

Erosión-Corrosión de un Acero al Carbono y Acero Inoxidable 310 a Bajas Velocidades de Impacto: Efecto del Tipo de Partícula Erosiva.

J. G. Chacón-Nava,^{(1)*} A. Borunda-Terrazas,⁽¹⁾ F. Almeraya-Calderón,⁽¹⁾ V. M. Orozco-Carmona,⁽¹⁾ A. Martínez-Villafañe,⁽¹⁾ M. M. Stack⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Depto. de Integridad y Diseño de Materiales Compuestos, Av. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chih., México, CP 31109

⁽²⁾ Strathclyde University, Dept. of Mechanical and Aerospace Eng., 16 Richmond Street, Glasgow G1 1XQ, Glasgow, Scotland, U.K.

RESUMEN

Se estudio el comportamiento de un acero al carbono (1020) y un acero inoxidable tipo 310 expuestos en condiciones de erosion-corrosion a bajas velocidades de impacto. Las partículas erosivas empleadas fueron SiO₂ y Al₂O₃ con tamaños de partícula muy similar ($\approx 600 \mu\text{m}$) y el ambiente oxidante fue aire. Los experimentos fueron efectuados a dos temperaturas (450 C y 600 C) durante 24 horas y el rango de velocidades de impacto fue de 2.5 m/s a 4.5 m/s. En general, los resultados mostraron que las partículas de SiO₂ causaron menos daño que las partículas de Al₂O₃, aunque las diferencias en el deterioro observado fueron más significantes para el acero al carbono, en particular a la temperatura más alta. Para el acero al carbono a 2.5 m/s, la morfología superficial mostro formación de ondulaciones (ripples) las cuales son típicamente asociadas a un proceso de erosión. Un aumento en la velocidad de impacto de las partículas modifica notoriamente la morfología de impacto, provocando fractura de oxido formado. Para el acero 310 a 2.5 m/s, la morfología de impacto mostro formación de ondulaciones al emplear ambos tipos de partícula. Sin embargo a velocidades de impacto por arriba de 2.5 m/s, las superficies de impacto muestran mayor pulido y áreas de corte, las cuales son menos pronunciadas cuando se usan las partículas de SiO₂ en comparación con las partículas de Al₂O₃. Lo anterior se asocia con la forma de partícula erosiva: en el primer caso ocurre más deformación plástica superficial debido a la redondez de las mismas, mientras que en el segundo caso las partículas son más agudas. Se analiza y discuten posibles razones para explicar el deterioro observado en ambos materiales.

Palabras clave: erosión-corrosión, aceros, partículas erosivas, velocidad de impacto.

* jose.chacon@cimav.edu.mx

INTRODUCCION

El fenómeno de erosion-corrosion en alta temperatura ha recibido atención desde hace varios años dado que este proceso de deterioro afecta varios tipos de industrias. Dada la demanda creciente en relación a tecnologías sobre producción de energía y aspecto sobre el medio ambiente, es conocido que la combustión de carbón en lechos fluidizados presentan interesantes ventajas sobre tecnologías convencionales en calderas a base de carbón pulverizado, pudiendo mencionar por ejemplo: una excelente transferencia de calor, baja emisión de contaminantes a la atmosfera (SOx y NOx) y mejores eficiencias de combustión. A pesar de las ventajas mencionadas, los materiales de intercambiadores de calor en estas unidades de generación de energía son susceptibles de degradación, ya que aunado a las condiciones de oxidación en alta temperatura existentes, los componentes son impactados por una alta concentración de partículas a velocidades del orden de 5 m s^{-1} (1,2).

ANTECEDENTES

El proceso de degradación debido a erosion-corrosion (E-C) resulta de la acción sinérgica de ambos, el proceso de corrosión y el proceso de erosión. Aunque varios escenarios han sido mencionados para explicar E-C⁽³⁻⁵⁾, la complejidad de este fenómeno reside en el hecho de que en algunos casos el efecto de algunas variables en cada proceso por separado no es totalmente entendido. En procesos a bajas velocidades de impacto, es decir por debajo de 10 m s^{-1} , varios regímenes de daño han sido propuestos⁽⁶⁻⁸⁾. Típicamente, variables tales como la temperatura de exposición, el tipo de material y la velocidad de impacto han recibido mucha atención. En general, el trabajo experimental es efectuado empleando partículas de alúmina (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC) y arena (SiO_2), empleando una variedad de tamaños promedio de partícula que van desde $50 \mu\text{m}$ hasta 1 mm .

