Influencia del revenido en la estructura y las propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resiliencia del acero cubano al cromo-manganeso-silicio-níquel.

G. Tourón-Alonso, A. Jénez-Señor, N. Caballero-Stevens, A. J. Estenoz-Mojena

Recibido el 11 de marzo de 2009; aceptado el 15 de septiembre de 2009

Resumen

La actual demanda de herramientas y accesorios para maquinarias agrícolas se presenta como fuente creciente de nuevas aplicaciones del acero al Cr-Mn-Si-Ni. Este criterio justifica la práctica de tratamientos térmicos, para conseguir distintos valores de propiedades mecánicas, que orienten al material hacia las exigencias y circunstancias de aplicaciones concretas. El trabajo tiene como objetivo conocer la estructura del acero, heredadas de las transformaciones de fase en diferentes regímenes de tratamiento térmico de revenido, y la correlación entre dicha estructura y sus propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resiliencia. Las observaciones al microscopio óptico de las muestras revenidas sugieren, en unos casos, una estructura compuesta por martensita revenida, en otros, indican la presencia de partículas de ferrita y cementita. Los ensayos de dureza y tracción revelaron una disminución de la dureza y de la resistencia a la tracción con el aumento de la temperatura de revenido. El ensayo de impacto reveló un aumento de la resiliencia con el aumento de la temperatura de revenido, aunque aparecen dos intervalos de temperatura en que la resiliencia disminuye.

Palabras claves: revenido, estructura, dureza, resistencia, resiliencia

Influence of tempering on structure and hardness, strength and resilience properties of chromium-manganese-silicon-nickel cuban steel.

Abstract

Specimens were tempered after being hardened into oil. Tempered specimens for tension tests, were heated from 200 to 500ºC, in an interval of 100ºC; while, specimens for hardness and resilience tests, were heated from 200 to 550ºC, in an interval of 50ºC. Tempering time, for tension and resilience tests, depends on specimens' thickness, while, for hardness tests is 30, 60 and 90 minutes. Tempered specimens microstructures at 200 and 300ºC indicate the presence of carbide particles; it suggests a tempering martensite structure. Tempered specimens microstructures at 500ºC indicate the presence of ferrite and cementite particles. Both, hardness and strength decrease when the tempering temperature increases. The resilience increase with tempering temperature, but there are two zones, around 300ºC and 450ºC, where resilience decrease.

Key words: tempering, structure, hardness, strength, resilience

1. Introducción.

El acero al cromo-manganeso-silicio-níquel (Cr-Mn-Si-Ni) surgió en respuesta a los requerimientos de corte de la cuchilla del picador de las combinadas cañeras cubanas. La experiencia obtenida en pruebas de campo, confirmó su utilidad en aplicaciones estructurales de gran responsabilidad. La actual demanda de herramientas y accesorios para maquinarias agrícolas se presenta como fuente creciente de nuevas aplicaciones del acero. Este criterio justifica la práctica de tratamientos térmicos, para conseguir distintos valores de propiedades mecánicas, que orienten al material hacia las exigencias y circunstancias de aplicaciones concretas.

La composición química del acero, a criterio de Guliaev (1983), sugiere experimentar diferentes regímenes de tratamiento térmico doble de endurecimiento, es decir, temple más revenido.

Como resultado de las transformaciones que se desarrollan al revenir la martensita, Pero-Sanz Elorz (1996) considera que la estructura está compuesta por martensita revenida entre 100 y 200ºC, por martensita revenida y bainita inferior entre 230 y 300ºC, por precipitados de cementita entre 300 y 350ºC, por ferrita y cementita globulizada a 400ºC y por ferrita globulizada y cementita globulizada entre 450 y 550ºC. El carácter acicular de la estructura se conserva hasta temperaturas de revenido bastante altas.

La variación de las propiedades mecánicas en el revenido es consecuencia de los cambios de estructura que se efectúan durante este. La tendencia general, planteada por Guliaev (1983) y Pero-Sanz Elorz (1996), consiste en que, a medida que se eleva la temperatura de revenido la dureza disminuye, lo mismo que la resistencia a la tracción, mientras que la resiliencia aumenta. En el caso del enfriamiento lento después del revenido, la resiliencia tiene dos mínimos, uno a 300ºC y otro a 550ºC.

