

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS ACEROS AUTENÉTICOS AL MANGANESO (ACEROS HADFIELD)

RESUMEN

En este artículo se analizarán los fundamentos teóricos de los aceros austeníticos al manganeso con el fin de proveer un mejor entendimiento sobre la influencia de la adición de elementos de aleación tales como cromo, níquel, manganeso etc., en sus propiedades mecánicas y su microestructura.

PALABRAS CLAVES: Aceros austeníticos, Hadfield, Manganeso.

ABSTRACT

In this article it will be analyzed the theoretical foundations from the austenitic steels to the manganese with the purpose of providing a better understanding of the influence of the addition of such alloy elements as chromium, nickel, manganese, etc., about their mechanical properties and on their microstructure.

KEYWORDS: Austenitic steel, Hadfield, Manganese.

OSCAR FABIÁN HIGUERA

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
osfahico@utp.edu.co

JOSE LUIS TRISTANCHO

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
josetris@utp.edu.co

LUIS CARLOS FLOREZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
luiscar@utp.edu.co
Profesor Auxiliar

Grupo de Investigaciones en Materiales, Avanzados (GIMAV-UTP) Universidad Tecnológica de Pereira

1. INTRODUCCIÓN

El acero austenítico al manganeso fue desarrollado por Sir Robert Hadfield en 1882, por lo que fue denominado acero Hadfield. Son aleaciones no magnéticas extremadamente tenaces en las cuales la transformación martensítica de endurecimiento ha sido suprimida por una combinación de alto contenido de manganeso y carbono, y la precipitación de carburos por una alta velocidad de enfriamiento desde temperaturas de austenización.⁽¹⁾

Estos aceros están caracterizados por sus propiedades mecánicas como son: alta resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. El acero Hadfield es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y, usualmente, buena resistencia al desgaste.^(3,5)

Los aceros austeníticos al manganeso presentan ciertas propiedades que tienden a restringir su uso, por ejemplo, son difíciles de maquinarse y usualmente tienen esfuerzos de fluencia de 345 a 415 MPa (50 a 60 Ksi). Consecuentemente no son aptos para partes que requieren alta precisión durante el maquinado o que deben resistir deformación plástica cuando son sometidos a altos esfuerzos durante el servicio.⁽¹⁾

Los aceros Hadfield tienen una composición nominal de 1.2%C y 12 a 13%Mn como elementos esenciales. Las aleaciones comerciales usualmente varían en el

rango de 1 a 1.4%C y 10 a 14%Mn como lo establece la norma ASTM A128.

2. COMPOSICIÓN Y MICROESTRUCTURAS

Muchas variaciones de los aceros al manganeso originales han sido propuestas, pero solo unas pocas han sido adoptadas como mejoras significativas. Estas usualmente incluyen variaciones en el contenido de carbono y manganeso, con o sin elementos aleantes adicionales tales como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio y bismuto. Las composiciones más comunes establecidas por la norma ASTM A128 son resumidas en la Tabla 1.

ASTM A128 GRADO	COMPOSICIÓN, %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (max)	P (max)
A	1.05-1.35	11 min	----	----	---	1	0.07
B1	0.9-1.05	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B2	1.05-1.2	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B3	1.12-1.28	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B4	1.2-1.35	11.5-14	----	----	---	1	0.07
C	1.05-1.35	11.5-14	1.5-2.5	----	---	1	0.07
D	0.7-1.3	11.5-14	----	----	3-4	1	0.07
E1	0.7-1.3	11.5-14	----	0.9-1.2	---	1	0.07
E2	1.05-1.45	11.5-14	----	1.8-2.1	---	1	0.07
F	1.05-1.35	6-8	----	0.9-1.2	---	1	0.07

Tabla 1. Rangos de composición estándar para aceros austeníticos al manganeso.⁽⁸⁾

Los aceros austeníticos al manganeso tienen microestructuras que son extremadamente sensibles al tamaño de la sección. Estos aceros son metaestables

con solución sólida de carbono, manganeso y silicio en hierro gamma (γ). Por lo tanto, el desarrollo de una microestructura simple de austenita depende de la rapidez y efectividad del temple en agua durante el tratamiento térmico.⁽⁶⁾

La microestructura es caracterizada por una matriz austenítica con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento como se observa en la Figura 1.

