

Influencia de la temperatura de nitruración sobre la resistencia a la corrosión fatiga en una solución salina de un acero 316L nitrurado por plasma

Influence of nitriding temperature on fatigue corrosion resistance in a saline solution of a plasma nitrided steel 316L

Alex Fabián Díaz Díaz¹ | Segundo Jáuregui Rosas² | Billy Ray Chávez Vásquez³ | Malena Elizabeth Campos Alfaro⁴

RESUMEN

En este trabajo se determinó el efecto de la temperatura de nitruración en la resistencia a la corrosión fatiga del acero inoxidable AISI 316L en una solución al 3.5% de NaCl. El tratamiento de nitruración por plasma se realizó en una atmósfera de 25% de N₂ + 75% de H₂, durante 10 horas a una presión de 650 Pa, con deposición previa en una atmósfera de 50% N₂ + 50% H₂ durante 2 horas a 300 Pa, a las temperaturas de 430, 480, 530 y 580 °C. Se caracterizaron las probetas a través de su espesor de capa nitrurada, propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y perfil de microdureza) y resistencia a la corrosión-fatiga. Los ensayos de corrosión fatiga se realizaron en probetas cilíndricas lisas sin entalla ($K_t=1.05$), a esfuerzos de amplitud constante por flexión plana reversible ($R=-1$) a 47 Hz. Se observó que la profundidad de la capa nitrurada y la máxima dureza, mantienen un comportamiento creciente con la temperatura de nitruración; así mismo se logró un mejoramiento en las propiedades de tracción. Midiendo el número de ciclos (N) a una carga específica (S), se obtuvieron las curvas Wöhler ($S-N$), mostrando que la nitruración por plasma aumenta la resistencia a la corrosión fatiga a $N < 4 \times 10^6$ ciclos y lo reduce a $N > 8 \times 10^6$ ciclos, eliminando el límite de fatiga. Este comportamiento está relacionado con las mejoras en propiedades mecánicas y la pérdida en resistencia a la corrosión, generado por este tratamiento.

Palabras clave: Nitruración por plasma, Capa nitrurada, Corrosión fatiga.

ABSTRACT

In this research, the effect of the temperature of nitriding on the corrosion fatigue stress in a stainless steel AISI 316L in a solution of 3.5% of NaCl has been determined. The plasma nitriding treatment was performed at 430, 480, 530 and 580°C, in a 25% de N₂ + 75% de H₂ gas mixture during 10 hours at pressure of 650 Pa, with 2 hours of previous sputtering in 50% N₂ + 50% H₂ gas mixture at pressure of 300 Pa. The samples have been characterized through their thickness of nitrided layer, mechanical properties and corrosion fatigue resistance. The corrosion fatigue test were carried out in smooth cylindrical samples ($K_t=1.05$) at constant amplitude plane reversed bending ($R=-1$) at 47Hz. The thickness of nitrided layers and maximum hardness increased with nitriding temperature, and better tensile properties were observed. A constant cyclic stress amplitude (S), was applied to a specimen, and measuring the number of cycles (N), until the specimen failed the curve Wöhler ($S-N$) was determined. The $S-N$ curves showed that the plasma nitriding improves the corrosion fatigue resistance at $N < 4 \times 10^6$ cycles and reduces it at $N > 8 \times 10^6$ cycles. This behaviour is related to the better mechanical properties and the loss in corrosion resistance generated by this treatment.

Key words: Plasma nitriding, Nitrided layer, Corrosion fatigue

1. INTRODUCCIÓN

Acorde a estudios realizados las décadas pasadas en entre un 80-90% de todas las fallas estructurales ocurren a través de un mecanismo de fatiga, con un costo anual estimado de 1.5 billones de dólares solo en Estados Unidos, por lo que es de suma importancia el estudio de este tipo de mecanismo desde el punto vista científico y tecnológico¹. La corrosión fatiga se define como la falla bajo cargas cíclicas en medios corrosivos (acuoso o gaseoso). El proceso se divide en dos etapas: iniciación y propagación de fisura. Generalmente las fisuras por fatiga se inician sobre las superficies en regiones altamente deformadas (inhomogeneidades) tales como bandas de deslizamiento, bordes de grano e inclusiones no metálicas². Los mecanismos de falla por fatiga incluyen: microdeformación plástica, iniciación de microgrietas, propagación o coalescencia de microgrietas para formar macrogrietas, propagación de macrogrietas hasta la falla final³. No existe un mecanismo que explique adecuadamente la iniciación de fisura por corrosión fatiga, dependiendo del material y las condiciones de servicio⁴.

