

PGS. TS. Ngô Trí Phúc (Chủ biên)
PGS. TS. Bùi Anh Hòa, PGS. TS. Nguyễn Hoàng Việt,
ThS. Ngô Quốc Dũng

GIÁO TRÌNH
CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP
(LUYỆN KIM PHI LÒ CAO)

NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

Bản quyền thuộc về Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Mọi hình thức xuất bản, sao chép mà không có sự cho phép bằng văn bản của Trường là vi phạm pháp luật.

Mục đích: Dùng làm giáo trình giảng dạy chuyên ngành và làm tài liệu tham khảo cho cán bộ kỹ thuật và quản lý có liên quan.

Biên mục trên xuất bản phẩm của Thư viện Quốc gia Việt Nam

Giáo trình Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp (Luyện kim phi lò cao) / Ngô Trí Phúc (ch.b.), Bùi Anh Hòa, Nguyễn Hoàng Việt, Ngô Quốc Dũng. - H. : Bách khoa Hà Nội, 2021. - 288tr. : minh họa ; 24cm

Thư mục cuối mỗi chương. - Phụ lục: tr. 276-288

1. Luyện kim 2. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp 3. Giáo trình
669.80711 - dc23

BKF0213p-CIP

LỜI NÓI ĐẦU

Trong các loại vật liệu kim loại đang được sử dụng, gang và thép chiếm tỷ lệ lớn nhất và phổ biến nhất. Bước sang thế kỷ XXI, xu hướng phát triển công nghiệp trên thế giới đã có sự chuyển biến mạnh mẽ theo hướng nâng cao chất lượng, hiệu quả kinh tế và chống ô nhiễm môi trường trong các dây chuyền sản xuất. Điều này đang trở thành yếu tố then chốt, ảnh hưởng đến sự phát triển của một quốc gia và sự tiến bộ của xã hội. Vì vậy, những quốc gia có nền công nghiệp gang thép phát triển như: Mỹ, Nga, Nhật Bản, Trung Quốc và các nước châu Âu, v.v. đã và đang tập trung nghiên cứu phát triển công nghệ luyện kim mới theo xu hướng này.

Hiện nay, công nghệ sản xuất thép trên thế giới có lưu trình “*Lò cao – Lò thổi oxy – Cán thép*” sử dụng nguyên liệu ban đầu là quặng sắt (chiếm khoảng 70% tổng sản lượng thép) và lưu trình “*Lò điện hồ quang – Cán thép*” sử dụng nguyên liệu đầu vào là thép phế (chiếm khoảng 30% tổng sản lượng thép). Tỷ lệ sản lượng này thay đổi phụ thuộc vào nguồn nguyên liệu cho sản xuất thép của mỗi quốc gia. Nguồn nguyên liệu tự nhiên cho công nghiệp sản xuất gang thép đang ngày càng trở nên khan hiếm. Để có thể sản xuất gang theo công nghệ lò cao, yêu cầu phải có quặng sắt giàu (nếu là quặng nghèo, cần qua tuyển để làm giàu), phải có công đoạn thiêu kết hoặc vùi viên; đặc biệt phải có than cốc tức nhà máy luyện cốc. Hai công đoạn thiêu kết và luyện cốc này có tác động xấu đến môi trường, tiêu tốn nhiên liệu và nguyên liệu. Đặc biệt là than mỡ luyện cốc ngày càng cạn kiệt và chỉ có ở một số quốc gia hoặc vùng lãnh thổ. Đây là khó khăn lớn nhất cho phát triển công nghiệp gang thép ở những quốc gia như Việt Nam. Mặt khác, nguồn thép phế dùng cho sản xuất lò điện chủ yếu thu mua từ các quốc gia có nền công nghiệp phát triển thì lại không ổn định và cũng đang dần khan hiếm. Thép phế còn lẫn nhiều tạp chất công nghiệp (sơn, cao su, nhựa v.v.), chứa nhiều kim loại màu (Sn, Cu, Zn, Pb v.v.) và tạp chất có hại (S, P), làm tăng chi phí vận chuyển và chi phí xử lý, tiêu tốn năng lượng; thậm chí không thể đáp ứng yêu cầu chất lượng về nguyên liệu của thép cần luyện.

Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp (còn gọi là luyện kim phi lò cao hoặc luyện kim phi cốc) đã ra đời và giải quyết được những vấn đề tồn tại của sản xuất gang thép hiện nay, có ý nghĩa chiến lược lâu dài cho nhiều quốc gia (trong đó có Việt Nam). Thực chất, công nghệ hoàn nguyên trực tiếp là phương pháp luyện kim có từ thời cổ xưa, đã ra đời và phát triển qua hàng nghìn năm. Nhiều công cụ như dao, kiếm lưu truyền trong sử sách hay có trong các viện bảo tàng ngày nay đã cho thấy điều đó.

Đến cuối thế kỷ XVIII, công nghệ hoàn nguyên trực tiếp bắt đầu được quan tâm; nhưng đến cuối thế kỷ XIX thì dần bị quên lãng do sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ lò cao và sự xuất hiện công nghệ luyện cốc. Vào cuối thế kỷ XX, khi các kỹ thuật hiện đại đã được áp dụng vào công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thì công nghệ này lại tái sinh và phát triển. Đến nay, sản lượng của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp đạt hơn 100 triệu tấn/năm. Một số chỉ tiêu kinh tế – kỹ thuật của công nghệ này đang cạnh tranh với công nghệ lò cao truyền thống, đặc biệt là về khía cạnh bảo vệ môi trường.

Nhằm đáp ứng yêu cầu về tài liệu học tập cho sinh viên ngành Kỹ thuật vật liệu và tài liệu tham khảo cho các cán bộ kỹ thuật của ngành Luyện kim trong nước, cuốn ***Giáo trình Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp (Luyện kim phi lò cao)*** đã được các tác giả biên soạn dựa trên các tài liệu tham khảo của các quốc gia có bề dày truyền thống về luyện kim trên thế giới và các kinh nghiệm nghiên cứu ở Việt Nam. Nội dung giáo trình được bố cục thành bốn chương, bám sát đề cương chi tiết đang được giảng dạy trong chương trình đào tạo của chuyên ngành Kỹ thuật gang thép. Ở cuối mỗi chương, các tác giả liệt kê các tài liệu tham khảo chính để người đọc có thể tự tìm hiểu và nghiên cứu thêm trong trường hợp cần thiết. Ngoài ra, một số câu hỏi ôn tập cũng được biên soạn nhằm giúp sinh viên ghi nhớ những nội dung cốt lõi của các chương, cũng như trả lời được các câu hỏi liên quan đến những kiến thức cơ bản của môn học.

Các tác giả xin trân trọng cảm ơn sự giúp đỡ và động viên khích lệ từ các đồng nghiệp trong và ngoài Bộ môn Kỹ thuật gang thép, Viện Khoa học và Kỹ thuật vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Trong quá trình biên soạn, giáo trình không tránh khỏi có những thiếu sót về mặt nội dung và thông tin cập nhật chưa đầy đủ, nhóm tác giả rất mong nhận được những ý kiến đóng góp và phản hồi để giáo trình được hoàn thiện hơn.

Các tác giả

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU.....	3
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP.....	9
1.1. Khái niệm về công nghệ hoàn nguyên trực tiếp.....	9
1.1.1. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn	9
1.1.2. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng (nóng chảy)	14
1.2. So sánh công nghệ hoàn nguyên trực tiếp với công nghệ lò cao	15
1.2.1. Đặc điểm công nghệ lò cao.....	15
1.2.2. So sánh công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn với công nghệ lò cao ..	16
1.2.3. So sánh công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng với công nghệ lò cao	17
1.3. Sự phát triển của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp	19
1.3.1. Hiện trạng của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp trên thế giới	19
1.3.2. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp ở Việt Nam	21
1.4. Hiệu quả kinh tế – kỹ thuật của các lưu trình sản xuất gang thép.....	25
1.4.1. Lưu trình Lò cao – Lò thổi oxy (BF – BOF)	26
1.4.2. Lưu trình Hoàn nguyên trực tiếp thể rắn – Lò điện hồ quang (DR – EAF).....	27
1.4.3. Lưu trình Hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng – Lò thổi oxy (SR – BOF).....	29
Tài liệu tham khảo chương 1	35
Câu hỏi ôn tập chương 1	35

