embargo, esta transformación no es la única causa del endurecimiento, pues este aparece incluso en los aceros que contienen 25% de níquel cuya austenita es perfectamente estable.

La relación entre los contenidos de los tres elementos: C, Ni y Cr determinan el grado de endurecimiento. En un acero del tipo 18 - 8 el endurecimiento aumenta con el contenido de carbono de 0,04 a 0,10% por encima de esta cantidad, la acción del carbono es despreciable.

Un aumento del contenido de níquel tiene como efecto el estabilizar la austenita, oponiéndose a su transformación parcial en martensita. El cromo actúa en el mismo sentido; estabiliza la austenita haciendo la transformación más lenta. El molibdeno y el silicio influyen de la misma manera.

Cuando aparece una transformación martensítica, la influencia de la acritud se manifiesta no solo bajo la forma de un endurecimiento, sino también por un aumento de la permeabilidad magnética. Esto último se ha obtenido de un estudio hecho por Post y Eberle sobre dos aceros inoxidables, al estado de

recocido, completamente austeníticos y magnéticos (permeabilidad 1,003-1,007). La comparación de la influencia de las deformaciones sobre la permeabili-

dad magnética por un lado y sobre la carga de rotura por otro, permitió a los autores citados el efectuar una evaluación de la estabilidad de la austenita.

Influencia de la acritud sobre las características mecánicas y magnéticas de aceros austeníticos.

Deformación %	Dureza	Carga de rotura (kgf/mm ²)	Alargamiento (sobre 2") %	Permeabilidad magnética		
				H = 5	H = 100	H = 200
Acero M: % C = 0,047/% Mn = 0,42/% Cr = 17,40 / % Ni = 8,38						
0	80 Rb	70,5	52,9	1,004	1,005	1,0046
3,9	25,5 Rc	84	37,5	1,145	1,145	1,198
13,6	34 Rc	100	24,8	9,68	10,95	10,40
23,2	40 Rc	116,5	16,3	28,3	24,8	19,5
38,8	43,5 Rc	142	5	77	59,3	37,5

Acero N: % C = 0,108/% Mn = 2,27/% Si = 0,90 / % Cr = 24,33 / % Ni = 20,63						
0	89 Rb	76	38,7	1,0018	1,0027	1,0035
14,7	29 Rc	90	18,9	1,0016	1,0028	1,0041
26,8	35 Rc	109	9,5	1,0018	1,0027	1,0043
37	37,5 Rc	118	7,4	-----	-----	-----
50,5	40 Rc	125	4,5	-----	-----	-----
64,2	41 Rc	135	3,5	1,0019	1,0029	1,0041

La transformación martensítica

La transformación martensítica provocada por la acritud ha sido objeto de numerosos estudios. Se ha encontrado que bajo la acción de una deformación la martensita puede formarse por encima del punto Ms y se ha determinado una temperatura, Md (Md > Ms), $Md_{30} = 413 - 462(C+N) - 9.2(Si) - 8.1(Mn) - 13.7(Cr) - 9.5(Ni) - 18.5(Mo)$ por encima de la cual no puede producirse ninguna transformación, sea cual sea la deformación. La cantidad de martensita formada depende, al mismo tiempo, del grado de deformación y de la temperatura. La figura 2 da una serie de curvas típicas que indican la cantidad de martensita en función del alargamiento efectivo (L_n / l_0). Se observa que la cantidad máxima de austenita transformada es tanto mayor cuanto menor es la temperatura, sin que nunca sea completa la transformación. Por su lado la temperatura Md está bastante mal determinada, pues depende de la velocidad de transformación.

Ciertos estudios cristalográficos han permitido revelar durante estas transformaciones la presencia de una nueva fase de red hexagonal, al lado de la fase \bar{U}

de red cúbica centrada en el cuerpo. El retorno a la estructura austenítica ocurre durante el calentamiento a partir de 500 °C. Los factores que influyen sobre la transformación martensítica son numerosos. Además de la composición del acero y de su estructura inicial, los más importantes son: el grado, al forma y la velocidad de deformación y, evidentemente, la temperatura. La complejidad del fenómeno explica las discrepancias entre las diferentes observaciones efectuadas.

Esta transformación se observa a menudo durante la fabricación de los aceros inoxidables: embutición, trefilado, rectificado o pulido mecánico. Se ha observado incluso la aparición de una fase \bar{a} superficial, parecida a la que se obtiene por compresión, durante el pulido electrolítico de una austenita poco estable; la aparición de esta fase se explica pensando que ocurre una modificación del equilibrio de las tensiones superficiales, que libera suficiente energía mecánica para provocar la transformación. Al contrario de una martensita, esta fase \bar{a} se forma a una velocidad perfectamente mesurable por cinematografía y presenta las características metalográficas de una bainita.