Los Aceros Inoxidables son una gama de aleaciones que contienen un mínimo de 11% de Cromo. El Cromo forma en la superficie del acero una película pasivante, extremadamente delgada, continua y estable; esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas, siendo la característica principal la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables⁵. Los aceros inoxidables austeníticos presentan una excelente plasticidad y resistencia, aún a temperaturas muy bajas, así como una alta resistencia a la corrosión. Sin embargo en procesos tales como soldadura y tratamientos térmicos se debe tener en consideración los rangos de temperatura y composición química (contenido bajo de carbono) debido a la precipitación de fases intermetálicas, como carburos de cromo ($M_{23}C_6$) que producen fractura por corrosión intergranular⁶. En el comportamiento de los aceros inoxidables frente a la corrosión fatiga, el proceso de iniciación de fisura ocurre en inhomogeneidades sobre la superficie del acero, por lo que la modificación de las propiedades superficiales mediante tratamientos adecuados, pueden mejorar el comportamiento frente a la corrosión fatiga⁷.

La nitruración por plasma es un tratamiento termoquímico que permite obtener esfuerzos de compresión y un elevado gradiente de dureza que contribuye a mejorar la resistencia mecánica, resistencia al desgaste, a la corrosión, a la fatiga y a la corrosión fatiga⁸. El acero inoxidable AISI 316L es ampliamente usado en la industria química y petroquímica, debido a que ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento^{9,10}.

También se usan en la industria de alimentos¹¹ y bebidas¹² y en la industria farmacéutica¹³, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo¹⁴⁻¹⁶.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material objeto de estudio es el acero inoxidable austenítico AISI 316L fabricado por la empresa sueca Avesta Sheffield en forma de barras trabajadas en caliente (forjadas) de 20 mm de diámetro y 1 m de longitud, cuya composición nominal es:

Tabla I. Composición química del acero AISI 316L.

Elemento	Fe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
%	69.00	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	10-14	16-18	2.0

Fuente: Norma AISI. Clasificación de Aceros.

Este acero inoxidable, esta aleado al cromo - níquel - molibdeno, con alta resistencia a la corrosión inter cristalina a temperaturas hasta 400°C¹⁷. Siendo más resistentes a ácidos con efectos reductores como ácido sulfúrico diluido y ácido clorhídrico, y a medios causantes de corrosión por picaduras, y por tensiones, que otros aceros 18/8 sin molibdeno¹⁸.

2.2. Diseño experimental

Cada grupo de ensayo fue dividido en 5 subgrupos correspondientes a cada temperatura de nitruración y grupo testigo. El número de probetas en total fue de 90, aplicándose un diseño unifactorial, teniendo como variable a la temperatura, con 4 niveles: 430°C, 480°C, 530°C, 580°C, siendo la variable dependiente la resistencia a la corrosión fatiga, medida con los ensayos de fatiga, microdureza, caracterización microestructural y tracción del material.

2.3 Preparación de probetas

Con el material en estudio acero AISI 316 L, se maquinaron probetas de diferente geometría para los respectivos ensayos:

Para los ensayos de tracción, se prepararon probetas de acuerdo a la norma ASTM E-8M 97¹⁹ y cuyas dimensiones se muestran en la siguiente figura.

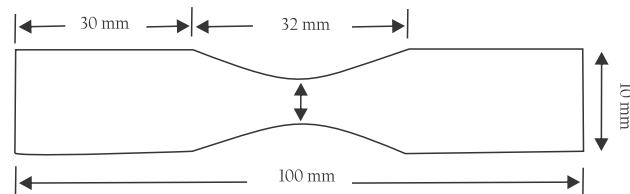


Figura 1. Geometría y dimensiones de probetas utilizadas para ensayos de tracción.

Fuente: Elaboración Propia.

Para realizar los ensayos de metalografía y perfil de microdureza, se utilizaron probetas de 10 x 25 mm, las cuales fueron recortadas de la probetas de tracción después de realizados estos ensayos.

Para los ensayos de corrosión fatiga se maquinaron probetas sin entalla ($K_t = 1,05$), de las formas y dimensiones mostrados en la figura 2, acopladas a la máquina de fatiga por flexión completamente reversible ($R=-1$) del laboratorio de Física de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo.