Chương 2. CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP THỂ RẮN.....	36
2.1. Phân loại và tiêu chuẩn về công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn	36
2.2. Nguyên nhiên liệu và chất hoàn nguyên	38
2.2.1. Nguyên liệu chứa sắt.....	38
2.2.2. Nhiên liệu và chất hoàn nguyên	41
2.3. Nhiệt động học và động học của hoàn nguyên trực tiếp thể rắn.....	54
2.3.1. Nhiệt động học phản ứng hoàn nguyên oxit sắt	54
2.3.2. Động học của quá trình hoàn nguyên.....	65
2.4. Công nghệ và thiết bị hoàn nguyên trực tiếp thể rắn	67
2.4.1. Công nghệ lò đứng (MIDREX).....	68
2.4.2. Công nghệ lò ống quay	96
2.4.3. Công nghệ lò lớp sôi	138
2.4.4. Công nghệ lò đáy quay.....	143
2.4.5. Một số công nghệ hoàn nguyên trực tiếp khác.....	147
2.5. Chỉ tiêu kinh tế kỹ thuật của các công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn	161
2.5.1. Hệ số lợi dụng dung tích lò phản ứng	161
2.5.2. Cường độ tác nghiệp (thời gian vận hành) của thiết bị	162
2.5.3. Tiêu hao năng lượng	163
2.5.4. Hiệu suất lợi dụng khí than	163
2.5.5. Chỉ tiêu chất lượng của sản phẩm	165
2.6. Sử dụng sản phẩm sắt xốp.....	165
2.6.1. Chỉ tiêu đánh giá chất lượng sắt xốp.....	166
2.6.2. Sử dụng làm nguyên liệu luyện thép	172

2.6.3. Sử dụng làm nguyên liệu luyện gang.....	177
2.6.4. Sử dụng cho các mục đích khác.....	180
Tài liệu tham khảo chương 2	183
Câu hỏi ôn tập chương 2	184
Chương 3. CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP THỂ LỎNG.....	185
3.1. Sự hình thành và phát triển của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng.....	185
3.1.1. Nguyên lý, đặc điểm và phân loại.....	186
3.1.2. Hiện trạng của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng.....	190
3.2. Công nghệ và thiết bị hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng.....	192
3.2.1. Công nghệ COREX	192
3.2.2. Công nghệ FINEX	200
3.2.3. Công nghệ HISMELT.....	202
3.2.4. Các công nghệ hoàn nguyên thể lỏng khác.....	207
3.3. Triển vọng của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng	223
3.3.1. Sản lượng của hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng.....	223
3.3.2. Tiêu hao năng lượng	223
3.3.3. Triển vọng phát triển	227
Tài liệu tham khảo chương 3	230
Câu hỏi ôn tập chương 3	230
Chương 4. CÁC CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP KHÁC ...	231
4.1. Công nghệ gia nhiệt vi sóng hoàn nguyên trực tiếp.....	231
4.1.1. Nguyên lý gia nhiệt và đặc điểm của điện vi sóng.....	231
4.1.2. Công nghệ Lò vi sóng gia nhiệt hoàn nguyên trực tiếp – Lò điện luyện thép	243

4.2. Công nghệ gia nhiệt plasma hoàn nguyên trực tiếp.....	255
4.2.1. Đặc tính của thể khí plasma	256
4.2.2. Ứng dụng và phát triển của luyện kim plasma.....	257
4.3. Công nghệ lò trống quay	261
4.4. Công nghệ ITmk3	263
4.5. Một số công nghệ hoàn nguyên trực tiếp khác.....	270
4.5.1. Công nghệ sản xuất sắt cacbit	270
4.5.2. Công nghệ sản xuất sắt hạt.....	271
4.5.3. Công nghệ xi măng – gang.....	274
Tài liệu tham khảo chương 4	275
Câu hỏi ôn tập chương 4	275
PHỤ LỤC.....	276

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ HOÀN NGUYÊN TRỰC TIẾP

1.1. Khái niệm về công nghệ hoàn nguyên trực tiếp

Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp (Direct reduction technology) là quá trình hoàn nguyên quặng sắt hoặc nguyên liệu chứa sắt không sử dụng lò cao. Chất hoàn nguyên có thể ở dạng khí như CO và H₂ được chuyển hóa từ than hoặc khí thiên nhiên hoặc C ở thể rắn trong than. Vì vậy, công nghệ hoàn nguyên trực tiếp còn được gọi là luyện kim phi lò cao (Non-blast furnace metallurgy) hay luyện kim phi cok (Non-coking metallurgy).