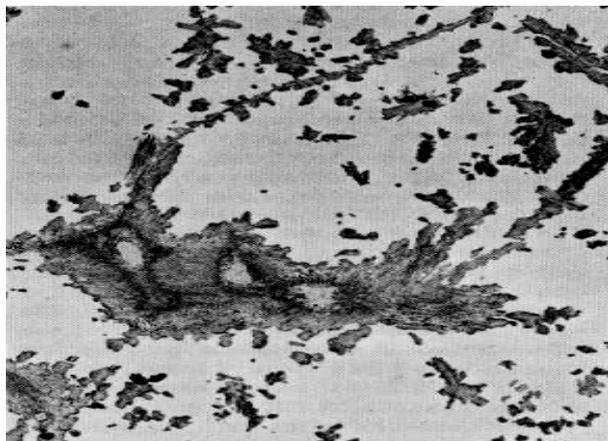


Figura 1. Microestructura acero Hadfield grado A, atacada con picral 4% 100X. Se observan granos de austenita (claro) con carburos precipitados (oscuro).^(1,9)

Estos carburos nuclean en los límites de grano y en áreas interdendríticas dentro de los granos de austenita. Los carburos interdendríticos pueden ser masivos, especialmente en los puntos triples, y algunas veces son rodeados por zonas de carburos laminares como se observa en la Figura 2.

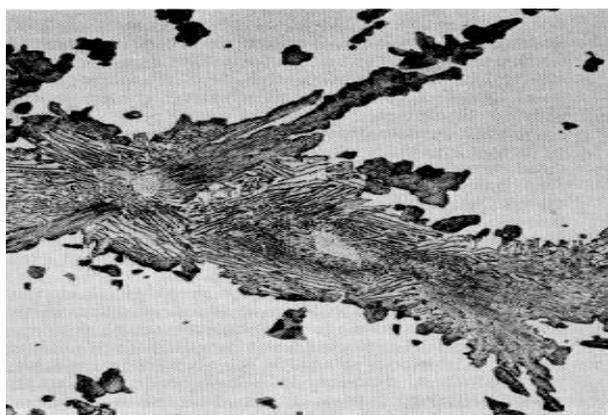


Figura 2. Microestructura acero Hadfield grado A, atacada con picral 4% 200X. Se observan carburos precipitados rodeados de carburos laminares.^(1,9)

Los aceros Hadfield son sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento, los cuales consisten en calentar a una temperatura lo suficientemente alta para disolver los carburos, seguido de un enfriamiento rápido en agua agitada a temperatura ambiente para retener una mayor cantidad de carbono en la solución sólida metaestable. Estas aleaciones son no magnéticas, sin embargo, debido a la pérdida de carbono y algo de

manganeso desde la superficie durante la solidificación dentro del molde y durante el tratamiento térmico, algunas veces existe una capa magnética (martensita) sobre la superficie del metal como se observa en la Figura 3.

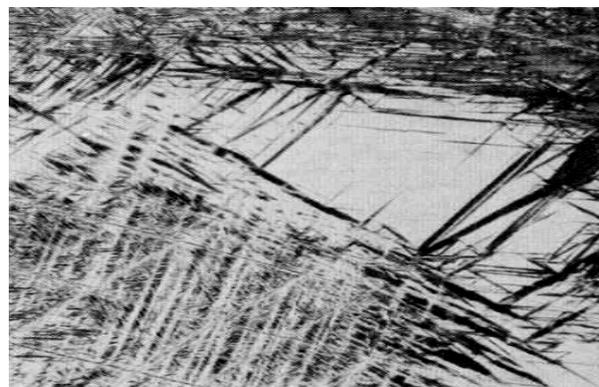


Figura 3. Microestructura acero Hadfield grado A, tratada térmicamente a 1065°C y enfriada en agua, atacada con picral 4% 500X. Se observa la capa de martensita formada durante la deformación como resultado de la decarburación de la austenita.^(1,9)

3. PROPIEDADES MECANICAS

Resistencia al desgaste. La principal propiedad mecánica de los aceros Hadfield es su gran resistencia al desgaste que fue atribuido a un rápido endurecimiento por deformación para lo cual se han propuesto varios mecanismos:

- Transformaciones que inducen tensiones como $\gamma \rightarrow \alpha$ o $\gamma \rightarrow \epsilon$.
- Pares mecánicos.
- Interacción de dislocaciones con átomos de carbono en solución sólida, etc.