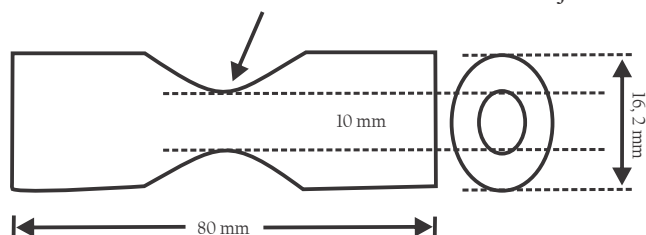


Figura 2. Geometría y dimensiones de probetas ensayadas en corrosión fatiga.

Fuente: Elaboración Propia.

Después de maquinadas, todas las probetas fueron sometidas a un tratamiento de recocido de disolución a 1050°C durante 30 minutos y enfriamiento en agua a temperatura ambiente para eliminar precipitados o tensiones residuales generadas durante el maquinado; este tratamiento se realizó en un horno eléctrico BRASIMET serie K400 (T° max: 1300°C), luego del cual las superficies de trabajo fueron desbastadas con papeles de carburo de silicio (SiC) de diferente granulometría (de 100 a 4000). Los tratamientos de nitruración se realizaron en los Laboratorios IONAR S.A. (Buenos Aires - Argentina), en una atmósfera de 25% de N_2 + 75% de H_2 , durante 10 horas a una presión de 650 Pa, con depasivación previa en una atmósfera de 50% N_2 + 50% H_2 durante 2 horas a 300 Pa.

Los ensayos de tracción de las probetas recocidas y nitruradas a diferentes temperaturas, cuyas superficies tuvieron un acabado superficial con lija de granulometría N° 4000 se realizaron en una máquina AMSLER (10 Ton), de acuerdo a la norma ASTM E-8. La determinación de las microestructuras del material en condición de recocido y nitruradas a diferentes temperaturas, se realizaron con probetas preparadas hasta un pulido final con alúmina de $\frac{1}{4}$ μ m. Las observaciones y tomas micrográficas se hicieron con un microscopio óptico NEOPHOT 21.

La profundidad de la capa nitrurada para cada temperatura de trabajo se determinó usando el criterio de microdureza (50 HV sobre el valor de la matriz) propuesto por Klaren²⁰, para lo cual se utilizó un microdurómetro MICROMET 2003 con una carga de 0,025 Kg. Los ensayos de corrosión fatiga para cada probeta se realizaron en una máquina de fatiga por flexión completamente reversible ($R=-1$) con amplitud de

esfuerzos constantes, aplicando una tensión cíclica S (Mpa) y midiendo el número de ciclos (N) necesarios para la fractura a una frecuencia de 50 Hz a temperatura constante.

1. Anillos O Ring.
2. Manguera de circulación de entrada de flujo.
3. Manguera plástica portadora de solución.
4. Manguera plástica portadora de solución.
5. Capa de pegamento.

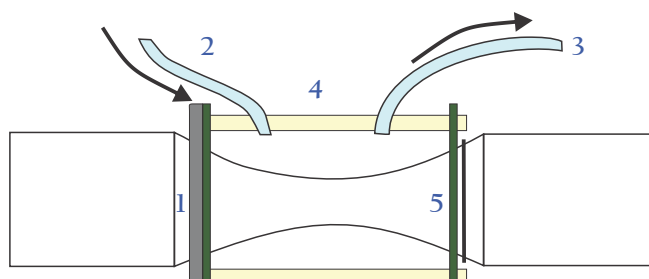


Figura 3. Disposición de la probeta en la máquina de fatiga por flexión plana completamente reversible del Laboratorio de Física de Materiales-UNT.

Fuente: Elaboración Propia.

A dicha máquina se acopló una celda por la que fluía una solución salina que estaba en contacto con la muestra (figura 3). Si el número de ciclos era igual o mayor a 2×10^7 y no rompía la probeta se consideraba que tenía vida infinita. Este procedimiento se repitió con cada probeta de los grupos experimentales y testigo, para diferentes valores de S, obteniéndose las correspondientes curvas Whöler ($S-N$)²¹.

Para observar el inicio y propagación de fisuras producidas durante los ensayos de corrosión fatiga, se cortaron las probetas ensayadas longitudinal y transversalmente a 5 mm de la zona de fractura, se limpiaron en ultrasonido (modelo Bandelin Sonorex) con acetona de alta pureza durante un tiempo de 15 minutos y se encapsularon usando resina epóxica. En un microscopio electrónico de barrido Philips 500 con EDAX del Departamento de Materiales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Buenos Aires-Argentina, se hicieron las observaciones y microfotografías respectivas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Microestructura

En la figura 4a se muestra la microestructura del acero inoxidable AISI 316L sin tratamiento de nitruración en estado de suministro (figura 4a) y en estado de recocido a 1050 °C durante 30 min (figura 4b) atacados con una solución de 20% HCl + 35% HNO₃ +

45% H₂O (% en volumen). La probeta recocida muestra granos austeníticos de mayor tamaño respecto a la probeta en estado de suministro.