Về cơ bản, các công nghệ hoàn nguyên trực tiếp có thể phân loại như sau:

(1) Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn, sản phẩm là sắt xốp (DRI – direct reduction iron) được tạo ra bởi quá trình hoàn nguyên ở trạng thái rắn. Ví dụ như công nghệ MIDREX, HYL-III, FIOR, SL/RN, FASMET, v.v.. Sau khi tháo ra khỏi lò, sắt xốp được ép nóng tạo thành các bánh có kích thước lớn và được gọi là sắt xốp đóng bánh nóng (HBI – hot briquet iron). Ngoài ra, sản phẩm của công nghệ này có thể là sắt cacbit (Iron carbide) như công nghệ ICH.

(2) Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng (nóng chảy), sản phẩm là gang lỏng được tạo ra bởi quá trình hoàn nguyên quặng ở trạng thái lỏng (công nghệ một bước, ví dụ như ROMELT) hoặc bởi quá trình hoàn nguyên quặng ở trạng thái rắn kết hợp với nóng chảy (công nghệ hai bước, ví dụ như COREX, FINEX, HISMETLT v.v.).

1.1.1. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn

Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn cho ra sản phẩm là sắt xốp (DRI/HBI), chủ yếu cấp cho lò điện luyện thép. Căn cứ vào chất hoàn nguyên, chia ra làm hai loại: hoàn nguyên trực tiếp bằng khí và hoàn nguyên trực tiếp bằng than. Hoàn nguyên trực tiếp bằng khí sử dụng khí H₂ và CO được chuyển hóa từ khí thiên nhiên để làm chất hoàn nguyên oxit sắt của quặng sắt ở một nhiệt độ nhất định trong lò kiểu đứng hoặc lò kiểu thùng quay, tạo thành sắt xốp. Hiện tại, có hai công nghệ hoàn nguyên trực tiếp bằng khí chủ yếu là MIDREX và HYL. Hoàn nguyên trực tiếp bằng than là dùng C của than làm chất hoàn nguyên để hoàn nguyên oxit sắt trong quặng sắt ở một nhiệt độ nhất định trong lò ống quay, lò đáy quay hoặc lò lớp sôi tuần hoàn, tạo thành sắt xốp. Trong đó, phương pháp lò ống quay đã được vận hành

ổn định; còn các phương pháp lò đáy quay và lò lớp sôi tuần hoàn đang dần được hoàn thiện.

Năm 2011, sản lượng sắt xộp hoàn nguyên trực tiếp (DRI/HBI) là 73,32 triệu tấn, tương đương 6,31% tổng sản lượng gang toàn thế giới. Trong đó, hoàn nguyên trực tiếp bằng khí chiếm 76,4% (riêng công nghệ MIDREX và HYL chiếm 75,7%), hoàn nguyên bằng than chiếm 23,6%. Nguyên nhân của sự chênh lệch này là vì năng suất của công nghệ hoàn nguyên bằng khí cao, cho sản lượng lớn, năng suất của một thiết bị có thể đạt tới $400.000 \div 1.000.000$ tấn/năm, hiện đang chiếm vị trí chủ đạo trong công nghệ hoàn nguyên trực tiếp. Giữ vị trí chủ chốt trong công nghệ hoàn nguyên trực tiếp bằng than là công nghệ lò ống quay; công nghệ này có năng suất thấp, sản lượng lớn nhất không vượt quá 200.000 tấn/năm. Đến năm 2018, sản lượng sắt xộp của thế giới đã tăng lên 100,5 triệu tấn (tăng 15% so với năm 2017 và tăng 38% so với năm 2016), trong đó, tỷ lệ sắt xộp theo công nghệ MIDREX vẫn chiếm tỷ lệ lớn nhất (khoảng 63,5%), như trình bày trong bảng 1.1. Theo số liệu thống kê của năm 2018, các nước có sản lượng sắt xộp lớn nhất trên thế giới gồm có: Ấn Độ (28,11 triệu tấn), Iran (25,75 triệu tấn), Nga (7,9 triệu tấn), Ả Rập Xê Út (6,0 triệu tấn), Mexico (5,97 triệu tấn) v.v..

