

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DE CEMENTACIÓN EN ACEROS DIN 16CrNi4 Y DIN 16MnCr5 Y SU RELACIÓN CON LA DUREZA Y TENACIDAD RESULTANTE EN ENGRANAJES DE DIENTES RECTOS

Miguel Angel Zacarias Gómez ¹, Roberto Aguilier Rivas ¹, Marta Lopez Jenssen ²

1 Unidad de Investigación, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala,

2 Universidad de Concepción, Chile

emecanica@ing.usac.edu.gt
jicifuentes@ing.usac.edu.gt

Sumario (Resumen)

La presente investigación analiza los cambios microestructurales en los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5, que surgen a través del tratamiento termoquímico de cementación por material sólido posterior al temple y revenido. El análisis es enfocado a engranajes de dientes rectos simulando el radio del pie de cada diente con la entalla en V de la probeta Charpy tipo A. Se realizaron ensayos metalográficos, de dureza, de impacto y fractografía, para establecer las características mecánicas de ambos aceros en cada etapa del proceso. Para la etapa de cementación, se procedió a utilizar la mezcla de carbonatos $BaCO_3$, $CaCO_3$ y Na_2CO_3 que sirvieron como activadores y mejoradores a la acción carburante en combinación con carbón vegetal, en donde, para la difusión del carbono se tomó como referencia, los mecanismos de difusión y la segunda ley de Fick.

Palabras claves: Cementación, temple, revenido, dureza Rockwell-C, clivaje, intergranular, dimples, segunda ley de Fick, carbonatos.

Introducción

El presente trabajo se realizó dentro de los objetivos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, específicamente dentro de los lineamientos básicos del Proyecto en Investigaciones Metalúrgicas en el área de los Tratamientos Térmicos; para la ejecución del mismo se contó con el patrocinio de la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) y el apoyo proporcionado por la académica del Departamento de Ingeniería de Materiales (DIMAT) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción (UdeC), MSc. Marta López Jenssen. Como parte del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), la práctica de la investigación se realizó en los laboratorios de la UdeC. Los resultados de la investigación fueron presentados en el informe de Memoria de Título en el DIMAT de la Facultad de Ingeniería de la UdeC en la República de Chile. Se analizaron los efectos de la difusión del carbono en los aceros microaleados DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5, a una temperatura de austenización completa, para el tratamiento termoquímico de cementación por material sólido, usando los carbonatos $BaCO_3$, $CaCO_3$ y Na_2CO_3 en combinación con carbón vegetal, posterior al temple y revenido. El análisis es enfocado a engranajes de dientes rectos, simulando el radio del pie de cada diente con la entalla en V de la probeta Charpy tipo A. Los endurecimientos

superficiales de los aceros en general, son ampliamente utilizados en el diseño y construcción de elementos de máquinas en ingeniería mecánica, específicamente en piezas sometidas a desgaste por fricción, erosión y otras sollicitaciones mecánicas involucradas en el uso de las piezas metálicas, tales como ejes, engranajes, bujes, chumaceras, etc. Los factores independientes más importantes de los tratamientos térmicos a considerar son: las propiedades fisicoquímicas del metal, la forma y la magnitud de la pieza a tratar, la homogeneización y la velocidad de enfriamiento (Aguilar Rivas, Roberto A., 2012).

Metodología

Los aceros para este estudio, se adquirieron como trozos de barra de 100 milímetros de diámetro de los cuales se extrajeron y mecanizaron las probetas Charpy con entalla en V", simulando adecuadamente la curvatura y el radio del pie entre los dientes de los engranajes. Se modificó el largo de la probeta Charpy en un extremo de manera de poder obtener de ese extremo, las probetas para el análisis metalográfico y ensayo de dureza. Previo a la extracción de probetas, con la finalidad de descartar la presencia de segregación química en la zona central de las barras que pudiesen inducir la obtención de resultados erróneos para los diferentes análisis y ensayos, se realizó el análisis químico de los elementos microaleantes presentes, mediante espectrometría de emisión óptica, en dos zonas diferentes, cercanas al borde y el núcleo. Se propuso un ciclo térmico para ambos aceros, basado a los diagramas TTT y CTT ya existentes, considerando también, los elementos microaleantes obtenidos de la espectrometría óptica. Para la cementación mediante carburantes sólidos, se preparó una mezcla entre carbón vegetal de granulometría de 4 milímetros, molido y 3 carbonatos diferentes ($BaCO_3$, $CaCO_3$ y Na_2CO_3), que están presentes en el compuesto de cementación llamada mezcla Caron (Apraiz Barreiro, José, Tratamientos Térmicos de los aceros, 1984), para esta etapa las probetas fueron sometidas a 900 grados centígrados, mientras que el temple a 850 grados centígrados rodeadas de carbón vegetal y el revenido a 180 grados centígrados sin ambiente carburante. Para el estudio metalográfico, las muestras fueron preparadas con alúmina, para el pulido y con nital al 2 por ciento, para el ataque químico. Para el ensayo de dureza se trabajó con dureza Rockwell-A para las probetas tratadas térmicamente, mientras que para las probetas en estado de suministro con dureza Rockwell-B; por razones que la norma ASTM E18 estipula. Pasado el ensayo de impacto, fueron realizadas las macrofractografías y algunas de éstas, consideradas representativas del fenómeno, fueron analizadas con el microscopio electrónico de barridos (MEB), con su respectivo microanálisis EDS.