Las características de los aceros Hadfield deformados en frío referentes a la microestructura y sus propiedades mecánicas fueron claramente explicadas en los años ochenta. Su alta resistencia al desgaste esta relacionada con la aleación con elementos de gran tendencia a la formación de carburos. Estudios posteriores no muestran ningún nuevo aporte concerniente al mecanismo que brinda la alta resistencia al desgaste de estos aceros. Los aceros Hadfield son usualmente menos resistentes a la abrasión que las fundiciones blancas martensíticas o los aceros de alto carbono martensíticos, pero son mucho mas resistentes que las fundiciones blancas perlíticas o aceros perlíticos.^(1,4,9)

Resistencia a la corrosión. Una baja resistencia a la corrosión es una de las deficiencias de los aceros Hadfield pues se oxida rápidamente. Además, donde la corrosión y la abrasión están combinadas como son los ambientes mineros y ambientes de fabrica, el metal puede deteriorarse o ser disuelto a una velocidad ligeramente menor que un acero al carbono. Si la dureza o naturaleza no magnética de los aceros al

manganeso es esencial para una aplicación marina, se debe proteger el metal con un galvanizado.

Aunque se ha intentado mejorarlo con la adición de elementos como el cromo, no se obtuvieron resultados favorables debido a la formación y precipitación de carburos de cromo que conllevó a un deterioro en la resistencia al desgaste con una mejora no muy apreciable en la resistencia a la corrosión. La sustitución de carbono por nitrógeno provee una buena combinación de resistencia a esfuerzos y a la corrosión, sin embargo, se necesitaría una alta presión de nitrógeno gaseoso para alcanzar un contenido equivalente al del carbono en los aceros Hadfield.⁽¹⁾

4. EFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

En los aceros los elementos de aleación se pueden dividir en tres categorías: los que sólo se disuelven en la ferrita, los que entran en la ferrita y forman carburos estables y los que sólo forman carburos.

En la primera categoría está, elementos como Ni, Cu, P y Si, cuyas solubilidades en la cementita son muy bajas. En la segunda categoría están la mayoría de los aleantes usados corrientemente; éstos son formadores de carburo y van a la cementita, pero también forman carburos aleados que son más estables, desde el punto de vista termodinámico, que la cementita. Entre estos elementos tenemos Mn, Cr, Mo, V, Ti, W y Nb. Los elementos formadores de carburo generalmente están en cantidades mucho mayores que las necesarias en la fase carburo, la cual está determinada por el contenido del carbono en el acero. El resto entra en soluciones sólidas en la ferrita, junto con los elementos no formadores de carburos como el Ni y el Si. Algunos de estos elementos, sobre todo el Ti, Nb y el W, forman mucha solución sólida y endurecen la ferrita. En la tercera categoría hay pocos elementos que entran únicamente en la fase carburo. El más importante es el nitrógeno que forma un carbonitruro.

Se pueden formar un gran número de carburos en las aleaciones Fe-s-C en equilibrio estable o metaestable; las composiciones posibles son las siguientes:

- Fe_xC_y, Carburo libre de aleante.
- (Fe-s)_xC_y Carburo con aleante sustitucional.
- Fe(s)_xC_y, Carburo con aleante en cantidad definida.
- s_xC_y Carburo libre de hierro.