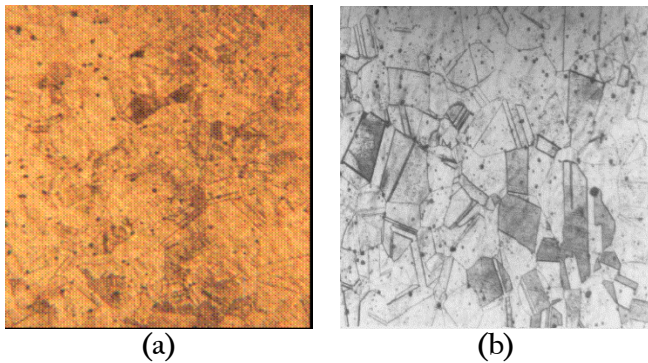


Figura 4. Microestructura del acero inoxidable AISI 316L en condición de (a) suministro y (b) recocido a 1050°C durante 30 min y enfriado en agua. MO: 250X Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras 5 (a-d) se muestran la microestructura del material nitrurado por plasma a diferentes temperaturas. En estas microfotografías se observan una zona bien definida correspondiente a la capa nitrurada y cuyo espesor muestra un comportamiento creciente con la temperatura de nitruración; no se observan cambios aparentes en la microestructura del material base.

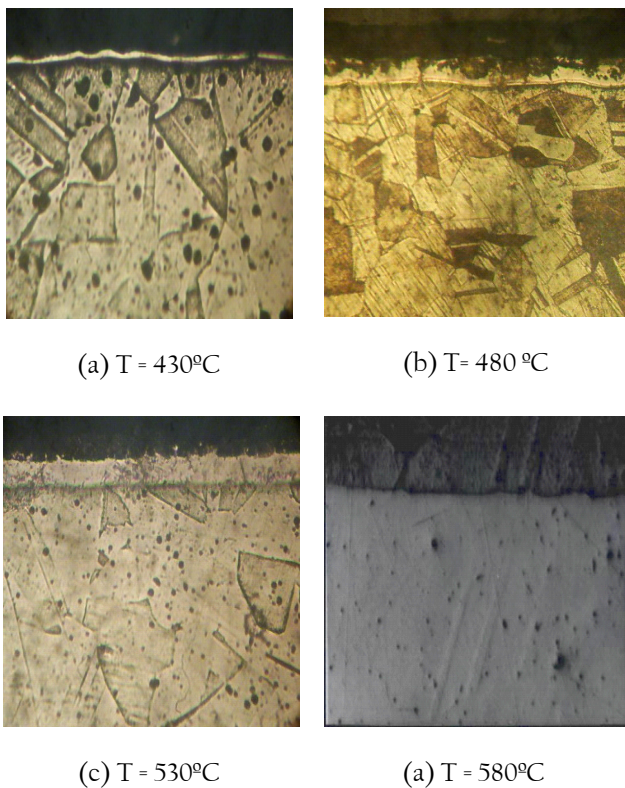


Figura 5. Microestructura del acero AISI 316L nitrurado por plasma durante 10 horas a temperaturas de (a) 430°C, (b) 480°C, (c) 530°C, (d) 580°C. MO: 250X Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Perfil de Microdureza

Las mediciones de microdureza de las muestras nitruradas se realizaron tanto en la superficie de las muestras como en la sección transversal. Para ello se hicieron cortes transversales de las muestras, en los que se realizaron mediciones de dureza a diferentes distancias de la superficie tratada. Las mediciones se realizaron con un micro durómetro semiautomático Matzusa; con este equipo se realizó indentaciones en la muestra a medir con un indentador Vickers, aplicando una carga de 0,025 Kg.

A partir de las mediciones realizadas se obtuvieron las curvas de perfil de microdureza mostradas en la figura 6 para cada una de las muestras. En los perfiles de microdureza se observa poca uniformidad sobre la capa superficial nitrurada en todas las temperaturas; esto se debería a la presencia de defectos, tales como precipitados, poros, inhomogeneidades, etc.