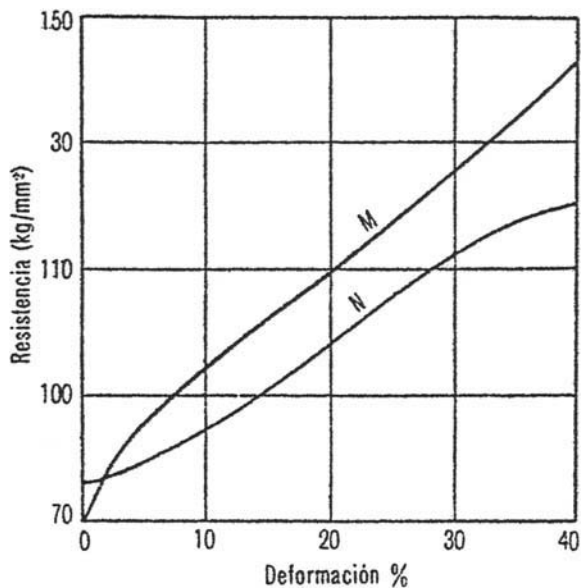


Fig. 2. Influencia de la acritud de los aceros austeníticos cromo-níquel sobre la carga de rotura.

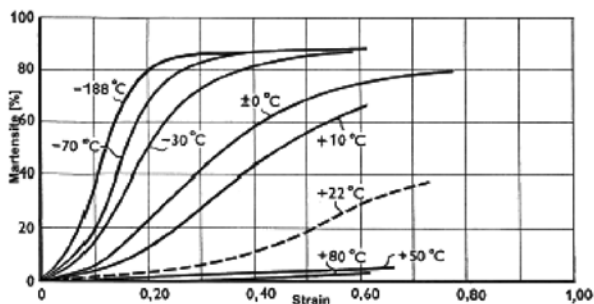


Fig. 3. Formación de martensita en un acero austenítico del tipo 18-8 en función del alargamiento y a temperaturas diversas.

JUSTIFICACIÓN

Una de las principales razones es explicar la formación de la fase martensita en los aceros inoxidable metaestables que son trabajados en frío.

Una vez formada la fase no deseada, debe encontrarse una solución al problema mediante la regeneración de los granos deformados y la transformación de la fase martensita en austenita, es decir la recuperación del material mediante tratamiento térmico.

OBJETIVOS

El proyecto de investigación debe determinar las estructuras que se forman debido al esfuerzo al que se somete el material acero inoxidable AISI 304.

La reducción del espesor del material por carga aplicada es del 37,5% para conseguir magnetismo y transformación apreciable de martensita.

En una segunda etapa las probetas sometidas a carga y vista su estructura serán sometidas a trata-

miento térmico para la recuperación de la estructura original a fin de determinar la temperatura mínima de recuperación y el proceso aplicado.

MATERIAL, EQUIPOS Y MÉTODOS

Para el presente estudio de investigación ha sido necesario disponer de lo siguiente:

Material: Plancha de acero inoxidable AISI 304 de 4 mm de espesor para la confección de probetas de 10 x 10 x 4 mm.

Equipos: Para la prueba de embutido se ha empleado la máquina de ensayos universales de 50KNI, marca Shimatzu.

Para el pulido de las probetas se ha utilizado la máquina de pulido que utiliza lijas como medio abrasivo y para el ataque electrofítico se ha utilizado el equipo de electrólisis.

Para el ensayo de tratamiento térmico se ha usado un horno eléctrico hasta 1200 °C, control de temperatura y medición de temperatura con termocupla.

Métodos: Para la prueba de embutido se ha utilizado pastillas del material (4 probetas con una altura aproximado de 16 mm), para luego ser comprimido a 6 mm mediante carga registrada por la máquina de ensayos universales.

Para ver la estructura del material de los ensayos ha sido necesario preparar las probetas con resina poliéster, posteriormente ser pulido y ataque electrofítico, la solución de ataque ha sido con 10% de ácido oxálico. La toma de microfotografía se ha efectuado a 200 aumentos.

Para el tratamiento térmico se tuvo que efectuar pruebas preliminares a temperaturas bajas, 250 °C, 300 °C, 500 °C y diferentes tiempos a fin de recuperar la estructura y la desaparición del magnetismo, no hubo resultados aceptables.

Se ensayó recocidos a 700 °C y 800 °C durante 8 horas y se sometió a un temple severo, con resultados aceptables.