Respecto al tipo de partículas empleadas, es ampliamente aceptado que propiedades tales como el tamaño, composición química, forma y dureza pueden tener un papel importante en el proceso de deterioro para un material dado. Es también aceptado que partículas erosivas más duras pueden producir más daño que partículas con menor dureza. Sin embargo, MacAdam y Stringer⁽⁹⁾ reportaron que partículas de cuarzo (dureza Vickers, $\text{Hv}=820$) fueron más erosivas que partículas de carburo de silicio ($\text{Hv}=2480$). Woodford y Wood⁽¹⁰⁾ no encontraron diferencias importantes en la erosión de varios materiales al usar partículas con diferentes dureza de un lecho fluidizado en sus experimentos a temperatura ambiente. Ellos emplearon partículas de caliza ($\text{Hv}=134$), arena sílice ($\text{Hv}=766$) y alúmina ($\text{Hv}=1890$).

La forma de la partícula también es un parámetro interesante. Algunos reportes^(11,12) han indicado que a mayor angularidad de las partículas, mayor la pérdida de material. Una explicación a lo anterior es que aumentos en la angularidad de partículas concentran la fuerza de impacto en un área más pequeña del sustrato, aumentando así el daño al material. Para tubos de intercambiadores de calor en lechos fluidizados, se ha reportado⁽¹³⁻¹⁵⁾ que el rango de velocidades de impacto de partículas sobre la superficie de los tubos inmersos en el lecho de partículas es del orden 1 m s^{-1} a 5 m s^{-1} .

De lo anterior, el objetivo del presente trabajo es comparar el comportamiento de dos aceros, acero 1020 y acero inoxidable 310 en condiciones de E-C a bajas velocidades de

impacto, empleando partículas de alúmina y de arena de tamaño promedio similar, 560 μm en el primer caso y 600 μm en el segundo caso.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales.

Los materiales empleados fueron i) un acero 1020 (composición 0.20C, 0.3Si, 0.7Mn, 0.05S, 0.05P, Fe Bal.) en condición de normalizado y presentando una microestructura compuesta de ferrita y perlita y ii) un acero inoxidable 310 (composición 0.1C, 1.5Si, 2Mn, 0.045S 25Cr, 20Ni, Fe Bal.) presentando una microestructura austenítica típica.

Preparación de Muestras

Se emplearon muestras cilíndricas de aprox. 6 mm de diámetro x 24 mm de longitud. Antes de exponer las muestras, estas fueron desbastadas con lijas de SiC progresivamente hasta grado 800 usando agua como refrigerante, lavadas con metanol y secadas bajo una corriente de aire. El daño en las muestras fue determinado por mediciones de pérdida de peso por unidad de área, empleando una microbalanza Sartorius con resolución de 10^{-5} gr. El área considerada fue la expuesta al contacto con las partículas empleadas.

Equipo de Pruebas y Condiciones

El equipo de erosión utilizado simula condiciones de baja velocidad de impacto y alta carga de partículas, empleando aire caliente agente oxidante. Básicamente, el equipo consta de a) una cámara de lecho fluidizado conteniendo aprox. 40% de partículas durante una prueba b) un portamuestras y c) un sistema de calentamiento, tanto para la cámara como para el aire utilizado. Los experimentos se efectuaron a dos temperaturas, 450°C y 600°C , y en un rango de velocidades de impacto de 2.5 m s^{-1} a 4.5 m s^{-1} durante 24 hrs.

Partículas Utilizadas.

Se emplearon dos tipos de partículas i) alúmina y ii) arena sílice. Las partículas de alúmina tienen un tamaño promedio de 560 μm y fueron adquiridas de Universal Abrasives Ltd. Las partículas de arena (SiO_2) tienen un tamaño promedio de 600 μm y fueron adquiridas de BDH Ltd. La fig. 1 presenta la morfología de ambos tipos, donde se observa que las partículas de alúmina son más angulares mientras que las de arena son más redondas.

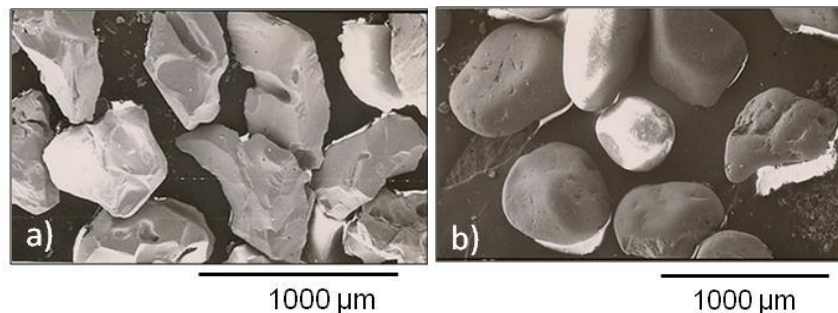


Fig. 1 Partículas utilizadas a) Alúmina (Al_2O_3) y b) Arena (SiO_2)

Microscopia de Barrido de Electrones.