Conocer la estructura del acero al Cr-Mn-Si-Ni, heredadas de las transformaciones de fase en diferentes regímenes de tratamiento térmico de revenido, y la correlación entre dicha estructura y sus propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resiliencia constituyen el objetivo de este trabajo.

2. Materiales y métodos.

La materia prima que se utilizó en la fabricación de las probetas para los ensayos mecánicos, fue la planchuela de acero laminada de dimensiones 90x12mm. La composición química del acero incluye los elementos cromo, manganeso, silicio y níquel con el objetivo de elevar las características mecánicas del material.

Para maquinar las probetas y preparar la estructura del material hacia los tratamientos térmicos de temple y revenido, fue preciso someter la planchuela a un tratamiento térmico de recocido, permaneciendo a 850ºC durante 30 minutos con enfriamiento en el horno.

Las probetas para los ensayos mecánicos se fabricaron conforme a las dimensiones y formas establecidas en las normas de referencia Según la norma EN ISO 6508-1 las probetas para los ensayos de dureza tienen una geometría prismática de base cuadrada y superficies planas. De acuerdo con la norma ASTM E8M-01, las probetas para los ensayos de tracción tienen una sección rectangular y su espesor se corresponde con la geometría de la materia prima. Por su parte, la norma ASTM E23-02a, establece que las probetas para los ensayos de impacto *Charpy* tienen una sección cuadrada y entalla en forma de V.

Todas las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de temple, permaneciendo a 850ºC durante 30 minutos con enfriamiento en aceite. A continuación, se llevó a cabo el tratamiento térmico de revenido, con enfriamiento al aire: las probetas de tracción se calentaron de 200 a 500ºC, en intervalos de 100ºC, con tiempo de permanencia de acuerdo al espesor de las mismas. Las probetas de dureza e impacto se calentaron de 200 a 550ºC, en intervalos de 50ºC, con tiempo de permanencia de acuerdo a su espesor, en el caso del ensayo de impacto, y se fijaron en 30, 60 y 90 minutos en el caso del ensayo de dureza.

Para la determinación de la estructura al microscopio óptico se tomaron muestras de probetas calentadas a 200, 300 y 500ºC,

preparadas con una secuencia de lija de 100 a 1000 y atacadas con nital al 3%.
La determinación de las propiedades mecánicas se realizó mediante la práctica de ensayos mecánicos. Los ensayos de dureza Rockwell, los ensayos de tracción y los ensayos de impacto Charpy se llevaron a cabo en las máquinas de laboratorio correspondientes.

3. Resultados y discusión

Microscopía

El análisis microestructural se concibe desde una descripción comparativa entre la secuencia de imágenes del acero al Cr-Mn-Si-Ni, observadas a diferentes temperaturas de revenido, y las representaciones de aceros similares, bajo idénticas condiciones de tratamiento térmico, compiladas en los atlas de microestructuras para aceros que recoge el *ASM Metals Handbook (1992)*.

La microestructura de aceros similares al acero en estudio, revenidos a 200ºC, se relaciona con la presencia de partículas de carburo "de transición ε, con composición química $Fe_{2.4}C$ y estructura hexagonal compacta", según *Pero-Sanz Elorz (1996)*, precipitadas a partir de la martensita de estructura tetragonal.

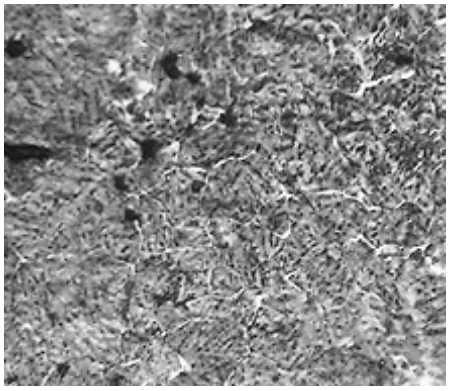

Figura 1. Martensita revenida; revenido del acero al Cr-Mn-Si-Ni a 200ºC. 400x

Esta característica indica una microestructura con presencia de martensita cúbica centrada en el cuerpo (martensita revenida) luego de que se redujera la tetragonalidad de la martensita por migración del carbono. Esta martensita cúbica puede reconocerse por su cambio de tonalidad cuando es atacada con nital.