RESULTADOS

a) Medición de dureza

Probeta N° 1 material acero inoxidable AISI 304 Promedio 196 vickers (91 HRB).

Probeta N° 2 material comprimido, totalmente magnético.

Promedio 287 vickers (2 B).

b) Tratamiento térmico

Para la recuperación de los granos deformados y la estructura fue necesario someter a tratamiento térmico la probeta N° 2, el cual consistió:

Una probeta fue sometido a recocido durante 8 horas a 700 °C, para luego hacer el temple severo en agua. La estructura metalográfica se puede observar en la microfotografía N° 3.

Otra probeta fue sometido a recocido durante 8 horas a 800 °C, para luego hacer el temple severo en agua. La estructura metalográfica se puede observar en la microfotografía N° 4.

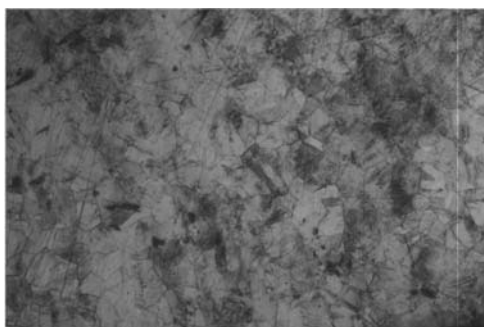
c) Microestructuras

Las microestructuras de las probetas aparecen en las microfotografías 1, 2, 3 y 4 observándose lo siguiente:

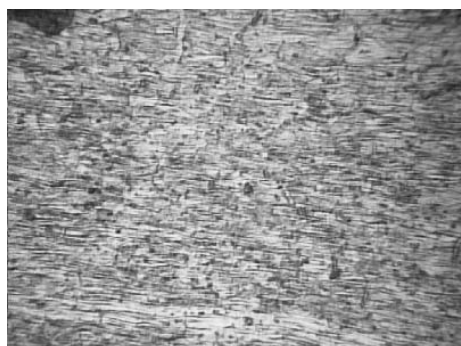
N° microfotografía	Estado	Observación al microscopio
1	Sin compresión	La microestructura es típicamente austenítica propia de los aceros AISI 304
2	Con compresión (6mm)	Se observa la deformación de los granos, y el material es magnético
3	Tratamiento térmico 700 °C	Se observa la recuperación de los granos y la fase austenítica
4	Tratamiento térmico 800 °C	Se observa la recuperación de los granos y la fase austenítica



Microfotografía N° 1. Acero Inoxidable. AISI 304. Microestructura: Austenítica. Ataque: Electrolítico, 10% de solución de ácido oxálico.



Microfotografía N° 3. Tratamiento térmico de la probeta No 2 a 700°C, se observa la recuperación de los granos y la fase austenítica. Ataque: Electrolítico, 10% de solución de ácido oxálico, 200X.



Microfotografía N° 2. Se observa la mayor deformación de los granos. Ataque: Electrolítico, 10% de solución de ácido oxálico, 200X.



Microfotografía N° 4. Tratamiento térmico de la probeta N° 2 a 800°C, se observa la recuperación de los granos y la fase austenítica. Ataque: Electrolítico, 10% de solución de ácido oxálico, 200X.

CONCLUSIONES

El material acero inoxidable AISI 304 al ser sometido a carga para la reducción de espesor de 4 mm a 2.5 mm se magnetiza, presentando deformación de grano y formación de la fase martensita.

El material de granos deformado (probeta original de 10x10x4 mm) y fase martensita ha sido recuperado mediante el tratamiento térmico a una temperatura mínima de 700 °C, cuyo proceso es un recocido durante 8 horas y temple severo en agua. La estructura observada indica la regeneración de los granos y fase austenítica.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.P. Guliar (1978). *Metalografía*. Tomos 1 y 2, Editorial MIR Moscú.
2. ASM Handbook Committee (1973). *Metallography, structures and phase diagrams American Society for Metals*. USA.
3. Mars G. Fontana, Norbert D. Greene (1978). *Corrosion engineering*. McGraw-Hill Book Company.
4. National Association Corrosion Engineers (1974). *Nace basic corrosion course*. Houston, Texas.
5. J. Hochmann (1968). *Aceros inoxidables / Aceros refractarios*. Ediciones URMO, España.

6. G. Conde y Santiago (1971). *Aceros inoxidables, refractarios y criogénicos*. Edit. Blume, España.
7. ASM (1998). *Advanced materials and proceses*. Vol. 153, N° 2.
8. NACE - International / The corrosion society (2000). *The Journal of Science and Engineering Corrosion*. Vol. 56, N° 6.