Bảng 1.1. Tỷ lệ sắt xộp sản xuất theo các công nghệ trên thế giới (%)

	2016	2017	2018
MIDREX	64,8	64,8	63,5
HYL/Energiron	17,4	16,9	15,5
Lò ống quay	17,5	17,6	20,2
Công nghệ khác	0,3	0,7	0,7

Ưu điểm của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp là lưu trình ngắn, không dùng than cốc, ô nhiễm môi trường tương đối thấp. Nhược điểm chính là sử dụng nguyên liệu với yêu cầu khắt khe: quặng sắt phải là quặng giàu với tổng hàm lượng Fe (ký hiệu là T_{Fe}) $\geq 65\%$, hàm lượng đất chay thấp ($SiO_2 + Al_2O_3 < 5 \div 9\%$), nhiệt độ biến mềm cao, nguyên tố có hại thấp, độ bền nhiệt cao, tính hoàn nguyên tốt, không dễ bị vỡ vụn hoặc biến thành bột. Hoàn nguyên bằng khí thì phải có khí thiên nhiên; hoàn nguyên bằng than thì nhiệt độ biến mềm của quặng phải cao, tính hoàn nguyên của than tốt, độ cục của quặng cũng phải yêu cầu chặt chẽ, có thể dùng quặng cục hoặc quặng vè viên. Hiện nay, quặng mịn dùng cho công nghệ lò lớp sôi vẫn chưa được đưa vào sản xuất ở quy mô công nghiệp.

Sản xuất cacbit sắt cũng là một công nghệ hoàn nguyên trực tiếp mới ở thể rắn, đang trong giai đoạn thử nghiệm công nghiệp. Công nghệ này dùng khí H_2 , CO (được chuyển hóa từ khí thiên nhiên) và bột than cùng quặng sắt mịn thổi vào lò luyện. Kết thúc quá trình phản ứng, sinh ra Fe_3C và hơi nước.

Phản ứng tiến hành trong lò lớp sôi ở nhiệt độ $550 \div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ nên quặng sắt và khí hoàn nguyên đều phải nung nóng trước, độ hạt của quặng sắt được yêu cầu rất khắt khe. So với các phương pháp công nghệ hoàn nguyên trực tiếp khác, ưu điểm của công nghệ này là thực hiện ở điều kiện nhiệt độ thấp, không gây kết dính giữa các hạt quặng với nhau, sản phẩm không dễ bị tái oxy hóa, có thể dùng trực tiếp được quặng sắt bột. Song, nhược điểm là điều kiện sản xuất tương đối khắt khe, khó có thể mở rộng quy mô sản xuất.

1. Yêu cầu và đặc điểm của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn

(1) Yêu cầu nguyên liệu là quặng sắt giàu $T_{\text{Fe}} \geq 65\%$. Hiện nay, loại quặng sắt nguyên khai có hàm lượng Fe giàu như vậy rất ít mà phải qua công nghệ tuyển thì mới có được. Với sự phát triển của khoa học công nghệ tuyển quặng như hiện nay, việc giải quyết vấn đề này là không khó, thậm chí hiệu quả tuyển rất cao, hiệu suất thu hồi nguyên tố Fe đạt trên 90% và hàm lượng SiO_2 thấp hơn 5%. Để sản xuất sắt xộp, thường dùng quặng sắt giàu qua tuyển có độ hạt rất nhỏ (có thể tới $0,074\text{ mm}$). Do vậy, phải tạo cục và thường là dùng phương pháp ép viên.

Đặc điểm của phương pháp ép viên là trộn quặng sắt với chất dính kết (khoảng $1 \div 3\%$), có thể trộn thêm than bột làm chất hoàn nguyên. Để tăng độ bền cơ học, viên ép phải sấy khô ở nhiệt độ $200 \div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ bằng nhiệt từ đốt cháy nhiên liệu hoặc dùng nhiệt vật lý của khí thải lò luyện kim.