Análisis de resultados

De acuerdo a los ensayos realizados, se determinó que la difusión del carbono en el acero 16CrNi4 es menor que la del 16MnCr5, esto debido de que el primero tiene un mayor contenido de Ni, no tan significativo en peso, pero aun así influyó en la difusión, a pesar que los otros elementos aleantes no difieren mucho en contenido de peso. Se comprobó de esta manera que los elementos disueltos en la ferrita como en este caso el níquel, disminuye notablemente la difusión del carbono en el Fey .

Los resultados máximos de dureza de templado y revenido, fueron entre 80,3 y 81,8 dureza Rockwell-A (58 y 61 dureza Rockwell-C), marcando en ambos aceros un descenso mientras se aumentó el tiempo de cementación, obteniendo como descenso mínimo entre 75,5 y 78,4 dureza Rockwell-A (49 y 55 dureza Rockwell-C) para las 9 horas de cementación seguido del temple y revenido, esto debido a la descarburización presente en ciertas regiones (fig. 2 y 5) como también el aumento de austenita retenida pese a la existencia de carburos (fig. 3 y 6)

El 16CrNi4 en la etapa de cementación tiende a absorber más energía en comparación al 16MnCr5. A medida que la penetración del carbono avanza con el tiempo en la cementación, la tenacidad de ambos aceros va descendiendo en donde se hace notar que la capa cementada influye de gran manera. En las siguientes etapas, temple y revenido, ambos aceros para las diferentes horas de cementación, muestran que la tenacidad disminuye aun más entre 2,9 y 6,8 joules para ambos aceros, marcando así una similitud en los resultados finales entre los dos aceros microaleados.

La fractografía del acero 16MnCr5 en estado de suministro (fig. 7), la fractura es de carácter frágil por la presencia de clivaje donde se observan “camino de clivaje” (*river patterns*) mostrando los granos de ferrita formados. Si bien, ciertos aceros frágiles presentan este tipo de fractura, en este caso la energía absorbida en el ensayo de impacto fue de 45,11 joules, lo cual lo hace en cierta manera dúctil en comparación con el mismo acero templado y revenido. Mientras que el acero 16CrNi4 en estado de suministro (fig. 10), la fractura es de carácter dúctil, mostrando microcavidades y hoyuelos (*dimples*) de distintas formas y tamaños, donde la energía absorbida fue de 141,22 joules. Ambos aceros con temple y revenido, la fractura es de carácter mixta, con presencia de zonas de clivaje de reducida magnitud y la coalescencia de microcavidades tipo *dimples*, fenómeno observado en ambos núcleos de los aceros ensayados (fig 8 y 11); mientras que para el borde la fractura es del tipo mixto con cuasi-clivaje como también del tipo intergranular (fig. 9 y 12), característicos de una zona más frágil. En ambas figuras se puede notar el crecimiento alcanzado por el grano de austenita; el 16CrNi4 presenta más fractura intergranular, a pesar que en estado de suministro era más dúctil que el 16MnCr5, en el temple y revenido, presentó un comportamiento contrario.

Conclusiones

1. Acerca de la difusión: El coeficiente de difusión del carbono en el acero microaleado DIN 16MnCr5 es mayor en comparación al acero DIN 16CrNi4 para la temperatura de 900 grados centígrados; obteniendo 0,8 milímetros de penetración de capa cementada, que se alcanza a las 3 horas de cementación para el 16CrNi4 y a las 2 horas de cementación para el 16MnCr5. Estos valores experimentales fueron corroborados teóricamente mediante la segunda ley de Fick como fines prácticos en la manufactura de engranajes.