La morfología de daño para las muestras después de exposición al equipo de experimentación se observó en un microscopio de barrido de electrones AMRAY.

RESULTADOS Y DISCUSION

Acero 1020

Cambio de peso por unidad de área.

A 450°C , la fig. 2a muestra que a una velocidad de impacto de 2.5 m s^{-1} , se obtuvieron ganancias en peso similares. Por debajo de 3 m s^{-1} no importantes diferencias fueron registradas. Sin embargo, por arriba de esta última velocidad de impacto, las partículas de arena causaron mucho menor incremento en pérdida de peso en comparación con los registrados con las partículas de alúmina. La mayor diferencia observada fue a la mayor velocidad de impacto empleada en este estudio, 4.5 m s^{-1} ; donde la pérdida de peso con las partículas de arena fue de 22 mg cm^{-2} , en comparación con los 127 mg cm^{-2} causados por las partículas de alúmina. A 600°C , de nuevo, las pérdidas de peso más bajas fueron registradas al emplear las partículas de arena. A una velocidad dada, las mayores diferencias en pérdida de peso son claramente observadas, en comparación con el comportamiento observado a 450°C , fig. 2b.

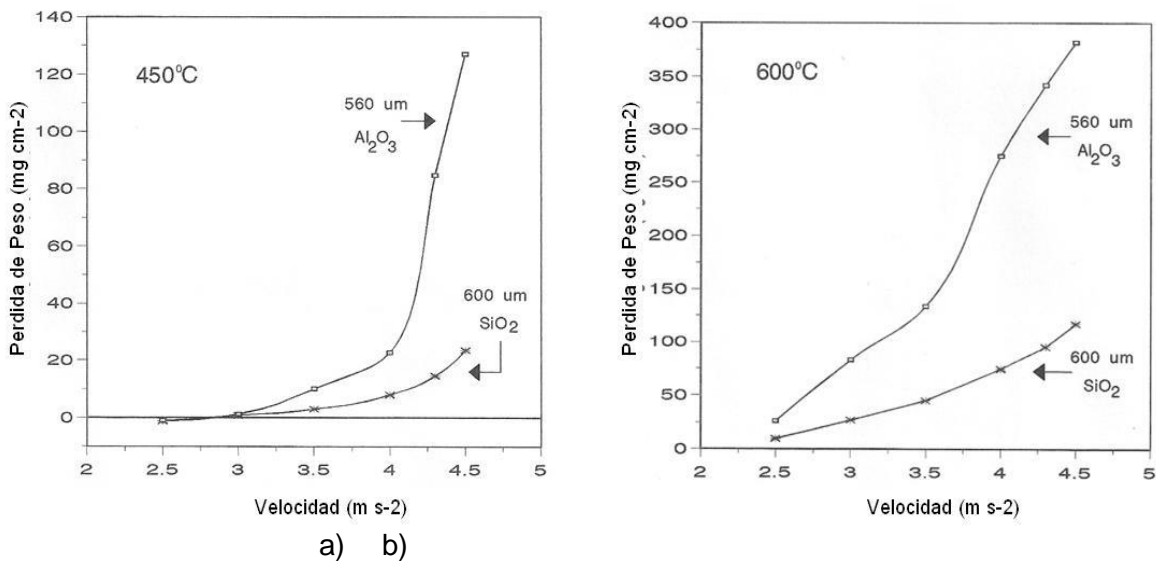


Fig 2. Cambio de peso por unidad de área con respecto a la velocidad de impacto para el acero 1020 expuesto a partículas de alúmina y arena a temperaturas de a) 450°C y b) 600°C

Morfología de daño

Después de exposición al equipo de experimentación a 450°C y 2.5 m s^{-1} empleando alúmina, se observó formación de ondulaciones (ripples) en la superficie, fig. 3a, siendo esta una morfología típica de un proceso de desgaste por erosión. A 600°C , se notó una morfología similar a la anterior, pero con formación de agrietamiento en la superficie de óxido, fig. 3b. A esta última temperatura pero a 4.5 m s^{-1} la morfología presentó una superficie sin formación de ondulaciones pero de aspecto pulido, fig. 3c, presentando a mayor magnificación una superficie con acanaladuras que sugieren un proceso abrasivo (por deslizamiento de partículas sobre la superficie del material bajo estudio). Para el caso de las partículas de arena, las morfologías observadas a 2.5 m s^{-1} y 450°C y 600°C , la formación de ondulaciones no fue tan evidente, figs. 3d y 3e. A 600°C y 4.5 m s^{-1} la morfología superficial mostró acanaladuras de mayor tamaño que las producidas por las partículas de alúmina, fig. 3f.