La estabilidad de los carburos aleados también depende de la presencia de otros elementos en el acero; concretamente de la manera en que se reparte el elemento entre la cementita y la matriz. El coeficiente de partición provee información acerca de si un elemento es un buen o mal estabilizador de carburos y esta definido por:

$$K = X_{\theta} / X_{\alpha} \tag{1}$$

Donde X_θ y X_α son los porcentajes en peso del elemento, en α y en θ respectivamente. A continuación en la Tabla 2 se muestran algunos valores de K:

ELEMENTO	K
Al	0
Cu	0
P	0
Si	0
Co	2
Ni	3
W	5
Mo	8
Mn	11.4
Cr	28

Tabla 2. Valores de coeficiente de partición de diferentes elementos

Nótese que el Mn es un potente estabilizador de carburos aunque sea débil formador de estos. Lo mismo ocurre con el Cr, que es el estabilizador de carburos mas utilizado. A continuación se hará una breve descripción del efecto de los principales elementos de aleación sobre las propiedades mecánicas de los aceros Hadfield establecidos por la norma ASTM A128.

Carbono y Manganeso. Las composiciones de la norma ASTM A128 no permite ninguna transformación austenítica cuando las aleaciones son templadas en agua desde temperaturas superiores a la línea Acm. Sin embargo, esto no restringe obtener menores valores de ductilidad en secciones gruesas debido a menores velocidades de temple. Esta pérdida de ductilidad de la aleación se debe a la formación de carburos a lo largo de los límites de grano y de otras áreas interdendríticas. Este fenómeno ocurre en casi todas la aleaciones comerciales excepto en las piezas muy pequeñas en la cuales las velocidades de enfriamiento son altas. La Figura 4 muestra la temperatura Acm para un acero hadfield con 13% de Mn.^(1,9)

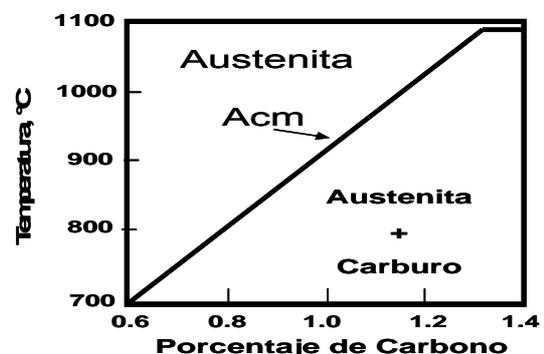


Figura 4. Solubilidad del carbono en un acero hadfield con 13 % de manganeso con un contenido de carbono entre 0.6 y 1.4%C.⁽¹⁾

En la Figura 5 se muestra el efecto del carbono y manganeso sobre la temperatura Ms, temperatura en la cual comienza la transformación martensítica desde la

fase austenítica con todo el carbono y el manganeso en solución sólida.

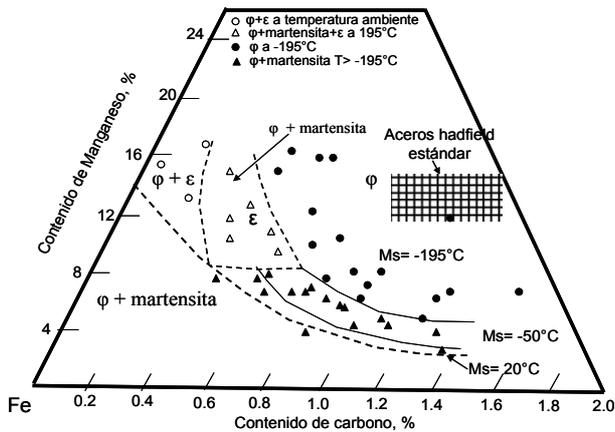


Figura 5. Variación de la temperatura Ms con el contenido de carbono y manganeso ⁽¹⁾

El contenido de carbono incrementa la resistencia de los aceros austeníticos al manganeso por encima del rango del acero grado A de la norma ASTM A 128, hasta 1.05%C. En el rango entre 1.05 y 1.35%C se estabiliza la resistencia en 827 MPa (120Ksi), como se observa en la Figura 6. Cualquier valor por fuera de este dato se atribuye al efecto del tamaño de grano en la fase austenítica.