"*La microestructura de la martensita revenida consiste en partículas extremadamente pequeñas de cementita embebidas en una matriz ferrítica continua y uniformemente dispersas*" Callister 1993.

La microestructura de aceros similares al acero en estudio, revenidos a 300ºC, también se relaciona con la presencia de partículas de carburo y por consiguiente la aparición de martensita revenida.

Figura 2. Martensita revenida; revenido del acero al Cr-Mn-Si-Ni a 300ºC. 400x

A esta temperatura, ocurre la "transformación de la austenita residual en bainita inferior" de acuerdo con *Pero-Sanz Elorz (1996)*, que, según *Guliaev (1983)*, no es más que una "mezcla heterogénea formada por solución α sobresaturada y carburo de hierro". En otras palabras, en esta transformación la austenita residual se convierte en martensita revenida.

La microestructura de aceros similares al acero en estudio, revenidos a 500ºC, sugiere un cambio en la morfología de las partículas, o sea, la esferoidización de la ferrita y la cementita presentes.

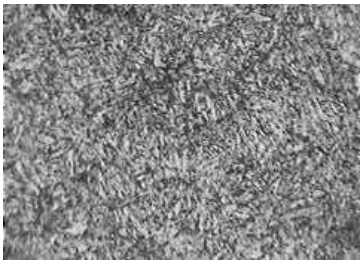

Figura 3. Ferrita y cementita; revenido del acero al Cr-Mn-Si-Ni a 500ºC. 400x

A la temperatura de 500ºC ya han ocurrido los procesos de restauración y recristalización de la ferrita, así como la "conversión de los carburos" a criterio de *Guliaev (1983)* o "redisolución del carburo ε acompañado por precipitación de cementita" desde el punto de vista de *Pero-Sanz Elorz (1996)*. Sin embargo, conforme a la experiencia de los autores, a estas temperaturas comienza el proceso de formación de carburos aleados, a partir de los elementos aleantes presentes en la composición química del acero.

Dureza

Al revenir la martensita, su dureza disminuye a medida que se eleva la temperatura (tabla 1). *Guliaev (1983)* atribuye esta tendencia "al empobrecimiento en carbono de la ferrita y al engrosamiento de las partículas de carburo". Puede afirmarse que este comportamiento de la dureza es característico de aceros en que no se presentan concentraciones significativas de elementos formadores de carburos.

Tabla No. 1. Valores promedio de la dureza de revenido (HRC).

	Tiempo de permanencia (min)		
Temperatura de calentamiento (ºC)	30	60	90
200	49.6	48.3	47.8
250	47.8	47.3	46.7
300	46.4	45.6	45.2
350	45.2	44.1	43.9
400	44.4	42.9	42.1
450	42.1	41.1	40.2
500	40.8	39.7	39.1
550	38.7	38.3	37.4

La dependencia a la disminución de la dureza con respecto a la temperatura se exhibe en la figura 4. *Pero-Sanz Elorz (1996)*, plantea que "los elementos de aleación que se hallan en disolución sólida dentro de la martensita, estabilizan esta al revenido y producen una caída más lenta de su dureza, al elevarse la temperatura".

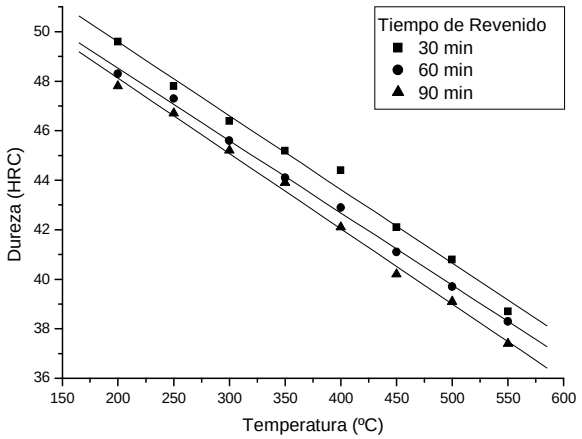

Figura 4. Influencia de la temperatura de revenido y el tiempo de permanencia en la dureza.