Observaciones en sección transversal. La fig. 4 muestra que, para ambos tipos de partículas, los resultados a 450°C y 2.5 m s^{-1} indican formación de una capa de óxido compacta y adherente al sustrato, lo cual implica una buena protección, como es confirmado por los resultados de la fig. 2a, donde no se observa pérdida de peso. A 600°C y 2.5 m s^{-1} , el espesor de óxido formado bajo impactos de alúmina es ligeramente más alto que el formado en arena. Además, el óxido presenta agrietamiento en diferentes secciones del mismo. A 600°C y 4.5 m s^{-1} , el óxido se encuentra muy fracturado particularmente bajo los impactos de partículas de alúmina. El óxido formado bajo impactos de partículas de arena es de mayor espesor y presenta agrietamiento transversal y longitudinal que el formado bajo impactos de alúmina.

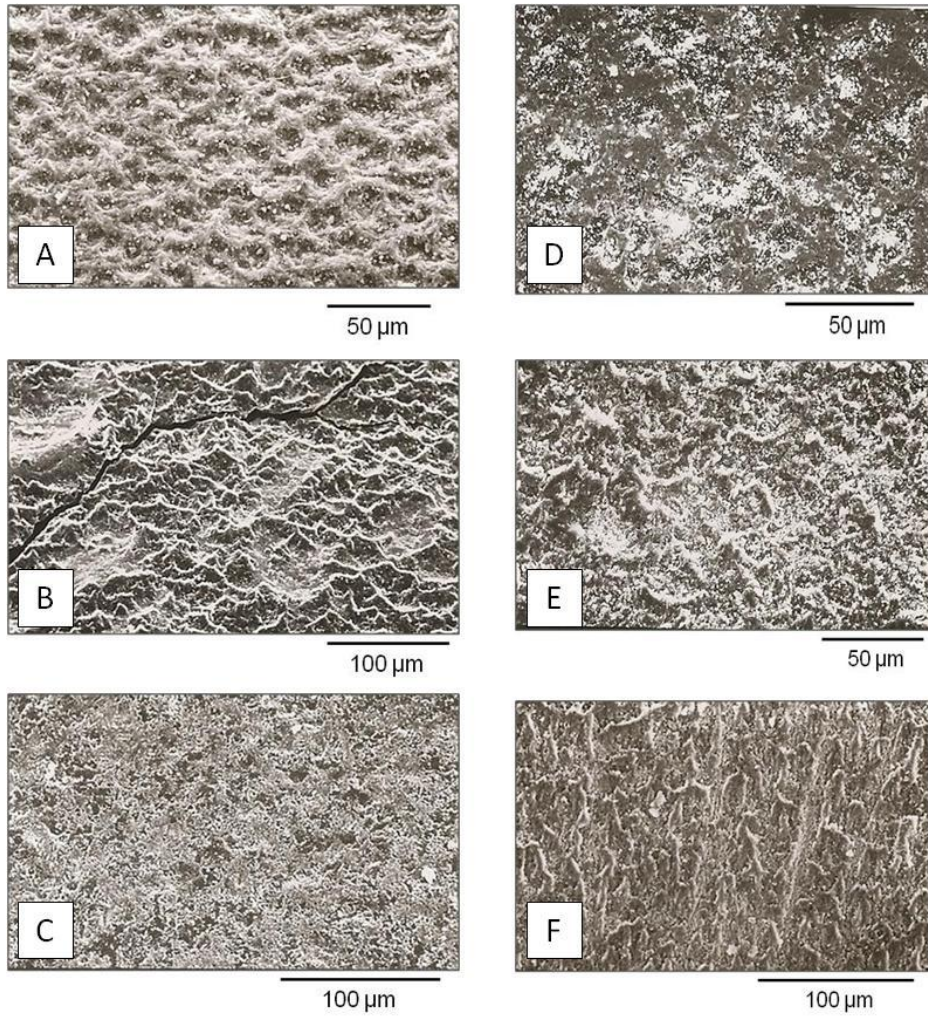


Fig. 3 Morfologías de daño para el acero 1020 expuesto a partículas de alúmina en las condiciones siguientes: A) 450⁰C, 2.5 m s⁻¹; B) 600⁰C, 2.5 m s⁻¹; C) 600⁰C, 4.5 m s⁻¹; y partículas de arena: D) 450⁰C, 2.5 m s⁻¹; E) 600⁰C, 2.5 m s⁻¹; F) 600⁰C, 4.5 m s⁻¹.