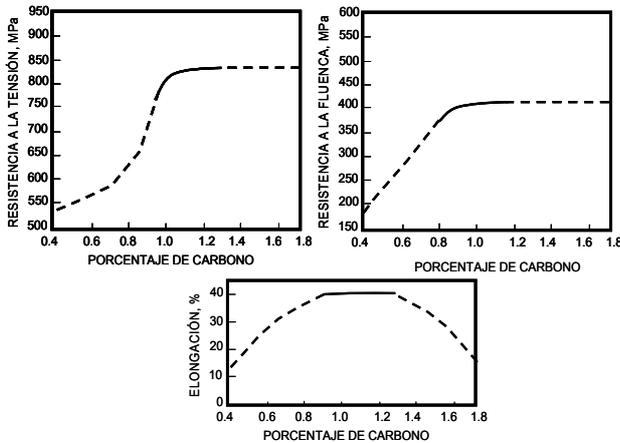


Figura 6. Influencia del carbono sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield con un contenido de manganeso entre 12.2 a 13.8%Mn. ⁽¹⁾

El aumento en el porcentaje de carbono dificulta cada vez más la obtención de austenita saturada en carbono, por tanto se van a presentar carburos en los límites de grano lo cual producirá reducción en la resistencia a la tensión y disminución en la ductilidad del material. Sin embargo, con el incremento en el porcentaje de carbono se aumenta la resistencia al desgaste del acero austenítico al manganeso. Si se disminuye simultáneamente el porcentaje de carbono y el de manganeso a rangos entre 0.53%C y 8.3% Mn o 0.62%C y 8%Mn el acero se endurece debido a la formación de martensita α (BCC) como se observa en la Figura 5. Sin embargo, esta transformación no

produce un aumento significativo en la resistencia al desgaste del material.

El manganeso estabiliza la austenita retardando la transformación martensítica (pero no eliminándola).

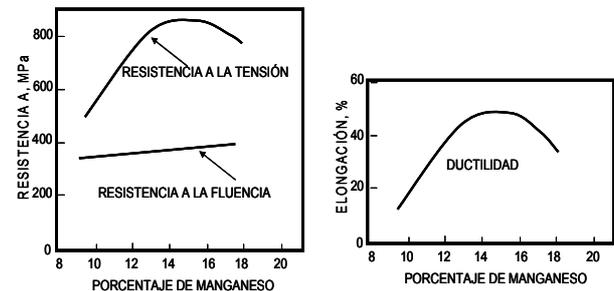


Figura 7. Influencia del Manganeso sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C. ⁽¹⁾

La Figura 7 muestra la influencia del manganeso sobre la resistencia y ductilidad de un acero austenítico. El manganeso afecta en baja proporción la resistencia a la fluencia de los aceros austeníticos al manganeso. En pruebas de tensión, la resistencia ultima y la ductilidad se incrementa rápidamente con el aumento en el contenido de manganeso hasta un 14%, por encima de este valor muestra un leve decrecimiento.

Está presente en todos los aceros comerciales, ensancha la región φ, por lo que los aceros con mas de un 12%Mn son austeníticos; disminuye la temperatura de formación de la perlita y también su contenido de carbono; incrementa la solubilidad del carbono en la austenita; favorece la formación de carburos y endurece la ferrita, reduciendo un poco su plasticidad; su solubilidad en la austenita es ilimitada y en la ferrita se disuelve e hasta un 17%.

Además, incrementa la resistencia a la tracción, el limite elástico, la resistencia a la fatiga y a la fluencia lenta, la forjabilidad, la resistencia al desgaste, la resistencia al revenido, la fragilidad del revenido, la tendencia al embastecimiento de grano, la formación de carburos y la dilatación térmica. En cambio, disminuye la maquinabilidad, la embutibilidad, las conductividades térmica y eléctrica y la sensibilidad a la fractura frágil.

El manganeso disminuye las velocidades críticas de enfriamiento durante el temple; con mas de un 3%Mn, el enfriamiento al aire produce estructuras bainíticas y, si el contenido es mayor estructuras martensíticas; de ahí que su efecto sobre la templeabilidad sea mayor que el de otros aleantes comunes.

Silicio y fósforo. Un contenido de silicio de 1 a 2% Si puede ser usado para incrementar moderadamente el esfuerzo de fluencia, pero desde el punto de vista operativo se prefieren otros elementos para este propósito. Cuando se adicionan porcentajes por encima de 2.2 % Si se presenta una perdida abrupta en el limite de fluencia de los aceros austeníticos al manganeso,

pero si los niveles de silicio son inferiores al 0.1% Si producen un decrecimiento en la fluidez durante la colada.