2. Acerca de los resultados de dureza: Las durezas alcanzadas y el comportamiento del perfil de dureza, no son muy distintas, con variaciones mínimas de 1 a 2 dureza Rockwell-C, algo menor para el acero DIN 16CrNi4 en comparación al acero DIN 16MnCr5 en la condición de templado y templado-revenido. Acorde a esto, podemos afirmar que la templabilidad de ambos aceros es muy similar.

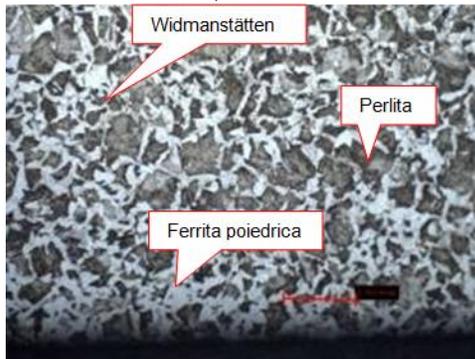
3. Acerca del ensayo de impacto: En ambos aceros templados y revenidos para las diferentes horas de cementación, se observó que la tenacidad disminuye hasta valores promedio de 3,92 joules para rangos de 6 a 9 horas de cementación, marcando así una similitud en los resultados finales para los dos aceros microaleados (levemente superiores para el acero 16MnCr5 en comparación con 16CrNi4, pese a que este último presentó en su estado normalizado de suministro una tenacidad 141,22 joules).

4. Fractografía: El acero 16MnCr5 en estado de suministro es comparativamente más frágil que el 16CrNi4, atribuible a microsegregación de Cr, Ni y Mn. Posterior a la cementación, en el temple, ambos aceros presentan una fractura de carácter mixto en los núcleos de la probetas (clivaje en zonas puntuales y dimples), y en la zona borde de la entalla en concordancia con los resultados de tenacidad se observa fractura del tipo intergranular notándose el crecimiento alcanzado por el grano de austenita, mayor para el 16CrNi4 en comparación al 16MnCr5.

Recomendaciones

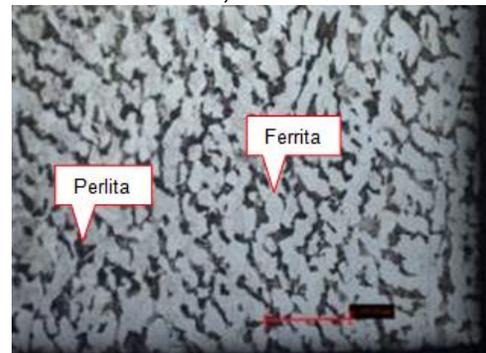
- Las variables más importantes de esta investigación son: la temperatura y el tiempo; se recomienda realizar un estudio exhaustivo en el análisis de la difusión, dureza y tenacidad en probetas cementadas a temperaturas mayores a 900 grados centígrados y comparar los resultados con el presente trabajo, considerando los elementos microaleantes de las probetas a ensayar.
- Para un estudio más profundo en el comportamiento mecánico de la cementación, el temple y revenido en los aceros analizados en este trabajo se deja como opción la realización de ensayos a tracción.
- Considerar la fresa de módulo que sirve en la manufactura del engranaje para obtener referencia adecuada de la capa cementante requerida, dado que a medida que aumenta el diámetro primitivo es necesario una capa cementante más profunda, para soportar las sollicitaciones mecánicas necesarias.
- Cuando se requiera ciertas zonas blandas de las piezas que estarán sometidas al proceso de cementación, es recomendable realizar el procedimiento de cobreado electrolítico; que consiste en pintar las superficies que se deseen cementar, la mezcla de la pintura contendrá cera, trementina, asfalto entre otras resinas especiales, seguido de un baño de cobreado electrolítico, en donde se adhiere una capa de cobre sobre las zonas sin pintar, que son las que se requieren blandas. A elevadas temperaturas se quemará la capa de pintura, cementándose esas superficies, mientras que las superficies cobreadas no estarán expuestas a la difusión del carbono. Este procedimiento se hace a temperaturas menores de 1 000 grados centígrados y en superficies libres de grasa para que el cobre se adhiera efectivamente.