(2) Chất hoàn nguyên là C trong than hoặc khí CO , H_2 chuyển hóa từ khí thiên nhiên. Tùy thuộc vào từng công nghệ, nhiệt độ của khí thải có khác nhau, thấp nhất cũng trên $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, nên phải được tận dụng. Ví dụ như dùng để sấy nóng nguyên vật liệu trước khi đưa vào lọc bụi túi vải và thải ra bên ngoài môi trường.

(3) Mức độ cơ khí hóa và tự động hóa của thiết bị nói chung yêu cầu ở mức đơn giản nên công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn được sử dụng khá phổ biến. Sản xuất liên tục hoặc liên thông nhiều công đoạn đang là xu hướng phát triển hiện nay của công nghệ này. Đây cũng là các tiêu chí để đánh giá về mức độ tiên tiến, hiện đại của công nghệ sản xuất.

(4) Đặc điểm của sắt xộp trong công nghệ hoàn nguyên trực tiếp là nhiệt độ còn cao trên $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, nên sau khi ra khỏi lò phải chống được hiện tượng tái oxy hóa, tức là làm nguội nhanh xuống dưới $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Việc tái oxy hóa ảnh hưởng rất xấu đến chất lượng của sản phẩm. Ngoài ra, như trên đã phân tích thì khí thải ra khỏi lò có nhiệt độ cao (có thể tới $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$). Do đó, cần sử dụng nguồn nhiệt thải này để sấy nóng nguyên liệu trước khi cho vào lò hoặc sấy nóng không khí để cấp cho đốt cháy nhiên liệu. Vì quặng sắt được hoàn nguyên ở nhiệt độ cao, nên Zn có trong quặng đều hóa hơi thành ZnO và theo khí thải ra ngoài, chứ không bị ngưng đọng ở cổ lò như trong công nghệ lò cao. Do đó, công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn cho phép thu hồi ZnO rất hiệu quả và đang được nhiều nước ứng dụng. Lưu trình liên hợp gồm “Lò đáy quay (FASTMET) – Lò điện hồ quang nóng chảy” có khả năng phân tách xỉ ra

khởi sắt xốp là một công nghệ luyện kim mới, đang được áp dụng nhằm thu hồi những kim loại có giá trị như V, Ti, Ni, Zn v.v. trong quặng.

(5) Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp hay công nghệ phi lò cao tránh được hai công đoạn gây ô nhiễm lớn, đó là luyện cok và thiêu kết. Công nghệ này có khả năng cơ khí hóa và tự động hóa cao, dễ khống chế nhiệt độ, khí thải qua lọc bụi, lượng bụi thải ra ngoài không khí không cao quá 50 mg/m³, khí SO₂ không cao hơn 450 mg/m³, độ ồn không cao hơn 65 dB, không gây ô nhiễm nguồn nước. Môi trường làm việc và xung quanh nhà máy dễ đạt các chỉ tiêu theo quy định về nồng độ các chất thải, được xem là ít tác động đến môi trường.

(6) Thích hợp với quy mô sản xuất nhỏ và vừa, sản lượng từ 50.000 tấn đến 1 triệu tấn/năm. Vốn đầu tư thấp, xây dựng nhanh.

2. Sản phẩm của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn

Sắt xốp (DRI/HBI) là sản phẩm của công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn. So với thép phế, sắt xốp là nguyên liệu sạch và được dùng làm nguyên liệu cho sản xuất thép chất lượng cao, kể cả luyện gang lò cao. Chất lượng của sản phẩm hoàn nguyên trực tiếp (sắt xốp) phụ thuộc vào chất hoàn nguyên thể rắn (thường là C trong than) hoặc thể khí (thường là CO và H₂ chuyển hóa từ khí thiên nhiên C_nH_m). Hiện nay, trong sản xuất công nghiệp, phần lớn là dùng chất hoàn nguyên thể khí (chiếm khoảng 90%), còn lại là dùng chất hoàn nguyên thể rắn (chỉ chiếm khoảng 10%).