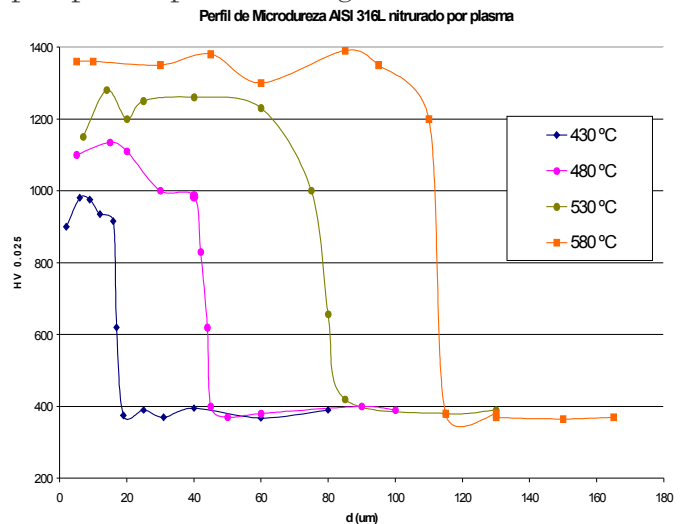


Figura 6. Perfil de microdureza del acero AISI 316L nitrurado por plasma a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.

Además se nota una caída brusca de dureza entre la interfase superficie-matriz. El aumento del espesor de la capa nitrurada muestra un comportamiento creciente con la temperatura de nitruración¹⁵. Así mismo la mayor dureza obtenida en la capa nitrurada con respecto a la matriz (figura 6) se puede atribuir a la presencia de nitruros Fe₄N (γ') y Fe_{2,3}N (ε), que se ve favorecido por el alto contenido de cromo en el acero y la presencia de Molibdeno¹⁶. En la Tabla 2 se presenta los rangos de espesor de la capa nitrurada obtenidos según el criterio de microdureza (50 HV sobre el valor de la matriz)²⁰. El mayor espesor de la capa nitrurada se obtuvo a temperatura más alta (115 µm a 580 °C) y el menor espesor se obtuvo a la temperatura más baja (16 µm a 430 °C). Estos valores obtenidos muestran el comportamiento de la capa nitrurada en función de la temperatura de nitruración.

Tabla 2. Espesor de la capa nitrurada por plasma del acero inoxidable AISI 316L a diferentes temperaturas.

T (° C)	Espesor de capa nitrurada (µm)
430	16
480	42
530	80
580	115

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Propiedades de Tracción

En las tablas 3 y 4 se muestran las propiedades mecánicas del acero AISI 316L recocido y nitrurado por plasma. Se observa que el tratamiento de nitruración produce un aumento en las propiedades mecánicas (tensión de fluencia, σ_f , tensión máxima, σ_{max} y tensión de rotura, σ_{rotura}) respecto a las obtenidas en el acero recocido; sin embargo este aumento es ligeramente menor a medida que aumenta la temperatura de nitruración.

Tabla 3. Propiedades de tracción del acero AISI 316L recocido y nitrurado.

	Recocido	Nitrurado por plasma (Kg/mm ²)			
		430 °C	480 °C	530 °C	580 °C
Tensión de fluencia: σ_f (Kg/mm ²)	160,29	187,53	185,47	181,31	143,32
Tensión máxima: σ_{II} (Kg/mm ²)	212,02	242,03	233,10	228,97	219,18

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4. Propiedades de tracción del acero AISI 316L nitrurado por plasma a diferentes temperaturas.

Probetas Nitruradas	Tensión Máxima: σ_{II} (Kg/mm ²)	Tensión de Rotura: σ_{III} (Kg/mm ²)	Elongación (%)
430 °C	242.03	204.30	31.9
480 °C	233.10	189.03	32.3
530 °C	228.97	195.45	33.0
580 °C	219.18	188.47	33.6

Fuente: Elaboración Propia.

Los efectos benéficos en las propiedades mecánicas del acero nitrurado se deben a que la capa nitrurada presenta mayor resistencia y dureza que la matriz; así como una baja sensibilidad a las entallas y a las presencias de tensiones residuales compresivas generadas durante el tratamiento de nitruración²².