En cuanto al fósforo se considera una impureza excepto en los aceros en los que es deseable su efecto sobre la maquinabilidad y la resistencia a la corrosión; en estos casos, el contenido de fósforo puede ser hasta de 0.12%. En general el contenido de fósforo se debe mantener inferior al 0.035%, aunque las últimas investigaciones han demostrado que en muchas aplicaciones, porcentajes de hasta 0.08% no son dañinos. Sin embargo, los porcentajes mayores producen fragilidad en frío, dada su tendencia a originar estructuras groseras y segregadas. El fósforo aumenta la dureza pero disminuye la ductilidad y la tenacidad.

Cromo. Adicionando a aceros con un contenido de carbono de 1.15%C, tanto el cromo como el molibdeno incrementan el esfuerzo de fluencia del material. Aumentos muy significativos de cromo por encima del 2% reducen la ductilidad debido al incremento en la fracción en volumen de los carburos en la microestructura. El cromo provee resistencia a la corrosión atmosférica y al desgaste, sin embargo, el efecto no siempre es consistente y depende de aplicaciones individuales.

Debido al efecto estabilizante del cromo sobre los carburos de hierro, se deben utilizar temperaturas más altas durante los tratamientos térmicos con el fin de disolver los carburos previamente formados antes del temple en agua.

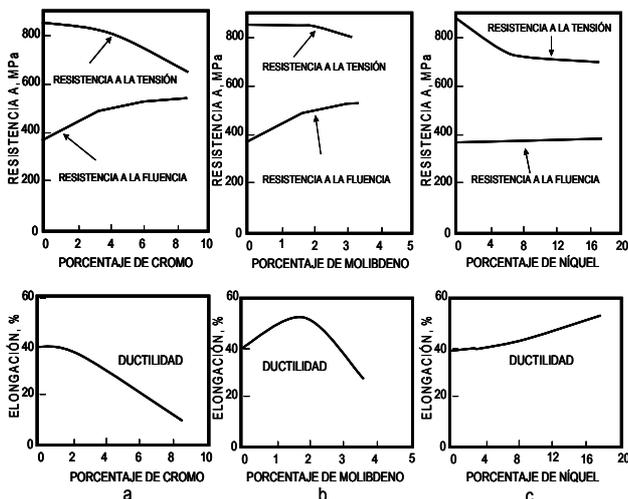


Figura 8. Influencia a) Cromo, b) Molibdeno y c) Níquel, sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C. ⁽¹⁾

Molibdeno. Adiciones, usualmente de 0.5 a 2%Mo, son hechas para mejorar la dureza y resistencia al agrietamiento de aleaciones en condición de colada, además, sirve para aumentar el esfuerzo de fluencia (y posiblemente la dureza) de secciones sometidas a tratamientos térmicos. Estos efectos ocurren debido que el molibdeno en los aceros al manganeso es

distribuido parcialmente en solución en la austenita formando carburos primarios durante la solidificación del acero. El molibdeno en solución efectivamente suprime la formación de carburos fragilizantes y de la perlita, aun cuando la austenita está expuesta a temperaturas por encima de 275°C durante la soldadura en servicio. El molibdeno en carburos primarios tiende a cambiar la morfología desde las dendritas de austenita a una forma nodular menos perjudicial, especialmente cuando el molibdeno excede el 1.5%Mo.

La adición de molibdeno en cantidades mayores al 1% puede incrementar la susceptibilidad de los aceros al manganeso a la fusión incipiente durante el tratamiento térmico. La fusión incipiente se refiere al fenómeno de licuefacción que ocurre debido a la presencia de constituyentes con bajo punto de fusión en áreas interdendríticas, esto puede ocurrir tanto dentro de los granos como a lo largo de los límites de grano. Esta tendencia es agravada por mayores niveles de fósforo (%P > 0.05%), altas temperaturas (la cual promueve la segregación en la fundición) y altos niveles de carbono (%C > 1.3%) en el acero. ⁽⁹⁾

Níquel. En cantidades superiores al 4%, el níquel estabiliza la austenita debido a que es retenida en solución sólida. El níquel es particularmente efectivo para suprimir la precipitación de carburos laminares, los cuales se pueden formar entre 300 y 550°C. Por lo tanto la presencia de níquel ayuda a retener las cualidades magnéticas en el acero, especialmente en las capas superficiales decarburadas. Adiciones de níquel incrementan la ductilidad, disminuyen ligeramente el esfuerzo de fluencia y disminuye la resistencia a la abrasión de los aceros al manganeso.