Un análisis de la variación de la dureza con respecto al tiempo de permanencia, en el intervalo de temperaturas seleccionadas, revela que dicha dependencia no tiene un carácter relevante.

Impacto

En el caso del enfriamiento lento, después del revenido, la influencia de la temperatura de revenido en la resiliencia del acero al Cr-Mn-Si-Ni se explica con ayuda de la figura 5.

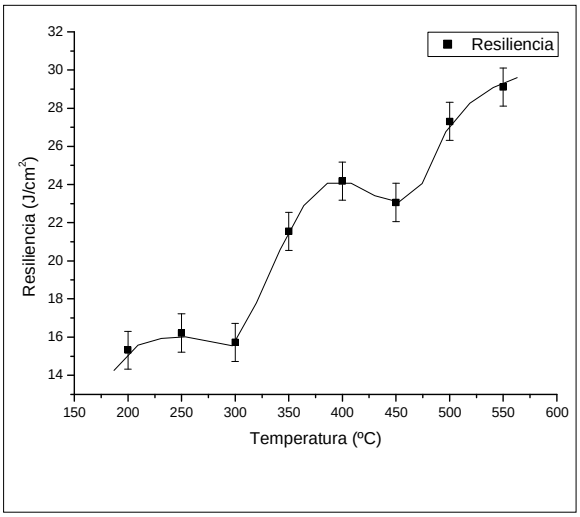

Figura 5. Influencia del revenido en la resiliencia.

A partir de 250ºC y hasta 300ºC se pone de manifiesto la fragilidad a los revenidos bajos (irreversibles), que es analizada, por *Pero-Sanz Elorz (1996)*, "a partir de la naturaleza intergranular de la rotura, que sugiere la

existencia de un compuesto enfragilizante precipitado. A esta temperatura es probable una redisolución del carburo ε acompañado por precipitación de cementita. La existencia de una red casi continua de este compuesto intermetálico confiere fragilidad".

Después del los 300ºC comienza una elevación intensa de la resiliencia. Este comportamiento se infringe en la región de temperaturas cercanas a 450ºC, lo que se corresponde con la fragilidad a los revenidos altos (reversibles). El fenómeno aparece cuando el acero se alea con elementos que forman carburos, afirma *Callister (1993)*.

El mecanismo por el que se produce la fragilidad a los revenidos altos no está plenamente determinado, si bien muchos autores concuerdan en señalar que se debe a segregación de elementos e impurezas en las juntas de grano.

Este resultado es muy importante porque la aparición de los mínimos de resiliencia influye de manera decisiva en la selección del régimen de tratamiento térmico del acero al Cr-Mn-Si-Ni, o sea, durante el tratamiento térmico debe evitarse el calentamiento en las zonas de temperaturas donde es propenso la aparición de dichos fenómenos.

Tracción

A medida que se eleva la temperatura de revenido, tal como ocurrió con la dureza, la resistencia a la tracción del acero al Cr-Mn-Si-Ni disminuye (figura 6). Este comportamiento es el resultado de los fenómenos estructurales, explicados con anterioridad, que se manifiestan a diferentes temperaturas de revenido. Al analizar aceros similares a este material, *Guliaev (1983)* plantea que "con la elevación de la temperatura de revenido (por encima de los 200ºC), desciende la tensión de rotura".

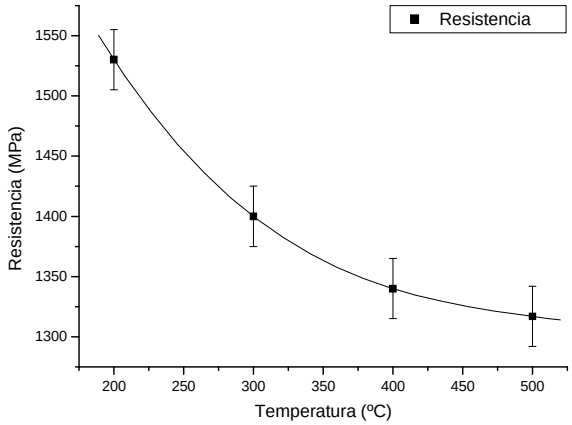

Figura 6. Influencia del revenido en la resistencia a la tracción

En resumen, con el revenido a baja temperatura, los índices de resistencia (dureza y tracción) son elevados (cercanos a 50HRC y más de 1500MPa) y la resiliencia baja (alrededor de 16J/cm^2). Por lo tanto, para este acero, al igual que para los aceros de construcción de contenido medio de carbono, es necesario un revenido a temperaturas altas.