Figura 1. 16MnCr5 en estado de suministro, x100



Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 4. 16CrNi4 en estado de suministro, x100



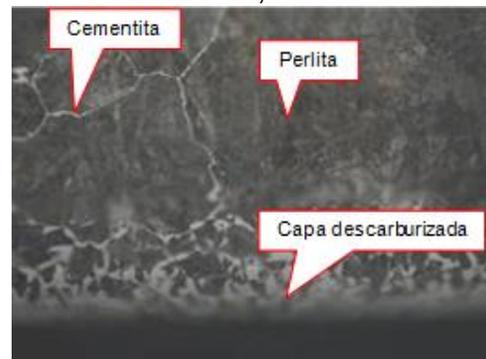
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 2. 16MnCr5, 6 horas de cementación, x500



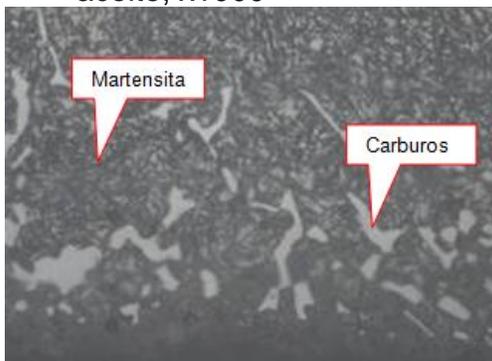
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 5. 16CrNi4, 3 horas de cementación, x500



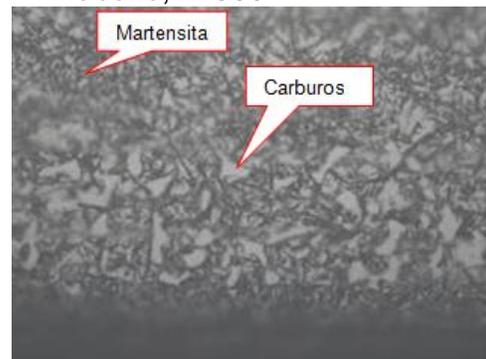
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 3. 16MnCr5, 6 horas de cementación y temple en aceite, x1000



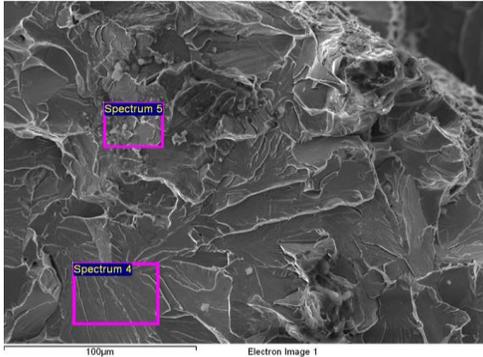
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 6. 16CrNi4, 3 horas de cementación y temple en aceite, x1000



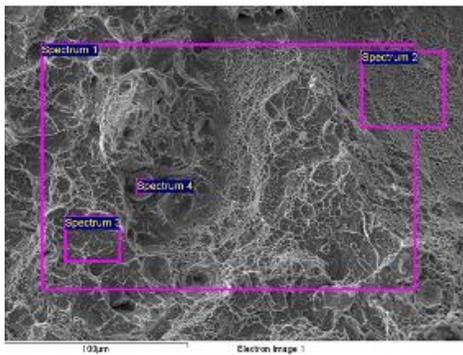
Fuente: Laboratorio de Ingeniería de Materiales, edificio Tecnológico Mecánico, UdeC.

Figura 7. Fractografía, 16MnCr5 en estado de suministro, x500



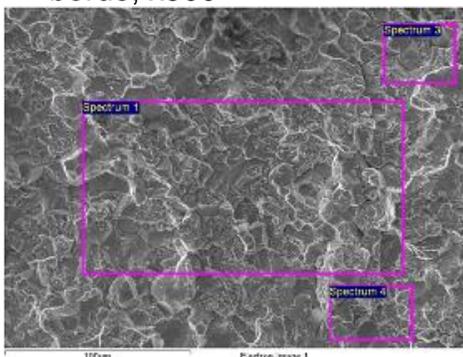
Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Figura 8. Fractografía 16MnCr5, 6 horas de cementación y temple, núcleo, x500



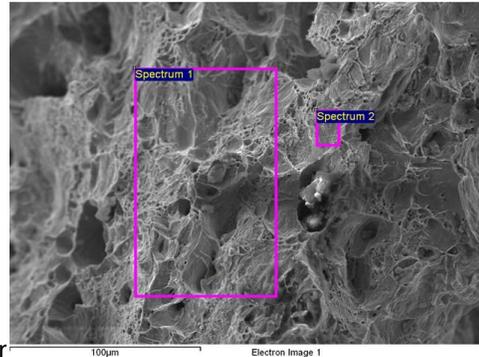
Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Figura 9. Fractografía 16MnCr5, 6 horas de cementación y temple, borde, x500



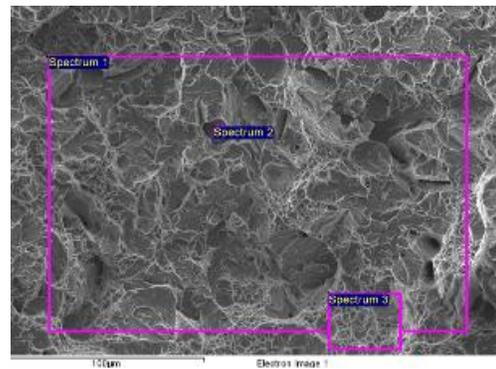
Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Figura 10. Fractografía, 16CrNi4 en estado de suministro, x500



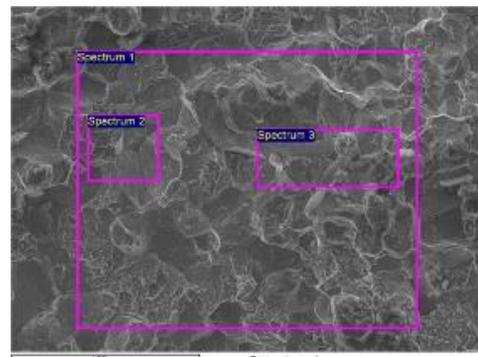
Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Figura 11. Fractografía 16CrNi4, 6 horas de cementación y temple, núcleo, x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones, UdeC.

Figura 12. Fractografía 16CrNi4, 6 horas de cementación y temple, borde, x500



Fuente: Laboratorio de Investigaciones,
UdeC.

Bibliografía

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Introducción a la metalurgia*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Mecánica 2012. 192 p.
2. APRAIZ BARREIRO, José. *Tratamientos Térmicos de los aceros*. 8a ed. España: Dossat. 1984. 741 p.
3. ASTM E0018-05E01 *Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials Edition*. Estados Unidos: ASTM International, 2005. 10 p.
4. *Metals Handbook. Heat Treating*. Estados Unidos: ASM international Handbook. 1998. 2173 p. Vol. 4
5. ZACARIAS GÓMEZ, Miguel Angel. *Caracterización metalográfica y mecánica de las estructuras cristalinas obtenidas durante el proceso de cementación en aceros DIN 16CrNi4 y DIN 16MnCr5 y su relación con la dureza y tenacidad resultante en engranajes de dientes rectos*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2013. 182 p.

Agradecimientos

- Ingeniera Marta López, docente de la Universidad de Concepción; por el apoyo incondicional, las enseñanzas y la orientación académica durante el desarrollo de las investigaciones.
- Ingeniero Roberto Aguilar, de la EIM-FIUSAC, por su colaboración y orientación para realizar una buena investigación.
- Ingeniera Ana Hidalgo, por su apoyo permanente, las enseñanzas y orientación en el laboratorio de investigaciones.
- Licenciada Sandra Velásquez, por concederme el privilegio de formar parte del PIMA, por el apoyo y la confianza.



Miguel Angel Zacarias Gómez

2012-2013

Desarrollo de investigación de graduación: Caracterización metalográfica y mecánica de las estructuras cristalinas obtenidas durante el proceso de cementación en aceros DIN 16CrNi4 y DIN

16MnCr5 y su relación con la dureza y tenacidad resultante en engranajes de dientes rectos. Estudiante de Intercambio PIMA, Universidad de Concepción en la república de Chile.

<http://internacionalizacion.ingenieria.usac.edu.gt/suramerica/chile/chile2.html>

2008-2011 Pensum cerrado de Ingeniería Mecánica USAC, séptimo semestre de Ingeniería Industrial USAC.

2005-2007 Bachillerato Industrial y Perito en Mecánica Automotriz en el Tecnológico Preuniversitario de Chimaltenango.

Asesorado por:

Dr. Sc. Eng. Roberto Aguilar Alejandro Rivas

Colegiado No. 862, USAC;

MSc. Marta López Jenssen

UdeC.