La Figura 8 muestra la influencia del cromo, molibdeno y níquel sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield con un contenido de carbono de 1.15%C. ⁽¹⁾

Vanadio. Es un fuerte formador de carburos y su adición a los aceros al manganeso incrementa sustancialmente el esfuerzo de fluencia pero con su correspondiente decrecimiento de la ductilidad. El vanadio es usado en aceros al manganeso endurecibles por precipitación en cantidades de 0.5 a 2%. Debido a la estabilidad de los carbonitruros de vanadio, se recomienda utilizar temperaturas de austenización mayores 1120°C a 1175°C antes del envejecimiento (usualmente entre 500°C a 650°C). Esfuerzos de fluencia por encima de 700MPa son obtenidos dependiendo el nivel de ductilidad que pueda ser tolerado para una aplicación dada.

Cobre. Como el níquel, el cobre en cantidades de 1 a 5% ha sido usado en aceros austeníticos al manganeso para estabilizar la austenita. El efecto del cobre sobre las propiedades mecánicas no ha sido claramente establecido. Algunos reportes indican que puede tener efectos fragilizantes el cual puede ser debido a la limitada solubilidad del cobre en la austenita.

Bismuto. Mejora la maquinabilidad de los aceros austeníticos al manganeso especialmente cuando el acero presenta niveles de manganeso superiores al 13%.

Titanio. Puede reducir el contenido de carbono en la austenita por la formación de carburos muy estables. El titanio puede también neutralizar un poco el efecto del fósforo. Altos niveles de este elemento puede resultar en severas pérdidas de ductilidad.

Azufre. El contenido de azufre en los aceros al manganeso raramente influye en sus propiedades mecánicas debido a que el manganeso elimina el azufre en forma de inclusiones. Sin embargo, se recomienda mantener el azufre lo más bajo posible para minimizar el número de inclusiones en la microestructura que serán sitios potenciales para la nucleación de grietas por fatiga en servicio.

5. CONCLUSIONES

La dureza y los mecanismos de endurecimiento por deformación de los aceros Hadfield, se relacionan con la densidad total de los defectos, envejecimiento por deformación y anclado de dislocaciones, y del afinamiento de la matriz austenítica por deformación de maclas.

El manganeso contribuye significativamente a la dureza y a la resistencia del acero de la misma manera, pero con menos intensidad, que el carbono; su efectividad es directamente proporcional al contenido de éste. Es también, el principal desulfurante al combinarse con el azufre en forma de (FeMn)S y MnS.FeO; su acción sobre el azufre minimiza el contenido de FeS, que es el causante de la fragilidad en caliente, esto mejora las características de conformación en caliente y contribuye a mejorar el acabado superficial del producto.

Los aceros Hadfield se caracterizan por sus propiedades mecánicas como: alta resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. El acero hadfield es el único que combina alta resistencia y ductilidad con alta capacidad de endurecimiento por deformación y usualmente buena resistencia al desgaste.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] ASM Handbook Volume 1. Properties and Selection: Irons, Steels and High performance alloys. ASM International. 1990.

[2] ASM Handbook Volume 9. Metallography and Microstructures. ASM International 1 990.

[3] ASM Handbook Volume 4. Heat Treating. ASM International 1991.

[4] Hutchinson B., Ridley N., On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel. Scripta Materialia 55, May 2006.

[5] Shang G., Dong J., Min Y. Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics. Wear. June 2005.

[6] Petrov Y., Gavriljuk V., Berns H., Schnakt F. Surface structure of stainless and Hadfield steel after impact wear.. Wear. May 2005.

[7] Bayraktar E., Khalid F., Levailant C. Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel. Journal of materials processing technology. October 203.

[8] ASTM A128/A128M-93(reapproved 1998) Standard specification for steel castings, austenitic manganese. American Society for testing and materials.