En condiciones de revenido a temperaturas altas, se obtiene un conjunto de propiedades mecánicas más elevadas (dureza superior a 37HRC, resistencia a la tracción por encima de 1300MPa y resiliencia hasta 29 J/cm^2) que en los casos de aceros al carbono (con similar contenido de carbono) y aceros aleados (con similar contenido de carbono y elementos aleantes) sin tratar térmicamente.

Las características mecánicas que se obtienen después del tratamiento térmico doble de temple más revenido a temperaturas altas, indican el posible destino del acero al Cr-Mn-Si-Ni hacia la fabricación de piezas de máquinas que soporten cargas elevadas y el efecto de choques. También puede ser utilizado en la fabricación de herramientas de corte cuya condición principal es conservar el filo durante mucho tiempo.

4. Conclusiones.

1. Las aplicaciones del acero al Cr-Mn-Si-Ni pueden abarcar los campos de piezas para máquinas y herramientas para corte.
2. Las muestras revenidas a 200 y 300ºC, indicaron la presencia de partículas de carburo, lo que sugiere, en ambos casos, una estructura

compuesta por martensita revenida. La muestra revenida a 500ºC reveló la presencia de partículas de ferrita y cementita.

3. La variación de las propiedades mecánicas está en plena correspondencia con los cambios de estructura que se efectuaron con el tratamiento térmico de revenido. A medida que se eleva la temperatura de revenido la dureza disminuye, lo mismo que la resistencia a la tracción, mientras que la resiliencia aumenta.
4. La curva de resiliencia tiene dos mínimos, uno a 300°C y a 450°C, o sea, se ponen de manifiesto la fragilidad a los revenidos bajos y la fragilidad a los revenidos altos, en condiciones de enfriamiento lento.

5. Referencias.

1. **CABALLERO STEVENS, N**. "Tratamiento Térmico de Acero al Cr-Mn-Si-Ni". *Ingeniería Mecánica*. Enero - Marzo de 2001. vol. 4, nº 1, p. 27-29.
2. **CALLISTER, W. D.** Transformaciones de fase en los metales: desarrollo de microestructuras y alteración de propiedades mecánicas. En *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Barcelona: Editorial Reverté, 1993, cap. p. 303-336.
3. **GULIAEV, A. P.** Aceros de Construcción. En *Metalografía.* Moscú: Editorial Mir, 1983, p 34-77, vol. 2.
4. *Metallographic Techniques and Microstructures: Carbon and Alloy Steels.* ASM Metals Handbook, 1992. vol. 9
5. **PERO-SANZ ELORZ, J. A.** *Transformaciones en Estado Sólido en el Sistema Fe-C. En Su: Ciencia e Ingeniería de Materiales: Estructura, Transformaciones, Propiedades y Selección.* Tercera ed. Madrid: Editorial Dossat, 1996. 259-331 p.

G. Tourón-Alonso[1], A. Jénez-Señor[2], N. Caballero-Stevens[3], A. J. Estenoz-Mojena[4]

1. Grupo Técnico Acería. Empresa Siderúrgica José Martí. Calle 20, No. 10522, Cotorro. La Habana, Cuba.
E-mail: cardenas@aacero.co.cu

2. Departamento de Física Aplicada, Facultad de Física.
E-mail: ajenez@fisica.uh.cu

Universidad de la Habana. San Lázaro y L, Vedado, Plaza de la Revolución. La Habana. Cuba

3. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingeniería Mecánica.
E-mail: nilda@udm.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" – ISPJAE
Calle 114 #11901 e/119 y 127. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.

4. Departamento de Física General y Matemáticas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas
E-mail: ajesus@instec.cu
Calle Salvador Allende y Luaces. Quinta de los Molinos. Plaza de la Revolución. La Habana Cuba.