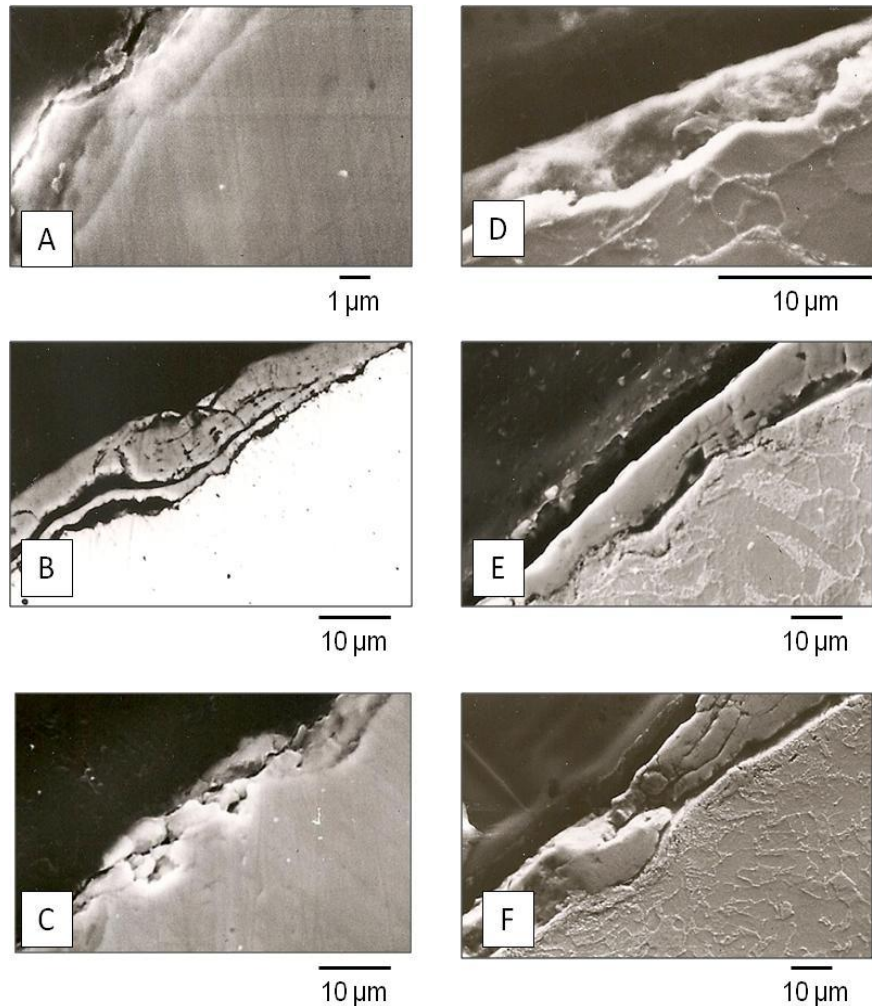


Fig. 4 Morfologías de daño en sección transversal para el acero 1020 expuesto a partículas de alúmina en las condiciones siguientes: A) 450°C, 2.5 m s⁻¹; B) 600°C, 2.5 m s⁻¹; C) 600°C, 4.5 m s⁻¹; y partículas de arena: D) 450°C, 2.5 m s⁻¹; E) 600°C, 2.5 m s⁻¹; F) 600°C, 4.5 m s⁻¹.

Acero inoxidable 310.

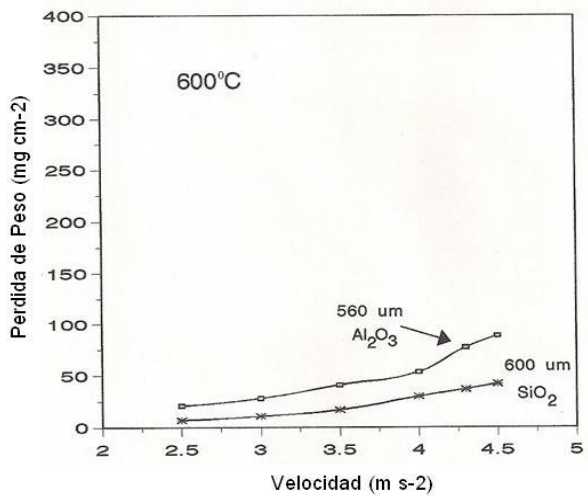
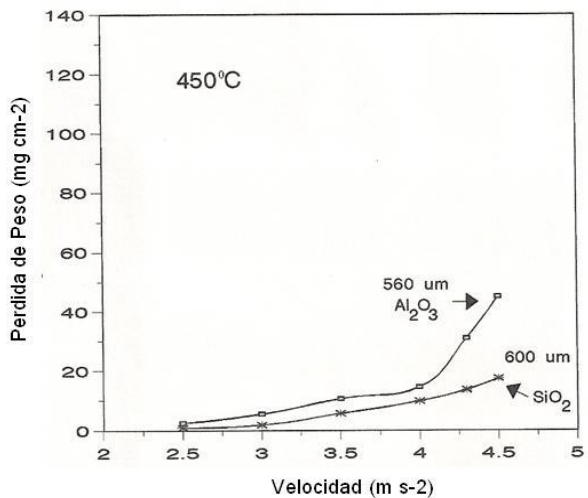
Cambio de peso por unidad de área

La Fig. 5 muestra que a 450°C las partículas de arena producen un cambio de peso relativamente similar en el rango de velocidad de impacto de 2.4 m s⁻¹ a 4 m s⁻¹. Por arriba de esta ultima velocidad de impacto, las partículas de alúmina causaron más daño. Un comportamiento similar fue observado a 600°C, pero en este caso, la diferencia de pérdida de peso entre los dos tipos de partículas erosivas fue considerablemente mayor.

Morfología de daño

Los resultados de la fig. 6 muestran que para ambos tipos de partículas, a 450°C y 2.5 m s⁻¹ se presenta formación de ondulaciones (ripples). Aquí, la morfología para el acero bajo

impactos de partículas de arena es algo diferente que la formada bajo impactos de alúmina, posiblemente debido a la forma más redonda de las partículas de arena. A 600°C y la velocidad de impacto más alta (4.5 m s⁻¹) se observan acanaladuras en la superficie del acero. Esto semeja un proceso de tipo abrasivo, donde una partícula impactando a la superficie se desliza sobre ella una cierta distancia. Estas acanaladuras o huellas de corte son más marcadas cuando se emplean las partículas de alúmina, siendo este un efecto muy posiblemente debido a la forma más angular de las mismas con respecto a las partículas de arena. En el caso del acero 310 no se efectuaron observaciones en sección transversal dado el muy bajo espesor de óxido que se formaría, siendo impráctico encapsular en resina y utilizar microscopia de barrido de electrones.



a) b)

Fig 5. Cambio de peso por unidad de área con respecto a la velocidad de impacto para el acero 310 expuesto a partículas de alúmina y arena a temperaturas de a) 450°C y b) 600°C

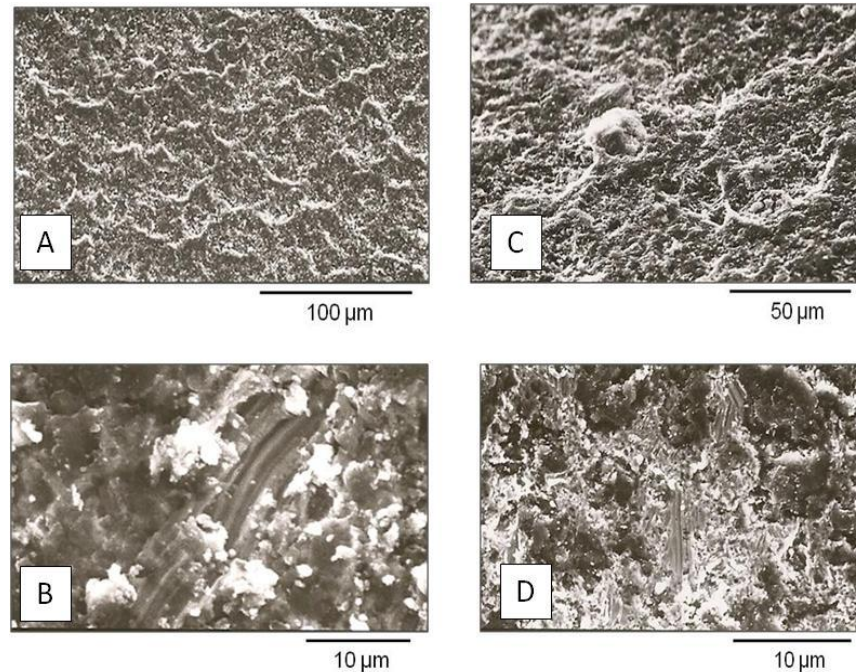


Fig. 6 Morfologías de daño para el acero 310 expuesto a partículas de alúmina en las condiciones siguientes: A) 450⁰C, 2.5 m s⁻¹; B) 600⁰C, 4.5 m s⁻¹; y partículas de arena: C) 450⁰C, 2.5 m s⁻¹; y D) 600⁰C, 4.5 m s⁻¹.

Para ambos aceros, las pérdidas de peso obtenidas al utilizar partículas de alúmina de tamaño promedio 560 μm fueron más altas que al usar partículas de arena de 600 μm, pero las diferencias fueron más significativas para el acero 1020, en particular a 600⁰C. De manera interesante, a una velocidad de impacto de 2.5 m s⁻¹ y a 450⁰C se observó un comportamiento similar al emplear ambos tipos de partículas, es decir, no se registró pérdida de peso. Bajo estas condiciones, análisis vía EDX no mostraron enriquecimiento superficial de silicio o aluminio en las superficies de contacto, a diferencia de los resultados previos obtenidos por el presente autor y colaboradores a temperaturas y velocidades de impacto menores de 450⁰C y 2.5 m s⁻¹, respectivamente ⁽¹⁶⁾. En su trabajo con acero al carbono (mild steel) empleando partículas de arena a 450⁰C y 2.5 m s⁻¹, McAdam and Stringer⁽¹⁷⁾ reportaron un depósito de SiO₂ sobre la superficie del acero de aproximadamente 15 μm de espesor, comentando que la capa de óxido formada bajo esas condiciones no tiene un papel importante en la protección al sustrato. Este argumento es contrario a los resultados del presente estudio, donde en esas condiciones para ambos tipos de partícula erosiva se observó la formación de una capa densa y compacta de óxido.

A 2.5 m s⁻¹ y 600⁰C, empleando arena, la fig. 4 (d) mostró una capa de óxido con una menor densidad de agrietamiento en comparación con la costra observada empleando partículas de alúmina. Además, la pérdida de peso fue mucho menor al emplear partículas de arena. Exposición a 4.5 m s⁻¹ y a la temperatura más alta mostró una gruesa capa de óxido y mayor fisuramiento en la costra formada bajo impacto de partículas de arena. Al emplear partículas de alúmina, la fractura y desprendimiento masivo de óxido fue mucho más

evidente y el daño es confirmado por los datos de la fig. 6b, donde las pérdidas de peso fueron mucho mayores al usar partículas de alúmina.

El acero 310 mostro una tendencia similar de pérdida de peso tanto a ambas temperaturas de experimentación, 450°C como a 600°C, con valores de daño ligeramente más bajos al usar partículas de arena, pero con una notoria diferencia a una velocidad de impacto por arriba de 4 m s⁻¹. A 2.5 m s⁻¹, y con ambos tipos de partícula erosiva se observo formación de ondulaciones en la superficie de las muestras. A mayor velocidad de impacto se observo formación de acanaladuras típicas de un proceso de corte originado por abrasión de tres cuerpos, presentándose en mayor número y tamaño al usar partículas de alúmina.

Así, con partículas de tamaño similar de $\approx 600 \mu\text{m}$, para ambos aceros la arena produjo menos daño que la alúmina. Factores importantes para explicar lo anterior pueden relacionarse con la mayor resistencia mecánica de las partículas de alúmina, así como su forma. En el primer caso, durante el proceso de impacto (en particular a velocidades por arriba de 2.5 m s⁻¹) las partículas de arena son susceptibles a fragmentarse más fácilmente. En el segundo caso, al ser más redondas las partículas de arena producen mayor deformación plástica, y al incrementar la velocidad de impacto se produce una cantidad menor de acanaladuras o surcos en la zona afectada, en comparación con las partículas de alúmina más angulares. Entonces, el factor de forma de las partículas puede ser significativo (como ha sido demostrado en pruebas de erosión ⁽¹⁸⁾) pero a velocidades de impacto por arriba de 2.5 m s⁻¹ como es confirmado por las morfologías observadas: a velocidades de impacto más altas, partículas angulares producen mayor cantidad de acanaladuras en la superficie del acero, y esto es asociado a un mayor nivel de daño.

De manera general, y aunado al proceso de oxidación debido a las condiciones experimentales, la formación de ondulaciones (ripples) en la superficie expuesta al impacto de partículas sugiere que a velocidades de impacto por abajo de 3 m s⁻¹ un mecanismo de erosión es responsable del daño observado, mientras que por arriba de esa velocidad de impacto, un posible mecanismo asociado con abrasión de tres cuerpos puede tener una influencia importante.⁽¹⁶⁾

CONCLUSIONES

A 450°C y a velocidades de impacto por abajo de 3.5 m s⁻¹, el cambio de peso del acero 1020 es muy similar independientemente del tipo de partícula empleado. Sin embargo, a velocidades de impacto más altas, la diferencia es muy importante, presentándose un daño mucho mayor al emplear partículas de alúmina.

A 600°C y a la velocidad de impacto más baja (2.5 m s⁻¹), las muestras expuestas a partículas de arena presentaron un menor daño. A la velocidad de impacto más alta, se observo un valor de pérdida de peso cuatro veces más bajo al emplear partículas de arena que al emplear alúmina.

Para el acero inoxidable 310, la tendencia de pérdida de peso tanto a 450°C como a 600°C fue similar, con valores de daño ligeramente más altos al usar partículas de alúmina, y notando mas las diferencias a una velocidad de impacto por arriba de 4 m s⁻¹.

Utilizando partículas de arena, el comportamiento de los aceros 1020 y 310 es muy similar independientemente de la temperatura y velocidad de impacto.

Las partículas de arena produjeron un menor daño que las partículas de alúmina, aunque las diferencias en pérdida de peso fueron más significativas para el acero 1020 que para el acero 310. Las propiedades mecánicas y forma de las partículas erosivas tienen un papel relevante en el deterioro observado para los aceros de prueba.

A velocidades de impacto por abajo de 3 m s^{-1} y en base a las morfologías observadas, un posible mecanismo de erosión es responsable del daño, mientras que por arriba de esa velocidad de impacto, un posible mecanismo asociado con abrasión de tres cuerpos puede tener una influencia importante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico del CONACyT (México) para efectuar este trabajo. También, se agradece la asistencia técnica de la M.C. Gabriela Pedraza, y los Ings. Gregorio Vázquez Olvera y Jair Lugo Cuevas.

REFERENCIAS

1. Anderson, J., Carls, E., Mainhardt, P., Swift, W., Wheeldon, J., Brooks, S., Minchener, A., and Stringer J., J. Eng. Gas Turbines and Power, 1988, Vol.109, pp. 298.
2. Fernandes, S.M.C., Correa O.V., Ramanathan, L. V., Intercorr 2008, ABRACO, Recife, Brasil, Maio 2008, paper 123.
3. Hogmark, S., Hamersten, A. and Soldberg, S. Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, United Kingdom, 1983, paper no. 37.
4. Kang, C. T., Pettit, F. S. and Birks N., Metall. Trans. A, 1987, vol. 18, p. 1785.
5. Sundararajan, G., Wear, 1991, vol. 145, p. 283.
6. V.K. Sethi and I.G. Wright: Proc. Conf. on Erosion-Corrosion-Wear of Materials at Elevated Temperatures, Berkeley, CA, 1990, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1991, p. 18-1.
7. M.M. Stack, J.G. Chacon-Nava, and F.H. Stott: Wear, 1995, vol. 180, p.91.
8. Stack, M.M.; Chacon-Nava, J.G.; Stott, F.H., Mat. Sci. and Eng., 1995, vol.11, p1180.
9. MacAdam, S. and Stringer, J., Wear, 1993, vol. 169, p.141.
10. Woodford, D.A., Wood, R. T., Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, United Kingdom, 1983, paper no. 35.
11. Raask, E., Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, United Kingdom, 1979, paper no. 41.
12. Wang, B.Q., Geng, G.Q., Levy, A.V., NACE Corrosion/90, Las Vegas, Nevada, USA, 1990, paper 288.
13. Boiarski, A.A., Batelle Report NTIS No. FE-2325-19, Dec. 1978.
14. Peeler, J. P. K. and Whitehead, A.B., Chem. Eng. Sci., 1982, vol 37, p 77.

15. Tsutsumi, K., Tatebayashi, J., Hasegawa, K., Takamori, M., Okada, Y., Furobayashi, K., Proc. Int. Conf. on Fluidization (Fluidization VI), Grace, Shemilt, and Bergougnou, Editors, Baniff, Alberta, Canada, May 1989.
16. Chacon-Nava, J.G., Almeraya-Calderon, F., Martinez-Villafañe, A., Stack, M.M., Abrasion Resistance of Materials, Chapter 5, InTechWeb Publishing, Marcin Adamiak Editor, ISBN 978-953-51-0300-4, 2012.
17. MacAdam, S. and Stringer, J., Corrosion, 1990, vol. 135, p.156.
18. Liebhard, M. and Levy, A. V., Wear, 1991, vol. 151, p.381.