

Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino.

E. Albertin*, A. Sinatora**, G. Pitaluga**, A. Parada***.

*IPT. Sao Paulo, Brasil.

**USP. Sao Paulo, Brasil.

*** Facultad de Ingeniería Mecánica

Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.

Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba

Fax: (537) 260 2267

E – mail:

(Recibido el 21 de julio de 2007; aceptado el 5 de septiembre de 2007)

Resumen

Las aleaciones de alto cromo son empleadas para la fabricación de bolas de molino en industrias de procesamiento de minerales. Los usuarios y fabricantes requieren lograr mejores resultados técnicos-económicos en sus aplicaciones, por lo que necesitan aumentar los conocimientos relacionados con los aspectos estructurales de estos materiales. En este trabajo se realiza una investigación con vistas a establecer relaciones entre la estructura de las aleaciones y su comportamiento ante el impacto repetido que es un fenómeno característico en estos procesos.

Se funden bolas con varias aleaciones hipo eutécticas, eutécticas, e hipereutécticas; se prueban en un equipo que simula el impacto repetido. Los resultados permiten comprobar los buenos resultados de aleaciones hipo eutécticas con relaciones de Cr/C altas y a su vez altos contenidos de Cr y de aleaciones eutécticas para menores relaciones de Cr/C y menores contenidos de Cr, en ambos casos los carburos eutécticos son de forma simétrica, regulares y no forman redes continuas de carburos asimétricos bordeando los granos, que presentan peores comportamiento en el impacto repetido y que son el caso de las hipoeutécticas con bajas relaciones Cr/C y las hipereutécticas donde aparecen también grandes carburos primarios

Palabras claves: Alto-cromo, bolas de molino, impacto repetido, desgaste.

1. Introducción.

Los equipos de procesamiento de minerales están sujetos a severas condiciones de desgaste y de impacto como son los molinos de bolas para la trituración. En la industria del cemento y la minera los consumos de cuerpos moledores ocasionan pérdidas económicas considerables que pueden alcanzar cientos de millones de dólares en el mundo.

También cada día los nuevos diseños de molinos con altas energías de impacto exigen incrementar los parámetros de trabajo, principalmente la tenacidad.

Las aleaciones (hierros blancos) de alto cromo, siguen siendo las preferidas por las empresas consumidoras de bolas de molino, al brindar buenos resultados técnico-económicos, porque combinan buena resistencia al desgaste, resistencia moderada al impacto y, además, son baratas.

Una problemática que se presenta en el diseño de estas aleaciones es que, normalmente, la resistencia al

desgaste y la tenacidad requieren de propiedades y características estructurales que se contradicen. Para lograr buenos resultados en el comportamiento de estas aleaciones es necesario establecer un compromiso entre estas características y propiedades.

Las propiedades de tenacidad y resistencia al impacto son dependientes de las siguientes características estructurales del material: la cantidad, tipo y morfología de los carburos formados en la solidificación (K) y, la naturaleza de la matriz metálica (Mm).

Sobre el aspecto morfológico de los carburos, o sea, la forma, la distancia, la ubicación y los tamaños de la celda, existen diversos criterios. Algunos de ellos son, los siguientes:

- Maratray (1). La morfología del k eutéctico depende de la austenita primaria (ap). Al aumentar la (ap) se comprime el eutéctico y la (a) del eutéctico engorda a la primaria; o sea, que este k eutéctico se ubica en el borde del grano y se orienta

según el tamaño y la posición de las dendritas primarias. Esta microestructura hace que el carburo adopte la forma de plaquetas alargadas cuando las masas de (a) y eutéctico son similares.

- Jackson (2). La morfología ($a + m_{7C_3}$) es mejor para la tenacidad que la ($a + m_{3C}$). La primera corresponde a carburos más separados (divorciados) y, la segunda, en forma de red, que la hace más frágil.
- Sinatora (3). Demuestra que en la medida que aumenta el % de Cr los carburos se hacen más finos y en la medida que aumenta el % de C hay más carburos en la muestra total, pero menos en la celda eutéctica y, son más gruesos.
- Matsubara (4). En sus investigaciones determina la morfología para eutécticos que, por la distribución de los k pueden ser ventajosas al impacto, independientemente de ser estructuras con elevada participación de k. Estas estructuras, morfológicamente, responden muy bien a las condiciones de desgaste abrasivo. Comprobadas por Albertini (5) y sinatora (3, 6), estos autores recomiendan las aleaciones eutécticas, considerando que sus morfologías responden bien en ambas condiciones. Matsubara también recomienda aleaciones cercanas al eutéctico, donde los intervalos de solidificación sean estrechos y los k, divorciados, no forman las redes de las aleaciones hipoeutécticas de mayor intervalo de solidificación.
- Todos los autores coinciden en que la austenita residual (ar) inestable, es perjudicial por los cambios estructurales durante el trabajo de impacto, ya que éstos provocan grandes tensiones internas y a la vez, grietas que hacen quebrar o lasquear (spalling) las piezas.
- Cuando el % de k es bajo, las grietas avanzan más en matrices martensítica (mar) que en las matrices (a).
- La (a) es una matriz de mayor k_{ic} (tenacidad a la fractura), pero el inconveniente está en la fatiga de

impacto, por el endurecimiento deformacional. La (a) es más plástica y requiere de más trabajo para propagar la grieta.

- Cuando el % k es mayor del 30% k, probablemente ocurre la propagación de la grieta a través de la interfase carburo –matriz, independientemente del tipo de matriz.

El objetivo de este trabajo consistió en comprobar los comportamientos de bolas de $\varnothing 50\text{mm}$, (de algunas aleaciones hipo eutécticas, eutécticas, o cercanas al Eutéctico), en condiciones de impacto repetido, y relacionar su C.Q y estructura con los resultados de deterioro.

2. Desarrollo experimental.

Se trabajó con 7 variantes estructurales. Se seleccionaron 6 aleaciones eutécticas, o cercanas a las eutécticas, con alta participación de carburos, y dos aleaciones comerciales y de la producción con estructuras algo similares.

Se fundieron en horno de inducción 12 bolas por cada aleación de las 6 seleccionadas. Estas aleaciones fueron fundidas con mezclas de resina furánica. El modelo fue una placa con una mazarota central que alimenta 5 bolas, ubicadas de forma radial y un alimentador con su correspondiente tragadero. En la Tabla # 1 aparecen las composiciones de las corridas experimentales. La aleación No. 1 y la No. 2 son aleaciones con buenos resultados al desgaste con abrasivos considerados blandos $H_v \leq 800$ (6)

Se seleccionó una aleación eutéctica con alto contenido de cromo, la No.4; una hipo-eutéctica con alto contenido de cromo, la No.5; una aleación eutéctica con contenidos clásicos de cromo y molibdeno, la No. 6; y, una eutéctica con cromo alto y Ni, la No.3, para comprobar el efecto de una austenita más estable al impacto repetido. A todas las variantes, con excepción de la que contiene Ni, se les dio tratamiento térmico.

Tabla #1: Aleaciones Investigadas.

Aleaciones	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
C	3.5	3.3	3.2	3	2.6	3.5
Cr	24	24	25	31	27	18
Mn	0.7	0.8	0.67	0.71	0.74	0.81
Si	0.62	0.58	0.52	0.65	0.68	0.6
P	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
S	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Mo o Ni			1.6Ni			1.25Mo
Cr / C	6.8	7.2	7.8	10.3	10.3	5.2
Carácter	Eutéctica	Eutéctica	Eutéctica	Eutéctica	Hipo-eutéctica	Eutéctica

Selección del Tratamiento Térmico (TT).

Con el TT se busca transformar la estructura de austenita residual (Ar), en estructura martensítica. La morfología de los carburos K eutécticos obtenidos en la fundición (solidificación) no cambia con el TT. En el TT, al desestabilizar la austenita se aumenta el % de K secundarios, que normalmente se presentan muy finos, del grano hacia el centro de la celda eutéctica. Se hicieron pruebas preliminares de TT. TT con bolas unitarias. Los TT probados fueron los siguientes:

- A) 700°C / 2hr (desestabilización de la Austenita (A) + 1000°C / 3hr (Austenización) + Temple en aire forzado + Rev. 250°C.
 B) 700°C / 2hr (desestabilización de la A) + 950°C / 5hr (Austenización) + Aire Forzado + Rev. 450°C / 10hr.

Ensayo de Impacto Repetido.

Para este ensayo se empleó un equipo diseñado y construido en el IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Área de Metalurgia, Fundição, Sao Paulo ,Brasil) para impacto repetido, similar al que diseñó y utilizó R. Blickensderfer and J.H.Tylzack del Bureau of Mines, Albany Research Center. (10) (11) (Ver figura 2). Se considera este equipo como el más apropiado y representativo de los efectos del impacto repetido y que produce spalling, al probar materiales resistentes al desgaste. Las bolas son ascendidas por un elevador de cangilones y se dejan caer desde una altura de 3,5 m hasta una columna de bolas retenidas en la parte inferior del equipo; las mismas se van dosificando al elevador; múltiples impactos dentro de un rango de energía son producidos entre las bolas. Para completar el ensayo y que sea representativo, se requieren de 150 000 a 200000 impactos por bola, como mínimo. Un contador mecánico registra el paso de las bolas. Para alcanzar los 150 000 impactos / por bola fue necesario emplear unos 20 días.

Los deterioros que experimentan las bolas fueron definidos como: quiebra o rotura, spalling o lascas apreciables y micro spalling en los casos de lascas menores de 0,5 gramos.

Se utilizaron 6 bolas por cada variante y se marcaron mediante una clave con ranuras de radio suave de 3 mm de profundidad. Las bolas se pesaban inicialmente en pesa digital de precisión de una décima, (0.1 gramo) Las bolas que se quebraban o presentaban spalling considerablemente grande (más de 30 gramos) se retiraban.

Se incluyeron 2 tipos de bolas empleadas en fábricas de proceso de minerales. Se intercalaron en el ensayo cuando fueron separadas algunas de las que se deterioraron rápido. Las bolas se pesaban inicialmente y cada 20000 impactos / por bola se pesaban nuevamente. Se hacían inspecciones visuales del spalling y del micro spalling.

3. Análisis de resultados.

Análisis de los resultados del impacto repetido vs composición química.

Analizando la Tabla 2 se puede observar que:

- La de mejores resultados es la No.5 hipo-eutéctica con el mayor contenido de Cr (27%) y relación Cr / C (10).
- Las de peores resultados son las CrP y CrO hipo-eutécticas con el menor contenido de Cr (20 a 15%) y las menores relaciones Cr / C (6 a 7). Estas bolas fueron las comerciales suministradas por la empresa.
- También la eutéctica No.1 con revenido 250°C y la No.3 sin tratamiento directamente de fundición. (As cast) presentaron un deterioro prematuro.
- Las de comportamiento aceptables son las eutécticas No.2, No.4, y No.6.
- Esta aleación contiene 1.25% de Mo
 ** Rev a 250°C
 *** Con 1.6% de Ni, sin TT (As Cast)

Análisis de los resultados del impacto repetido vs estructuras de las muestras seleccionadas.

El análisis de la morfología de las estructuras estudiadas se hace en analizador de Imágenes con software Leico Qwin del Laboratorio de Fenómenos de Superficie, Facultad de Mecánica de la USP, Sao Paulo Brasil.

Analizando la Tabla 3 se puede observar que:

- La de mejores resultados es la No.5 hipo-eutéctica con el mayor contenido de Cr (27%) y relación Cr / C (10) presenta una celda eutéctica pequeña (48 µm), carburos divorciados, carburos finos (5 µm) en borde de la celda y muy finos (1.5 µm) en el interior, los más gruesos como los finos son de medidas simétricas. Se confunden los carburos más gruesos en el borde de la celda y en el interior. (Ver figura 3).
- Las de peores resultados son las CrP y CrO hipo-eutécticas con el menor contenido de Cr (20 a 15%) y las menores relaciones C / C (6 a 7). Los carburos que no son divorciados forman redes, la celda eutéctica es pequeña pero el carburo grueso en el borde es grande y de gran asimetría (21 / 4 µm) y los finos en el interior (7/1µm). (Ver figura 4). También, la eutéctica No.1, con Rev 250°C, al quedar muy tensionada y tener alguna Ar y la No.3, sin Tratamiento directamente de fundición (As cast) con tensiones y Ar presentaron un deterioro prematuro.
- Las de comportamientos aceptables son las eutécticas No.2, No.4, y No.6. En estas aleaciones

60 Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino.

los carburos son divorciados. Los K gruesos y finos, de forma general, son simétricos, más pequeños que las otras estructuras analizadas. Dentro de las eutécticas, en las de mejores

resultados, la celda eutéctica es más pequeña y los carburos, en el borde y en el interior, presentan las menores dimensiones. (Ver figura 5)

Tabla #2: Resultados de los ensayos de impacto repetido vs composición química de las muestras seleccionadas.

Aleaciones	%Cr	%C	Cr / C	Característica	Indice de deterioro gr / bola. Impacto x 10 ⁻⁵	# de impactos antes del spalling	Resultado
1 **	24	3.5	7.3	Eutéctica	6.1	76 000	Peor
2	24	3.3	7.3	Eutéctica o cercana	1.02	108 000	Mejor
3 ***	25	3.2		Eutéctica	4.3	60 000	Peor
4	31	3	10.5	Eutéctica o cercana	3.9	72 333	Regular
5	27	2.6	10	Hipo-eutéctica	0.26	136 000	Mejor
6*	18	3.5	5	Eutéctica	3.48	116 000	Regular
CrP	20.5	2.8	7.3	Hipo-eutéctica	14	63 300	Peor
CrO	15	2.5	6	Hipo-eutéctica	6400	26 600	Peor

Todas las aleaciones excepto la No. 1 y la No. 3 se trataron con Rev. alto a 450° C

Tabla 3: Resultados del impacto repetido vs estructuras de las muestras seleccionadas.

Aleación/ # de bola	% K		Tamaño Celda eut. (cm)		Tamaño K(Nk) (cm)		Distancia entre K(λ) (cm)	
	Teórico	Real	Teórico	Real	Grueso	Fino	Grueso	Fino
1	35		75	110	6	1.6	7.5	3
2	33	-	70	60	6.5 – 7	1 – 1.8	10	2
3	33	31	45	70	7	1.8	6.5	2
4	34	32	70	120	12	4	9	4.2
5	25	23	45	48	4.5 – 6	1 – 2	4	2
6	35	35	90	100	7.3 – 8	2.5 – 3.5	8.5 – 9	3.7
Cr y CrO	25	25	60	40	21/4*	7/1*	8	2

**El 21 y el 7 significan largo y el 4 y 1 corresponden al ancho. Son carburos asimétricos.

4. Conclusiones.

- El TT (B) tuvo buenos resultados, de forma general, al aplicarse a todas las bolas para las condiciones de impacto repetido. Los mejores resultados, por orden de aleaciones: las No.5, 2 y 6.
- En el grupo de aleaciones de mayores % de Cr (26 – 28) y relaciones Cr/C más altas aproximadamente 10, (con TT B) de revenido alto prolongado (Revenido 450°C / 10 hrs). En este grupo las aleaciones hipo-eutécticas presentaron ventajas sobre las aleaciones eutécticas. La aleación más ventajosa, la No.5 (2.56% C; 26.8 % Cr).
- En el grupo de aleaciones de menores % de Cr y relaciones Cr/C menores. Con TT (B) de revenido alto prolongado (Revenido 450° C / 10 hrs). En este grupo las aleaciones eutécticas presentaron ventajas sobre las hipo-eutécticas. Las aleaciones más ventajosas: la No.2 (3.3% C; 23.6% Cr) y la No. 6 (3.5% C ; 18.2 % Cr).
- Partiendo de que con el TT B que se les dio a todas las bolas y en todas se lograron estructuras de martensita de Revenido en un alto %, las características micro-estructurales de los K pasan a jugar un papel decisivo en la diferencia de los comportamientos.
- Estas dos conclusiones están relacionadas con la ventaja que proporciona la morfología estructural de los carburos (K) = Carburos separados (divorciados), de forma bastante simétrica.
 - en el caso de la hipo-eutéctica: celdas pequeñas y se mezclan los carburos grandes y pequeños, siendo el tamaño de los K, de forma general, pequeños.
 - en el caso de las eutécticas con mejores resultados: los K, que debieran ser mayores en el borde de la celda, siguen siendo chicos y los carburos en el centro de la celda son más pequeños que lo que debieran.
- En el caso del TT (B) para las aleaciones con mayores % de Cr y relaciones Cr/C las

características microestructurales (parámetros) más ventajosas de las aleaciones hipo-eutécticas son:

- celda eutéctica pequeña aproximadamente $45\mu\text{m}$
- Nk tamaño de los k gruesos aproximadamente $6.5\mu\text{m}$
- Nk tamaño de los k finos aproximadamente $2\mu\text{m}$
- Dist.entre K gruesos: $2 - 4\mu\text{m}$.
- Dist.entre K finos: $2\mu\text{m}$.

Los K se encuentran separados, divorciados y son de forma simétrica, regulares. Se confunden los K finos y gruesos.

- 7 En el caso del TT (B) para las aleaciones con menores % de Cr y menores relaciones Cr / C las características microestructurales (parámetros) más ventajosas de las aleaciones eutécticas son:
- celda eutéctica aproximadamente $60\mu\text{m}$
 - Nk tamaño de los k gruesos aproximadamente: $8\mu\text{m}$
 - Nk tamaño de los k finos aproximadamente: $2\mu\text{m}$
 - Dist.entre K gruesos: $10\mu\text{m}$
 - Dist.entre K finos: $2\mu\text{m}$

Los k gruesos, bien separados en el borde de la celda eutéctica y, el fino, concentrado en el centro de la celda. Los k tienen forma regular y simétrica.

5. Bibliografía.

1. Maratray. F; usseglio –Nanot ,R.Factors affecting the structure of chromium and chromium-molybdenum white irons.” Climax Molibdenum Co. 1970.
2. Jacson R.S. “Metallurgical and production aspects of high chromium cast iron for abrasion resisting applications”. British Foundryman, Vol 67 nr.2.
3. Sinatora. -Effect of Carbon , Chromium and Molibdenum contents in solidification and microstructure of 15% or 20% Cr white cast irons. International Foundry Congress. Moscow. URSS. 1986.
4. Matsubara. Y. Eutectic solidification of high-chromium cast iron eutectic structures and their quantitative analysis .Transaction. A F.S. 1981.
5. Albertin. E.-Efecto del porcentaje de carburos y de la microestructura de la Matriz metálica sobre la resistencia al desgaste en Los hierros fundidos blancos de alto cromo. Ensayos en Molinos de Bolas. Tesis de Doctorado. São Paulo, Brasil. 1993. IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
6. Sinatora. A S; Albertin. E.-Temperabilida de de ferros fundidos de alto cromo –efeito dea relacao %cr/ %cC e do manganes. Congreso Nacional de Fundicao. São Paulo. 1991. Blickensderfer. R”The effect of heat treatment on spalling of a Cr-Mo white cast iron

International Conference on Wear of Materials. Ludema. K. C. Virginia. E.U.A. 1983.

7. Sinatora. A; Albertin. E. Análisis de fractura e de desgaste irregular de bolas de moinho de ferro fundido branco com alto cromo. Seminario sobre materiales Resistentes al Desgaste. Uberlandia. 1991.
8. Sinatora. Características de solidificao e avaliacao quantitativa das microestructuras de ferros fundidos brancos de alto cromo com 0.6 a 4 % silicio,resultados preliminares de Congreso Nacional de Fundicao – CONAF.-1993. São Paulo. Brasil.
9. Zum Gahr .K.H.; Doane ,D.V. Optimizin fracture toughness and abrasion resistance in white cast iron. Metallurgical Transactions.1986.
10. Blickensderfer. R; Tylczak. J. H. A large scale impact spalling test.Wear.84,1982.
11. Blickensderfer. R-Spalling of high-chromium white cast iron balls subjected to repetitive impact .International Conference on Wear of Materials. Denver. Colorado. EUA.
12. L. Goyos. Influencia de los factores estructurales en la durabilidad de los cuerpos moledores. Tesis de Doctorado. 1984. ISPJAE. Habana, Cuba.

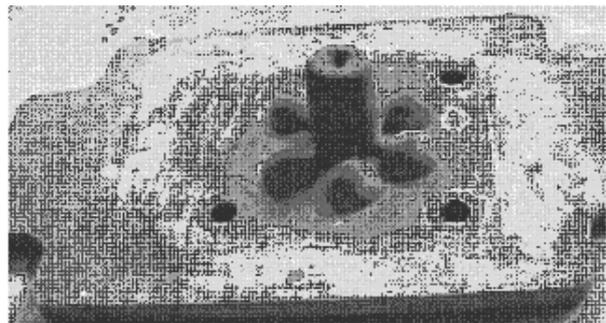


Figura 1.-Placa para fundir bolas de diámetro 50mm

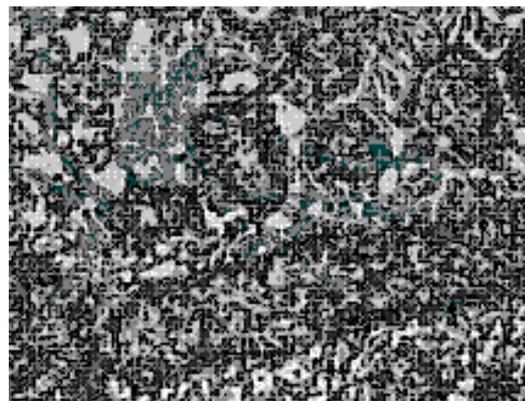


Figura. 3: Micro-estructura de la aleación No.5

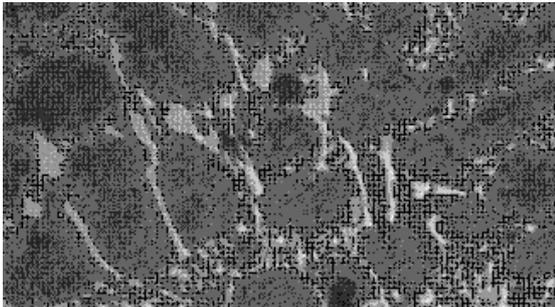


Figura:4: Microestructura de las aleaciones Cr0 y CrP, de bolas comerciales, que sufrieron el mayor deterioro.(200x)



Figura 5: Micro-estructura de la aleación eutéctica No.2



Figura 2: Elevador para el ensayo de impacto repetido.

Relationship among factors micro - structural and impact repeated in alloys of high chromium for mill balls.

Abstract.

High Chromium alloys are used to manufacture grinding balls for the Industry of Construction Materials. Customers and users need to improve their knowledge about the relationships between microstructure and the parts damage in these alloys to obtain better technical-economics results. In this paper the results of a research to obtain different microstructures of eutectics, hypoeutectics and hypereutectics alloys are presented, searching for the lesser damage in these alloys. These alloys are tested in a repeated impact testing machine that simulate its mechanical behaviour .The results show a good behaviour for hypoeutectic alloys with high relations of Cr/C and high contents of Cr, also eutectic alloys with less Cr and relations Cr7C. In both cases the eutectic carbides are dispersed and separated, symmetrical, regularly homogeneous and not in the form of a continuous network at the grain boundaries. A continuous network was only found in the case of hypoeutectic microstructures with lower contents of Cr and Cr/C relations with a bad behaviour.

Key words: High chromium, grinding balls, repeated impact, damage-wear.