Nguyên liệu để sản xuất sắt xốp phải là tinh quặng sắt manhetit có hàm lượng T_{Fe} ≥ 66%, còn đối với quặng hematit không từ tính thì T_{Fe} ≥ 65%. Sắt xốp chủ yếu là nguyên liệu kim loại cho sản xuất thép lò điện hồ quang nên thường lấy yêu cầu của công nghệ luyện thép trong lò điện hồ quang làm yêu cầu chất lượng của sắt xốp. Phần không phải kim loại của sắt xốp gọi là đất chảy, khi luyện thép sẽ thành xỉ. Để giảm lượng vôi tạo xỉ kiềm thì phải khống chế hàm lượng SiO₂, ngoài ra là S và P.

Để đảm bảo hiệu quả cho luyện thép, yêu cầu đối với sắt xốp thương phẩm phải đạt được như bảng 1.2.

Bảng 1.2. Yêu cầu đối với sắt xốp thương phẩm cho luyện thép

	<i>T_{Fe}</i> (%)	<i>M_{Fe}</i> (%)	<i>η_{Fe}</i> (%)	<i>SiO₂</i> (%)	<i>S</i> (%)	<i>P</i> (%)	<i>C</i> (%)
Loại đặc biệt	≥ 94	≥ 90	≥ 96	≤ 2	< 0,02	< 0,02	< 0,03
Loại 1	92 ÷ 94	86 ÷ 90	94 ÷ 96	2 ÷ 3,5	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,04
Loại 2	90 ÷ 92	83 ÷ 86	92 ÷ 94	3,5 ÷ 5,0	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,07
Loại 3	88 ÷ 90	80 ÷ 83	90 ÷ 92	5,0 ÷ 6,5	≤ 0,07	≤ 0,07	≤ 0,10
Loại thông thường (tối thiểu)	86 ÷ 88	76 ÷ 88	89 ÷ 90	5,0 ÷ 6,5	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,30

Trong đó:

T_{Fe} – tổng hàm lượng Fe trong sản phẩm, bao gồm Fe kim loại và Fe oxit (%), biểu thị chất lượng quặng sắt sử dụng;

M_{Fe} – tổng hàm lượng Fe kim loại trong sản phẩm, biểu thị khả năng hoàn nguyên thành kim loại của công nghệ sản xuất (%);

η_{Fe} – mức độ kim loại hóa, biểu thị hiệu quả của công nghệ sản xuất hay trình độ của công nghệ (%).

$$\eta_{Fe} = \frac{M_{Fe}}{T_{Fe}} = \frac{\%Fe}{\%Fe_{KL} + \%Fe_{oxit}}$$

Sắt xốp được sử dụng chủ yếu trong các lĩnh vực sau đây:

1) Dùng làm nguyên liệu cho luyện thép lò điện hồ quang.

Ưu điểm chính của sắt xốp khi làm nguyên liệu cho sản xuất thép lò điện là thành phần hóa học ổn định, hàm lượng C thấp và ít tạp chất (P, S), dễ phối liệu với thép phế, nâng cao chất lượng thép và mở rộng sản xuất nhiều loại thép khác nhau. Độ cứng cũng như hình dạng sắt xốp có thể rút ngắn thời gian nạp liệu; giúp nạp liệu được liên tục, dễ tạo xi bột cho thao tác hồ quang chìm, giảm tiêu hao điện cực và nâng cao sản lượng. Nhược điểm của sắt xốp là tỷ lệ xỉ cao, nhất là không khống chế được lượng SiO_2 nên phải dùng thêm nhiều vôi. Do vậy, thực tế sản xuất khó sử dụng 100% sắt xốp mà thường chỉ dùng khoảng $30 \div 45\%$ tổng nguyên liệu đầu vào để đạt hiệu quả kinh tế cao.

Hiện nay, trên thế giới có hai phương pháp luyện thép lò điện hồ quang sử dụng nguyên liệu là sắt xốp:

(1) Phương pháp thứ nhất gồm hai bước: (1) nung nóng chảy sắt xốp để tách Fe kim loại ra khỏi đất chay; (2) luyện thép chất thêm thép phế hoặc gang lỏng.

(2) Phương pháp thứ hai: nấu chảy nguyên liệu (thép phế liệu, gang và sắt xốp) để luyện thép.

Hai phương pháp này đều cần giải quyết được các vấn đề sau:

- (1) