

Tecnología de fabricación de arrabio con la inyección de combustibles y otros materiales por toberas en el horno alto^(*)

I parte. Características de los combustibles auxiliares y su influencia en el proceso del horno alto

L. García^(*), A. Cores^(**), A. Formoso^(**), A. Babich^(***) y S. Yaroshevskii^(***)

Resumen La inyección de combustibles por toberas en el horno alto es una práctica utilizada en la mayoría de los hornos con el objetivo principal de reducir el consumo de coque por tonelada de arrabio fabricado. La naturaleza de estos combustibles es muy diversa y es función de los recursos de cada país y del precio del combustible. En la actualidad, la práctica más extendida es la inyección de carbón (pulverizado y granulado) y cada vez es mayor el número de hornos con instalaciones para la inyección de carbón.

Palabras clave: **Horno alto. Consumo de coque. Inyección de combustible. Inyección de carbón.**

Ironmaking technology with fuels and other materials injection in blast furnace tuyeres

Part 1. Auxiliary fuels characteristics and its influence in the blast furnace process

Abstract The injection of fuels by tuyeres in the blast furnace is a used practice in most furnaces with the principal aim to reduce the coke consumption by ton of pig iron produced. The nature of these fuels is very diverse and depends on the resources of each country and of the fuel price. At this moment the coal injection (pulverized and granular) is the most extended practice, and the number of furnaces with facilities for coal injection increases continuously

Keywords: **Blast furnace. Coke consumption. Fuels injection by tuyeres. Coal injection.**

1. INTRODUCCIÓN

El proceso más importante para la fabricación de metal primario por reducción directa de los óxidos de hierro, es el que se realiza en el horno alto, que

totaliza el 98 % de la fabricación total de arrabio. El 2 % restante se produce en una variedad amplia de procesos alternativos que intentan reducir directamente los concentrados de minerales de hierro para evitar su aglomeración lo máximo posible y utilizar carbones no coquizables como reductores.

La tecnología de operación del horno alto está constituida por un conjunto de fenómenos mecánicos, físicos y físico-químicos, que ocurren durante la transformación de los materiales de la carga (aglomerados de minerales de hierro, coque, fundente, etc.) hasta la obtención de metal primario (arrabio). El horno alto es un reactor en contracorriente en donde se desarrolla el proceso básico de

(*) Trabajo recibido el día 5 de agosto de 1997.

(*) Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas. 1ª avda. Núm. 1604. Miramar, 11300 Ciudad de La Habana (Cuba).

(**) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040-Madrid (España).

(***) Universidad Estatal Tecnológica de Donetsk. Arteoma str., 58. 340066 Donetsk (Ucrania).

reducción de los aglomerados de hierro en su descenso por el gas reductor que asciende, con transferencia de oxígeno del aglomerado al gas e intercambio de calor y masa entre las fases. La operación del horno es muy compleja y se realizan investigaciones sobre una gran variedad de parámetros que influyen en la marcha del horno, como son: reducibilidad de los aglomerados; resistencia de la carga al hinchamiento, rotura y adherencia; ciclo de álcalis; reactividad del coque y reacciones escoria-arrabio. El conocimiento adquirido en cada uno de estos campos ha contribuido al desarrollo del horno alto de gran capacidad de producción de arrabio y elevada eficiencia técnica y económica.

La etapa moderna de desarrollo de la industria siderúrgica está caracterizada, fundamentalmente, por la utilización de tecnologías de vanguardia, teniendo en cuenta la economía de recursos naturales y la protección del medio ambiente. La fabricación de arrabio en el horno alto no es ajena a esta tendencia y, entre las mejoras tecnológicas que se aplican a este proceso, se destaca la inyección de combustibles y materiales complementarios por toberas al horno alto.

El costo elevado de la construcción y reconstrucción de las baterías de coque, el incremento de los gastos en la protección del medio ambiente durante la fabricación del coque, así como la paulatina reducción de los recursos en carbones coquizables conllevan a la necesidad de disminuir el consumo de coque en el horno alto mediante su sustitución por combustibles auxiliares. Los costos para construir una batería de hornos de coquización en un lugar nuevo o en una instalación existente, podría oscilar entre 37.500 y 50.000 PTA/t anual de

capacidad. Por otra parte, una característica común de la industria del coque y sus subproductos es el envejecimiento de sus instalaciones. Actualmente, la edad promedio de los hornos de coquería es de 18-23 años (1).

Con tal estado de cosas, la idea de inyectar por toberas distintos combustibles auxiliares en el crisol del horno alto es un tema de actualidad entre los siderúrgicos. En la operación del horno se han propuesto decenas de variantes de utilización de combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La aplicación industrial más importante ha sido la inyección por toberas de gas natural y de batería, fuel oil y carbón (pulverizado y granulado).

2. CONSUMOS ENERGÉTICOS EN LA FABRICACIÓN DE ARRABIO

La industria siderúrgica es una de las mayores consumidoras de energía, por ejemplo, en Japón esta industria consume el 13-15 % de toda la energía (2). En la fabricación de 1 t de acero laminado se consumen aproximadamente 1,5 t de combustible convencional, del cual más del 65 % es coque. Más del 80 % de la producción de coque está destinada a la industria siderúrgica y, principalmente, a la fabricación de arrabio.

En la tabla I se incluye el consumo de energía por sectores en 1994 para algunos de los principales países fabricantes de acero. En la tabla II se muestra el balance de combustible en la industria siderúrgica en 1994 (3). En las etapas principales del proceso siderúrgico, se destaca que la fabricación de arrabio es la mayor consumidora de combustible en la

TABLA I.— Estructura del consumo de energía por sector en 1994, % de la energía neta requerida

TABLE I.— Energy consumption structure by sector in 1994, % of net energy requirements

País	Fabricación de arrabio	Fabricación de acero líquido	Laminado, acabado, otros	Relación arrabio/ / acero	HEA, %
Alemania	63,4	8,6	28,0	0,73	21,8
Austria	71,1	0,6	28,3	0,82	0,0
España	45,0	25,9	29,1	0,41	58,6
Finlandia	60,7	10,7	28,6	0,76	20,1
Francia	63,5	10,3	26,2	0,76	27,3
Holanda	81,5	1,3	17,2	0,90	0,0
Japón	60,3	9,4	30,3	0,75	31,6
Luxemburgo	65,3	9,4	25,3	0,63	14,5
Suecia	45,0	16,4	38,6	0,61	36,1
Sudáfrica	62,7	11,3	26,0	0,74	33,2
Reino Unido	61,2	9,9	28,9	0,69	24,7

TABLA II.— Balance de combustible en la industria siderúrgica en 1994

TABLE II.— Fuel balance of the steel industry in 1994

País	Consumo total de coque, kg/ta	Consumo en fabricación de arrabio, kg/ta	Inyección de combustible, GJ/ta	Inyección de carbón, kg/ta	Inyección de fuel oil, kg/ta	Producción de coque, kg/ta	Balance coque,* %
Alemania	428	379	3,9	69	45	150	35
Austria	502	456	1,6	0	39	—	—
Bélgica	504	439	3,8	119	0	405	80
España	527	475	0,9	0	21	490	93
Finlandia	418	359	3,3	0	84	358	86
Francia	390	366	4,3	141	3	343	88
Holanda	404	359	4,8	148	0	413	102
Japón	473	412	3,1	99	1	—	—
Luxemburgo	499	447	3,2	0	79	—	—
Suecia	417	392	2,3	80	0	—	—
Reino Unido	425	453	3,2	39	52	455	87

* Balance de coque = Producción de coque/Consumo total de coque.

industria siderúrgica (más del 50 %); por otra parte, en el horno alto, el coque es el combustible más utilizado, lo que ejercerá una influencia determinante en los costos de fabricación de las posteriores etapas de procesamiento. Se estima que el 30-35 % del coste del arrabio está determinado por el consumo de combustible y el elevado costo del coque. Por tanto, una de las principales tareas de operadores e investigadores es disminuir el consumo de coque.

Aunque la idea de disminuir el consumo de coque mediante la inyección de combustibles auxiliares surge en la primera mitad del siglo XIX, antes del empleo del viento caliente, es a partir de 1950 cuando se inicia su aplicación a escala industrial, y en la década de 1960-1970 tiene una amplia difusión en todos los países con desarrollo siderúrgico. En esta etapa predomina el empleo de dos combustibles: gas natural en países con grandes reservas (EE.UU y la antigua URSS) y fuel oil (Japón, Francia, Reino Unido, Alemania, España y otros), aunque también se han desarrollado, a menor escala, variantes alternativas de inyección de otros sustitutos parciales del coque: gas de batería, alquitrán, petróleo crudo y fracciones ligeras (queroseno o gasolina de baja calidad, gases reductores calientes, carbones no coquizables, etc). También se ha ensayado la inyección de mezclas de combustibles líquidos y sólidos (emulsiones de carbón/fuel oil).

En los últimos años se han ensayado inyecciones de diferentes residuos de la propia industria siderúrgica (fangos, lodos, aceites, polvo de tragante), así como de lignina, biomásas, plásticos, neumáticos y otros desechos de goma de la industria automotriz.

En la figura 1 se muestra la tendencia a la disminución del consumo de coque en algunos de los principales países fabricantes de acero (3).

3. RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

El volumen de combustible convencional que se consumía en el mundo a finales de los años 80 era del orden de 9×10^9 t. Se estima que para el año

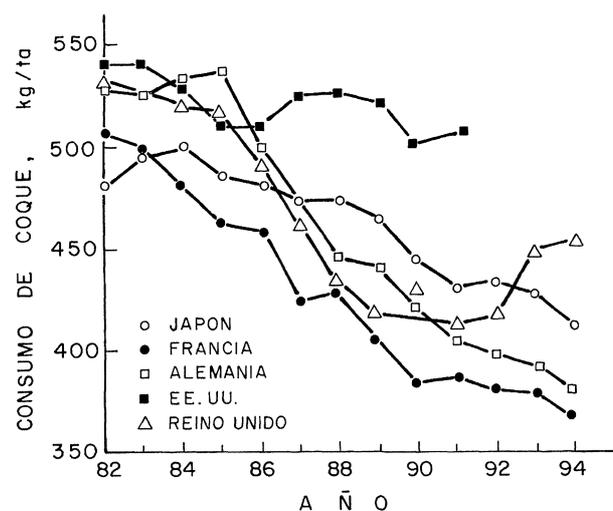


FIG. 1.— Consumo de coque utilizado en la fabricación de arrabio, por países.

FIG. 1.— Coke consumption use in ironmaking by countries.

2000 esta cifra se incrementará hasta 25×10^9 t. Más del 90 % de las reservas energéticas existentes tienen origen en fuentes minerales. A nivel mundial, cerca del 95 % de la energía se obtiene tomando como base el uso de combustibles de origen orgánico y mineral. A finales de este siglo se prevé que el combustible de origen orgánico quedará como la principal fuente de energía.

La mencionada redistribución de las proporciones de los combustibles minerales está determinada por circunstancias relacionadas con el menor costo y facilidades de transporte de los combustibles líquido y gaseoso, aunque ello se encuentra en franca contradicción con las reservas exploradas de estos combustibles. Esta contradicción es una consecuencia del propio desarrollo no planificado de la sociedad y fue la causa de la profunda crisis energética que ocurrió en los años 1973-1975.

Con respecto a lo anterior ya se observa un notable incremento en la extracción de carbón y un incremento de su consumo en algunas de las principales ramas de la industria siderúrgica.

A continuación se analizan brevemente los resultados y perspectivas de utilización en la industria siderúrgica de los principales combustibles.

3.1. Combustible gaseoso

Las reservas mundiales estimadas de gas natural (GN) son $55 \times 1,0^{12}$ m³ (4). En 1985, la extracción de GN en los países occidentales alcanzó los $992,4 \times 10^9$ m³. La antigua URSS ocupaba el primer lugar en reservas de GN; en 1986 se extrajeron 686×10^9 m³ con una tasa de crecimiento anual del 7 %. Si en el mundo se mantienen los niveles actuales de crecimiento en la extracción quedarán reservas de GN para 20-30 años.

Existe una demanda creciente de GN debido a una serie de nuevas leyes establecidas por los países para la protección del medio ambiente, por cuanto en las condiciones creadas, el combustible que mejor cumple con la normativa es el GN. Otra causa de la creciente escasez en GN es su creciente empleo para satisfacer los requerimientos energéticos de la población y su empleo en la industria química.

En la actualidad, muchos países industrializados, por ejemplo, Japón y la Unión Europea, solucionan la demanda de GN mediante su importación y el aceleramiento de programas para la obtención de combustibles sintéticos gaseosos. Sin embargo, según la opinión de reconocidos especialistas, la eliminación del déficit de GN, en relación con la solución de estos problemas, no se prevé antes de 20-30 años. Así pues, en las mencionadas causas, se encuentra que cada vez es más limitado el uso de este combustible en la industria siderúrgica.

La inyección de GN fue una medida de gran

repercusión en el proceso del horno alto en los países con importantes reservas de este combustible (EE.UU y la antigua URSS), permitiendo mejoras del proceso. Las primeras inyecciones de GN se realizaron en 1957 en la factoría siderúrgica "Dnepropetrovsk" (URSS). Desde los primeros ensayos, con caudales de 70-90 m³/ta, el consumo de coque se redujo en un 10-14 %. Ya en 1989, en la antigua URSS, 112 de los 133 hornos existentes utilizaban GN en volúmenes superiores a 11×10^9 m³/año (2). El bajo precio (en aquel momento), la alta efectividad y el bajo coste de las instalaciones de inyección, han facilitado la utilización de esta tecnología. En los países de Europa Occidental y Japón, este combustible no tiene aplicación amplia en el horno alto, principalmente por la ausencia de grandes reservas.

Al inyectar GN varían considerablemente las características de fenómenos locales del horno alto, principalmente las condiciones térmicas y gasodinámicas de la operación del horno. Según los datos de Ramm (5), estas variaciones se caracterizan por las dependencias incluidas en la figura 2.

La economía de coque al inyectar GN se logra tomando como base:

- Aumentar la reducción indirecta (con CO e H₂) y disminuir la reducción directa (con el carbono del coque).
- Sustituir parcialmente el carbono del coque por el carbono del GN.
- Disminuir la entrada de azufre al horno, la basicidad y el volumen de escoria debido a la reducción del consumo de coque como consecuencia de los dos primeros factores.

El gas de batería es otro combustible gaseoso con aplicación en el horno alto. Las primeras experiencias industriales se realizan en los EE.UU. y la antigua URSS, aunque también ha tenido aplicación en Canadá, Reino Unido y Francia. Los recursos en gas de batería son muy limitados, ya que, aproximadamente el 70 % se quema en los hornos de calentamiento de los talleres de laminación y en las calderas de centrales termoeléctricas, aunque esto varía en función de las condiciones locales de cada factoría. Se debe destacar, que para utilizar el gas de batería como combustible auxiliar para su inyección al horno se requieren grandes inversiones en la instalación de equipos de compresión y limpieza del gas. Lo anterior ha sido uno de los grandes impedimentos para su empleo como sustituto parcial del coque, aunque, por ejemplo, a tal efecto se emplea en la planta siderúrgica de Makievka, en Ucrania (6) y en BHP Steel's Port Kembla, en Australia (7).

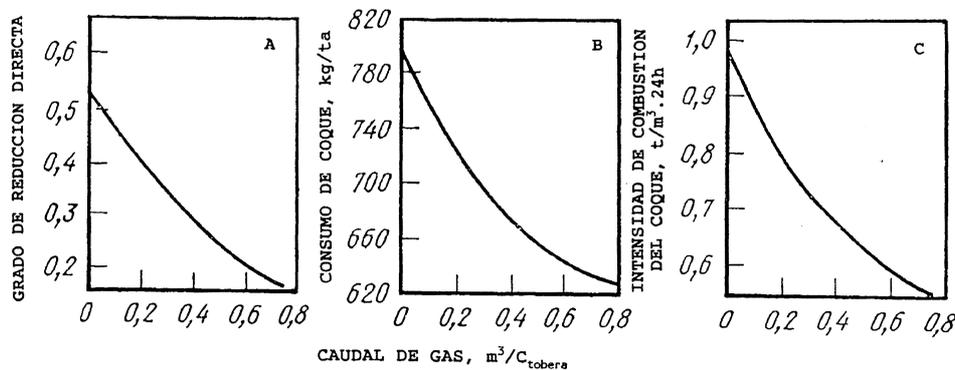


FIG. 2.— Dependencia entre algunos parámetros del horno alto y el caudal de gas natural.

- a) Grado de reducción directa.
- b) Consumo de coque seco.
- c) Intensidad de combustión del coque.

FIG. 2.— Dependence between some operating furnace parameters and natural gas rate.

- a) Direct reduction degree.
- b) Dry coke rate.
- c) Intensity of coke combustion.

3.2. Combustible líquido

Las reservas confiables de petróleo se estiman en $84,3 \times 10^9$ t (3), que prevén un suministro para unos 45 años. En la actualidad, el petróleo es prácticamente insustituible en la industria automotriz, aviación, petroquímica y otras.

En la industria siderúrgica, la mayor demanda de fuel oil y de otros derivados del petróleo se observa en la República Federal Alemana, Japón y Francia a comienzos de los años 70. Por ejemplo, en Japón, en 1973, el consumo de fuel oil fue de $13,83 \times 10^6$ t, incluyendo el consumo del horno alto de $5,41 \times 10^6$ t. En esta etapa, la tasa de inyección de fuel oil se incrementó hasta 60-80 kg/ta. También se realiza la inyección de combustible líquido en hornos altos de EE.UU., Canadá, Reino Unido, España y otros países.

En abril de 1996, los hornos altos de Rautaruuki Steel, en Raane (Finlandia), operaron con una tasa de inyección de 110 kg/ta, reduciendo el consumo de coque hasta 324 kg/ta (8). En algunos hornos de Hüttenwerke Krup Mannesmann, en Duisburgo (Alemania) se han realizado inyecciones superiores a 140 kg/ta y se consiguen consumos de coque inferiores a 300 kg/ta. Una tasa de inyección de fuel oil tan alta requiere un enriquecimiento del viento en oxígeno, y presenta la desventaja de un aumento de la entrada de azufre en el horno. Los resultados de operación indican que para tasas de inyección de

fuel oil entre 0 y 156 kg/ta, se puede conseguir una tasa de sustitución de 1,18 kg coque/kg fuel oil (9).

Entre 1973-1975, la crisis energética mundial provocó el aumento de los precios del petróleo en 3-4 veces, y hacia 1982 en 15-18 veces. Como resultado, ya a fines de los años 70 e inicios de los 80, la utilización de fuel en el horno alto comienza a reducirse drásticamente. Los países de la Unión Europea: Finlandia, Luxemburgo, Reino Unido, Alemania y Austria mantienen un determinado nivel de inyección, aunque se prevé que tienda a disminuir (10 y 11). En España, con la remodelación de sus hornos altos, esta tecnología será sustituida en su totalidad por la inyección de carbón pulverizado.

3.3. Combustible sólido

A nivel mundial, las reservas de combustible sólido constituyen más del 80 % de las reservas exploradas de combustible. Sin embargo, a pesar de esta magnitud, los recursos en carbones coquizables son muy limitados. Así, por ejemplo, en uno de los mayores yacimientos de carbón (la cuenca hullera del Donbass, en Ucrania), sólo el 15,7 % de los carbones son coquizables. La escasez de carbones coquizables ocasiona una disminución de su proporción en la carga de las baterías de coque, por debajo de los límites permisibles, lo que a su vez reduce drásticamente la resistencia mecánica del coque, al mismo tiempo que aumenta su precio.

El alto costo del coque está dado por una serie de factores de carácter objetivo:

- Empeoramiento de las condiciones naturales de extracción unido al aumento de los volúmenes de ésta.
- Agotamiento de los recursos en carbones coquizables que se encuentran cerca de la superficie prospectada.
- Empeoramiento de la calidad de los carbones prospectados, lo que ocasiona gastos complementarios en su beneficio o limpieza.
- Gran dispersión en la ubicación de las reservas por el territorio de los países, lo que provoca mayores gastos en su transporte.

Por otra parte, las desventajas del carbón no coquizable como combustible habían estado dadas por un costo relativamente alto de extracción (en comparación con los combustibles gaseoso y líquido), el contenido de azufre, presencia de ceniza y dificultad en el transporte neumático (12).

En la actualidad, la competitividad del carbón ha aumentado notablemente, lo que se explica principalmente por su menor costo en comparación con el petróleo y gas natural. Según el Departamento de Energía de EE.UU. (13), para el período 1990-2005 tendrá lugar un aumento de los precios de los combustibles empleados en la industria siderúrgica, de la forma siguiente en \$USA/Mkcal: fuel oil desde 13 hasta 26,6; gas natural desde 14,5 hasta 29,0; carbón desde 7,5 hasta 9,7.

Es conocido que las reservas de carbón mineral sobrepasan considerablemente las reservas de otros combustibles orgánicos. A finales de 1990, las reservas de carbones no coquizables en el mundo eran del orden de 1.079×10^9 t, las de petróleo crudo $136,5 \times 10^9$ t, y las de gas natural $119,4 \times 10^9$ m³ (14). Los niveles actuales de extracción pueden satisfacer la demanda siderúrgica durante 450 años en el caso de los carbones, y entre 35-45 y 50-57 años para el petróleo y gas natural, respectivamente.

En el horno alto se observa un interés creciente hacia la utilización de carbones no coquizables (antracita, hullas magras y otros) para su inyección como sustituto parcial del coque. Este interés se basa no sólo en las posibilidades tecnológicas y económicas sino también en la alta efectividad lograda por esta tecnología a partir de la década de los 80, tanto a escala experimental como industrial.

4. INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN DE COMBUSTIBLES AUXILIARES EN LA OPERACIÓN DEL HORNO ALTO

4.1. Combustión en toberas

Al ser inyectado por toberas el combustible junto al viento (aire caliente), el resultado térmico

neto es el correspondiente a una combustión incompleta, cuyos productos finales son, al igual que en la combustión del coque, CO, CO₂, H₂ y N₂. En la tabla III se incluyen las principales reacciones que ocurren al inyectar combustibles al horno alto.

El calor de la combustión de los hidrocarburos saturados, calculado para 1 kg de carbono quemado, es notablemente inferior que para el carbono libre del coque, debido a que parte del calor desprendido por la oxidación del carbono es utilizado para la descomposición de los hidrocarburos saturados en carbono e hidrógeno. Como se observa en la figura 3, el calor de descomposición de los hidrocarburos saturados y también de los combustibles líquidos y sólidos, crece al disminuir la relación en peso entre sus contenidos de carbono e hidrógeno (C:H). Por consiguiente, con la disminución de esta relación se reduce el calor de la combustión. El valor inferior se alcanza para el metano (CH₄), principal componente del gas natural, que es sólo el 30 % de calor de la combustión del carbono del coque (Tabla IV).

Debido a que el combustible inyectado se retiene sólo milésimas de segundo en el interior de la tobera y en la zona del *raceway*, es necesario garantizar un mezclado completo y uniforme del combustible con el viento para evitar la formación de hollín. Para combustibles líquidos y sólidos es importante que tengan una dispersión fina. La gasificación completa del combustible inyectado se favorece al operar con temperatura alta de viento y con su enriquecimiento en oxígeno. Al incrementar el caudal del combustible inyectado aumentan las dificultades para lograr la gasificación completa.

TABLA III.– Efecto térmico de las reacciones de los componentes del combustible inyectado junto con el oxígeno del viento y el carbono del coque

TABLE III.– Thermic effect of reactions of fuels constituent injected together with blast oxygen and coke carbon

Reacciones	Efecto térmico		
	MJ/kmol	MJ/m ³ gas	MJ/kg C
C _{coque} + 0,5O ₂ = CO	117,6	–	9,8
C _{coque} + H ₂ O = CO + H ₂	-124,5	-5,56	-10,4
C _{coque} + CO ₂ = 2CO	-165,8	-7,39	-13,8
CH ₄ + 0,5O ₂ = CO + 2H ₂	35,6	1,59	3,0
C ₂ H ₆ + O ₂ = 2CO + 3H ₂	135,7	6,05	5,7
C ₃ H ₈ + 1,5O ₂ = 3CO + 4H ₂	226,5	10,1	6,3
C ₄ H ₁₀ + 2O ₂ = 4CO + 5H ₂	309	13,8	6,5
C ₅ H ₁₂ + 2,5O ₂ = 5CO + 6H ₂	404	18,05	6,7
C ₂ H ₄ + O ₂ = 2CO + 2H ₂	272	12,1	11,3
C ₂ H ₂ + O ₂ = 2CO + H ₂	448	20,0	18,7

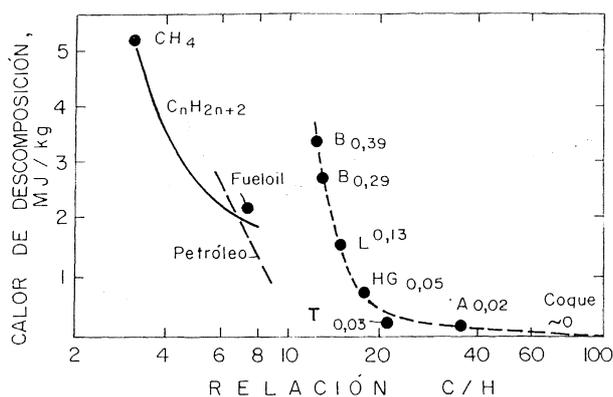


FIG. 3.— Calor de descomposición de combustibles.

A: antracita; B: lignito; HG: hulla grasa; L: carbón de llama larga. T: hulla magra; (Cifras: relación O:C).

FIG. 3.— Decomposition heat of fuels.

A: anthracite; B: lignite; HG: bituminous coal, L: candle (long-flame) coal; T: lean coal. (Digits: ratio O:C).

TABLA IV.— Calor de combustión del carbono para diferentes combustibles según la relación H:C

TABLE IV.— Carbon combustion heat for different fuels as the H/C ratio

Combustible	Relación H : C	Calor de combustión	
		kJ/kg C	%
Coque	0,002-0,005	9.800	100
Antracita	0,02-0,03	9.400	96
Carbones gaseosos	0,08-0,10	8.400	85
Fuel oil	0,11-0,13	7.500	77
Hydrocarburos:			
• Pentano C ₅ H ₁₂	0,2	6.740	69
• Etano C ₂ H ₆	0,25	5.650	55
• Metano CH ₄	0,333	2.970	30

El calor desprendido en la combustión del combustible inyectado en el crisol sustituye una parte del calor de la combustión del coque. Se debe destacar que cuando se emplean temperaturas altas de viento, la cantidad de calor que éste aporta es considerablemente superior a la que se produce mediante la combustión del combustible: por ejemplo, el calor de la combustión del gas natural es cercano a 1.675 kJ/m³ y la entalpía para el correspondiente caudal de viento (a 1.250 °C, 1 % de humedad y 21 % O₂) es del orden de 2,4 × 1.712 = 4.100 kJ/m³, es decir, 2,5 veces superior. Esta es una de las causas de la disminución del consumo de coque al inyectar combustibles auxiliares.

4.2. Temperatura adiabática de llama

Cuando se inyecta fuel oil en el viento, la temperatura adiabática de llama en la zona de toberas se determina por la ecuación:

$$T = 1.559 + 0,839 T_v - 6,033 H - 4,972 F + 49,72 O_2 \quad [1]$$

siendo, T - temperatura adiabática de llama, °C;

T_v - temperatura del viento, °C;

H - humedad del viento, g/m³;

F - fuel oil en el viento, g/m³;

O_2 - oxígeno añadido al viento, %.

Cuando se inyecta carbón y otros combustibles en toberas, el valor de T se calcula por la ecuación:

$$I_t = C_c \cdot T = [A + (S/C_t) B] / [V_g + (S/C_t) V_v] \quad [2]$$

donde, $A = W_c + I_c + V_v I_v$, en kJ/kg C_t [3]

$$B = W_i + I_i + V_v I_t, \text{ en kJ/m}^3 \text{ (kg)} \quad [4]$$

siendo,

I_t - entalpía del gas de tobera, kJ/m³;

I_c - entalpía del carbón que entra en la zona de combustión, kJ/kg;

I_i - entalpía del combustible inyectado, kJ/m³ (kg);

I_v - entalpía del viento considerando la temperatura de descomposición de la humedad del viento, kJ/m³;

C_c - cantidad de carbono gasificado del carbón, kg/kg;

C_t - cantidad de carbono del carbón quemado en toberas, kg/kg;

W_c - calor de combustión del carbón al pasar a CO, kJ/kg C_t ;

W_i - calor de combustión del combustible inyectado en toberas, kJ/m³ (kg);

S - caudal de combustible inyectado, m³(kg)/kga.

V_g - caudal de gas de tobera, m³/kg C_t ;

V_v - caudal de viento, m³/kga.

Al aumentar el caudal de combustible inyectado, la temperatura adiabática de llama disminuye, debido a que el volumen de los productos de la combustión crece más fuertemente que la cantidad total de calor que se introduce con el viento caliente y por combustión del combustible. El grado de disminución de la temperatura adiabática depende del combustible inyectado y de los parámetros del viento. Al operar con un consumo de coque del orden de 500 kg/ta (temperatura del viento 1.250 °C, 1 % de

humedad y 21 % O₂) para cada m³ (kg) de combustible inyectado por tonelada de arrabio, la temperatura adiabática disminuye en: gas natural, 4,5 °C; fuel oil, 3,1 °C; gas de batería, 2,5 °C; carbón alto en volátiles, 2,2 °C, y antracita, 1,2 °C.

La disminución de la temperatura adiabática es uno de los factores que limita el aumento del caudal de combustible a inyectar si ésta no se acompaña con aumentos en la temperatura del viento y su contenido en oxígeno. Estas dos medidas compensatorias permiten mantener la temperatura adiabática en el nivel requerido para garantizar una marcha estable del horno al inyectar combustible auxiliar en el crisol.

4.3. Intercambio térmico y temperatura del gas de tragante

Con el incremento del caudal de combustible auxiliar aumenta el volumen de gas de tragante. Al mismo tiempo disminuyen los consumos de coque y de materiales de la carga por tonelada de arrabio. Como consecuencia de ello, la relación entre los equivalentes acuosos de los gases y la carga aumenta, lo que ocasiona determinados incrementos de temperaturas en la cuba del horno y en el gas de tragante, a pesar de que el mayor contenido de hidrógeno en los gases mejora el intercambio térmico entre éstos y la carga.

El aumento de la temperatura del gas de tragante al inyectar combustibles auxiliares se observa en muchos trabajos experimentales.

4.4. Desarrollo de las reducciones directa e indirecta

Con la inyección de combustibles en el crisol varían las condiciones en que se desarrollan los procesos de reducción de los óxidos de hierro y la gasificación del carbono:

- Aumenta la concentración de agentes reductores (CO+H₂) y disminuye la concentración de nitrógeno en los gases del horno.
- Aumentan la concentración y volumen de H₂, que posee determinadas ventajas cinéticas sobre el CO.
- Varía la distribución de temperaturas en el horno: disminuye la temperatura en la parte inferior (donde ocurre la gasificación del carbono del coque) y se eleva en la cuba (en la zona de reducción indirecta de los óxidos de hierro), lo que disminuye la velocidad del primero de estos procesos y aumenta en el segundo. El enri-

quecimiento del viento en oxígeno se opone a estas tendencias.

- Para la misma productividad del horno crece el tiempo de retención de los materiales en el horno debido a las disminuciones del consumo de coque y del volumen de materiales por unidad de arrabio.
- Debido a la disminución del consumo de coque, se reduce la superficie en la que ocurre la gasificación de su carbono, y disminuye la velocidad de este proceso.

Los factores enumerados condicionan la disminución del grado de reducción directa de los óxidos de hierro, en mayor escala cuando se inyecta gas natural, y en menor escala al inyectar combustible sólido. Por tanto, la influencia de la relación H:C del combustible inyectado en la reducción directa está en contraposición a su influencia en la cantidad de calor que se desprende durante la combustión en tobera.

4.5. Disminución del consumo de coque

Al inyectar combustibles auxiliares en el crisol, la disminución del consumo de coque varía en función del combustible empleado, sus características y cantidad inyectada, así como por otras variaciones ocasionales de los parámetros del viento. Habitualmente, se caracteriza por el coeficiente de sustitución de coque K_s , es decir, en el ahorro de coque por unidad de combustible inyectado (kg/m³ o kg/kg). En condiciones ideales, la efectividad de inyección se expresa por el coeficiente de sustitución determinado manteniendo constante los otros parámetros del viento; sin embargo, habitualmente, la propia posibilidad de inyectar combustible auxiliar está relacionada con la variación de estos parámetros (aumentos de la temperatura del viento y su contenido en oxígeno, disminución de la humedad, etc) para mantener la temperatura adiabática de llama en el nivel requerido. No obstante, en estos casos es recomendable determinar la influencia del combustible inyectado en condiciones ideales, introduciendo las correcciones correspondientes al variar otros parámetros.

A mayor K_s , más efectiva es la utilización del combustible auxiliar. Para un consumo total de combustible de 500-550 kg/ta con caudal de inyección de 100 m³ (kg)/ta y manteniendo constante los parámetros del viento, el coeficiente de sustitución para el gas natural es de 0,4-0,5 m³/kg; fuel oil, 1,1-1,3 kg/kg y carbón pulverizado, 0,6-1,3 kg/kg. Al aumentar la temperatura del viento, K_s tiende a aumentar un poco y con el aumento del contenido de oxígeno en el viento, disminuye.

4.6. Productividad

Al inyectar combustible por toberas en el viento, la productividad no varía o aumenta muy poco (2-5 %). Sin embargo, cuando se utilizan altas temperaturas de viento (> 1.200 °C) y su enriquecimiento en oxígeno, se pueden lograr notables incrementos en la productividad del horno.

4.7. Costo de fabricación del arrabio

Los factores principales que determinan el costo del arrabio elaborado al inyectar combustibles auxiliares son: el coeficiente de sustitución del coque, la cantidad de combustible inyectado por tonelada de arrabio y las correlaciones entre los precios del coque y el combustible auxiliar. También influyen el caudal de oxígeno utilizado y su costo, el volumen de gas del tragante y su calor de combustión.

Como fue analizado anteriormente, la tendencia al aumento de los precios de los principales combustibles empleados en la fabricación de arrabio, así como las reservas cada vez más restringidas de la mayoría de estos combustibles, han provocado variaciones en la tecnología del horno alto en los últimos años. La efectividad económica de la inyección de combustibles auxiliares es real, pero en cada caso depende de las condiciones de cada país.

REFERENCIAS

- (1) GARCIA, L., CORES, A., FORMOSO, A. y BABICH, A. *Rev. Metal. Madrid*, 33 (6), 1997: 403-415.
- (2) BABICH, A., YAROSHEVSKII, S y TERESHENKO, V.P. Intensificación de la utilización del carbón pulverizado en el horno alto. Kiev, Ed. Tejnika, 1993: 191 p. (en ruso).
- (3) Statistics on Energy in the Steel Industry. Update 1996. Committee on Economic Studies. Brussels, 1996.
- (4) YAROSHEVSKII, S. Fabricación de arrabio con utilización de carbón pulverizado como combustible. Moscú, Ed. Metallurgiya, 1988: 174 p. (en ruso).
- (5) RAMM, A.N. El proceso del horno alto moderno. Moscú, Ed. Metallurgiya, 1980: 302 p. (en ruso).
- (6) TOVAROVSKII, I.G, BOIKO, N.G y PASHINSKII, V.F. *Stal*, (9), 1990: 53-59.
- (7) GARROD, C.W., NIGHTINGALE, R.J., GUTIÉRREZ, M. y NASCIMENTO, J. Proc. of Technical Exch. Session "Injection Technology in Ironmaking and Steelmaking". Brussels, Committee on Technology, Int. Iron and Steel Inst, 1996: 1-14.
- (8) PISILA, E., INKALA, P. y KARJALAHTI, T. Meeting of European Blast Furnace Committee. 24-25 abril 1997, Gijón (España).
- (9) ALTLAND, R., BESEOGLU, M., LANZER, W. y STRICKER, K.P. Proc. 3rd European Ironmaking Congress, Gante (Bélgica), 1996: 93-98.
- (10) GRIFFIIN, S. *Steel Times*, 208 (5), 1980: 354-356.
- (11) KAJIKAWA, Y., NAKAJIMA, R., KISHIMOTO, S., SAKAI, A., SAITO, M. y KAMOSHIDA, T. *Trans. ISIJ*, 22 (2), 1982: 134-142.
- (12) GASPER, D. *Iron Steel Eng.*, 51 (7), 1974: 65-70.
- (13) MAZAR MARGHALL, R. *Met. Bull. Mon.*, (7), 1990: 67-68.
- (14) JUKES, M.H. MPT: *Met. Plant Tech.*, 16 (2), 1993: 53-60.