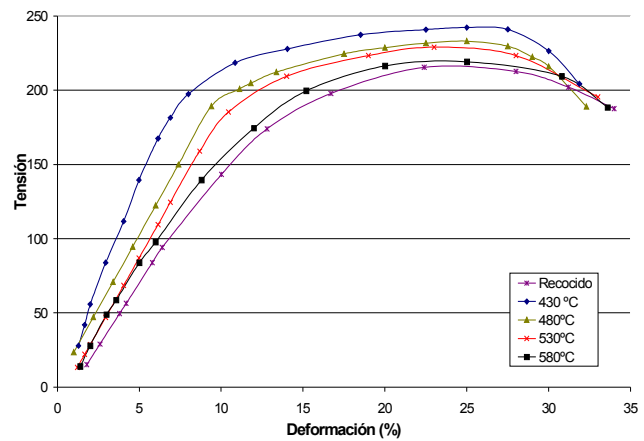


Figura 7. Ensayo de tracción del acero AISI 316L recocido y nitrurado por plasma a diferentes temperaturas.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 7, se observa que las curvas tensión – deformación de las probetas nitruradas presentan mejores propiedades mecánicas que la probeta en condición de recocido, siendo las mejores propiedades a mayores temperaturas de nitruración; así mismo el porcentaje de elongación es similar en todas las probetas.

3.4 Comportamiento en fatiga y corrosión fatiga

En la figura 8, el acero inoxidable AISI 316L no nitrurado muestra un límite de fatiga bien definido, tanto en aire (370 MPa) como en una solución al 3,5% NaCl (260 MPa), observándose que la solución salina afecta severamente el límite de fatiga disminuyéndolo drásticamente.

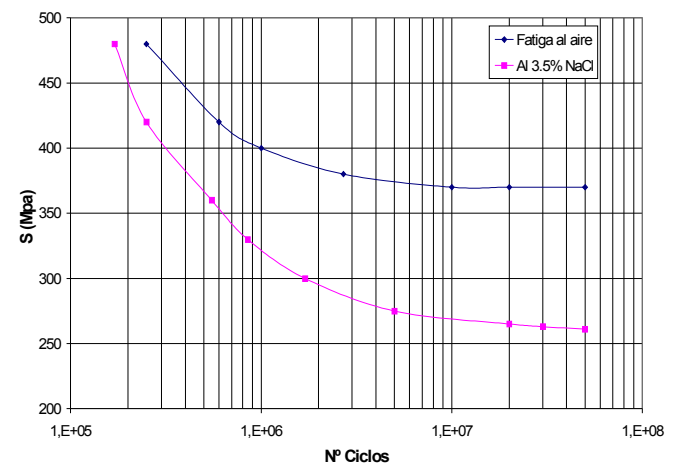


Figura 8. Comportamiento en fatiga del acero AISI 316L no nitrurada al aire y en un medio al 3.5% de NaCl.

Fuente: Elaboración Propia.

En las curvas de la figura 9 existe un aumento en la resistencia a la corrosión fatiga de las probetas nitruradas por plasma, respecto a las no nitruradas a ciclos menores a 4×10^6 . Sin embargo no se observa un límite de fatiga definido, disminuyendo la resistencia a la corrosión fatiga a ciclos mayores a 8×10^6 , respecto a las probetas no nitruradas. La mayor resistencia a la corrosión fatiga de las probetas nitruradas a todas las temperaturas en una solución al 3,5% de NaCl a $N < 4 \times 10^6$ respecto a las recocidas, estaría relacionado al corto tiempo de interacción con el medio corrosivo, predominando las mejores propiedades mecánicas de la capa nitrurada²³.

Con el aumento de la temperatura de nitruración los aceros presentan mejor comportamiento frente a la corrosión-fatiga, concordante con las durezas alcanzadas a mayor espesor de capa nitrurada; no obstante se observaron pequeños defectos como microfisuras o poros en la zona central, los cuales se comportarían como entallas o concentradores de tensiones, elevando el nivel de esfuerzos en la región.

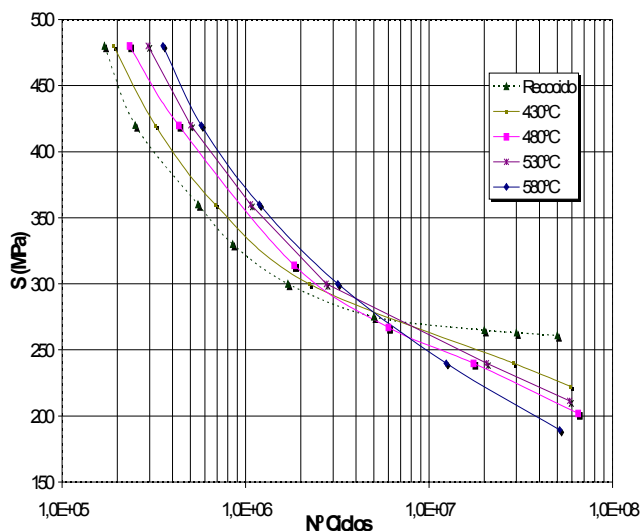


Figura 9. Comportamiento en corrosión fatiga, en 3,5% NaCl, del acero AISI 316L nitrurado por plasma a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.

En las curvas S-N obtenidas para el acero AISI 316L, hay una similitud en la resistencia a la corrosión fatiga en la región $4 \times 10^6 < N < 8 \times 10^6$, debido probablemente a que existen tensiones residuales compresivas generadas por el tratamiento de nitruración, así como el aumento de sus propiedades mecánicas; compensando de esta manera la acción corrosiva del medio.

Sin embargo al ser sometidas a mayores tiempos, $N > 8 \times 10^6$ ciclos, en todas las probetas disminuye considerablemente la resistencia a la corrosión fatiga debido al mayor tiempo de interacción con el medio corrosivo, produciendo disolución de la capa nitrurada

(por relajación y/o eliminación de tensiones residuales compresivas) e incrementando la velocidad de propagación de la fisura en el metal base. Por otra parte debido al mayor tiempo de interacción con el medio, a $N > 8 \times 10^6$, la fisura se inicia en la región superficial, produciendo un severo ataque corrosivo del metal; mientras que a menores ciclos $N < 4 \times 10^6$ el inicio de fisura se da en la región subsuperficial.

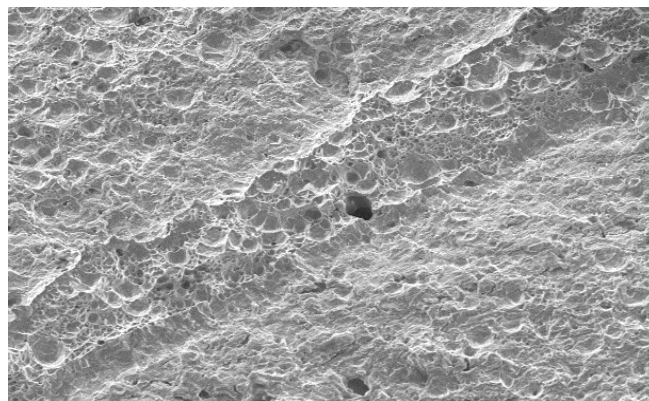


Figura 10. Micrografía SEM de una probeta nitrurada por plasma a 530 °C y fracturada por corrosión fatiga. SEM 320X.

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a la superficie de fractura, esta presenta un aspecto mate fibroso (Figura 10), por lo cual se podría deducir que la fractura observada es del tipo dúctil, además de una considerable deformación plástica.

El inicio de fractura puede estar en una entalla, inclusión o partícula de segunda fase, las cuales sufren una decohesión respecto a la matriz generando microcavidades en ella; como consecuencia la grieta continúa creciendo mediante este mecanismo de coalescencia de microcavidades (Figura 11).

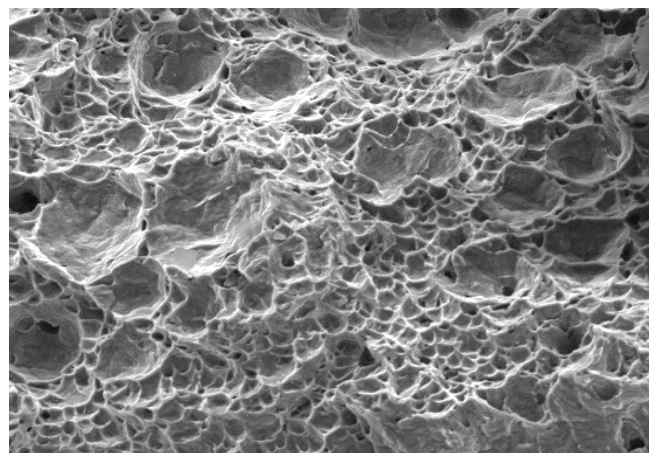


Figura 11. Micrografía SEM de la zona de fractura de una probeta nitrurada por plasma a 480 °C y fracturada por corrosión fatiga. SEM 640X

Fuente: Elaboración Propia.

4. CONCLUSIONES

La resistencia a la fatiga, al aire y en un medio corrosivo (NaCl al 3,5 %), del acero 316L sometido a tensiones $N < 4 \times 10^6$ ciclos, está asociado a las mejores propiedades de estos recubrimientos con respecto a las del sustrato, esfuerzos residuales de compresión en los recubrimientos, y buena adhesión de los recubrimientos al sustrato y corto tiempo de interacción con la solución salina. A $4 \times 10^6 < N < 8 \times 10^6$, se encontró que la resistencia a la corrosión fatiga del acero 316L nitrurado a diferentes temperaturas es similar a los no nitrurados, debido probablemente a que la pérdida de la resistencia a la corrosión es compensada con las mejores propiedades de la capa nitrurada; sin embargo a $N > 8 \times 10^6$ ciclos, la resistencia a la corrosión fatiga de las probetas nitruradas por plasma es menor que las no nitruradas, debido al mayor tiempo de interacción con la solución salina.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Hooi. Sensitization of austenitic stainless steels. University of Cambridge (2003).
- [2] D. Duquette. "A review of aqueous corrosion fatigue. Corrosion fatigue: chemistry, mechanics and microstructure". NACE pp. 12-24 (1972).
- [3] P. de la Cruz, PhD thesis: Fatigue and corrosion fatigue fracture of a plasma nitrided, laser hardened and galvanized B-Mn steel. Linkping University (1998).
- [4] Y. Qian y J. Cahoon. "Crack initiation mechanism for corrosion fatigue of austenitic stainless steels". Corrosión Science. 53 (2):129-135 (1997).
- [5] Y. Soo Lim et col. "The influences of microstructure and nitrogen alloying on pitting corrosion of type 316L and 20 Wt% Mn-substituted type 316L stainless steels". Corrosión Science. 43(1):53-68 (2001).
- [6] J. Vogt, S. Degallaix et al. "The combined effect of molybdenum and nitrogen on the fatigued microstructure of 316-type austenitic stainless steel". Scripta Materialia. 40(1): 487-492 (1999).
- [7] Nitron GmbH. Plasma nitriding in comparison with gas nitriding. Documento WWW [consulta]. Noviembre 2005.
- [8] P. Kuppasami, D. Sundararaman et al. "Comparative study of plasma nitriding behavior of type 316 stainless steel and microalloyed steel". Surface Engineering. 9(2):137-141 (1993).
- [9] H. Shih, Lee C. y S. Chyou. "The corrosion wear properties of the plasma nitriding tool steels". Surface and coating technology. 116(1): 212-221 (1999).
- [10] T. Bell y col. "Plasma nitriding treatments for enhanced wear and corrosion resistance. Coat surface treatments". Corrosion Wear resist. pp. 164-177 (1984).
- [11] K. Genel, M. Demirkol et al. "Effect of ion nitriding on fatigue behavior of AISI 4140 steel". Materials Science and Engineering A279. pp. 207-216 (2000).
- [12] P. Dearnley y col. "Some observations on plasma nitriding austenitic stainless steels". On proceeding First international conference on plasma surface engineering. Garmisch. pp. 219-226 (1998).
- [13] Z. Zhang y T. Bell. "Structure and corrosion resistance of plasma nitrided stainless steel". Surface engineering. 1(2):131-136 (1985).
- [14] E. Angelini, A. Burdese et al. "Ion nitriding of austenitic stainless steels". Metallurgical Science and Technology. pp. 33-39 (1990)
- [15] E. Menthe et al. "Structure and properties of plasma nitrided stainless steels". Surface and coating technology. 74-75: 412-416 (1995).
- [16] V. Sun, X. Li y T. Bell. "X-ray diffraction characterization of low temperature plasma nitrided austenitic stainless steels". Journal of Material Science. 34(1): 4793-4802. (1999).
- [17] A. Peckner y D. Bernstein. Handbook of stainless steels. Editorial Mc graw Hill Book Company. New York (1977).
- [18] Aceros Boehler del Perú. Tratamientos térmicos. Documento WWW. [consulta]. Mayo 2014. (<http://www.acerosboehler.com>).
- [19] ASTM E8-79a. ASTM Handbook. Standard methods of tension testing of metallic materials. Philadelphia (1979).
- [20] Klaren C., Deere J. "Methods of measuring case depth". Boehler Ltd, pp 455-461 (2002).
- [21] Mc Evily A. y Wei R. "Fracture mechanics and corrosion fatigue". Mechanisms and microstructure, pp 381-395 (1991).

- [22] Qian J. y Fatemi A. "Cyclic deformation and fatigue behaviour of ion nitrided steel", Vol. 17 N° 1, pp 15-24 (1995).

- [23] Jáuregui S. Tesis: Influencia de la temperatura de nitruración por plasma en la resistencia a la corrosión fatiga del acero inoxidable duplex UNS S 31803 en una solución de 3.5% de NaCl. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo (2001).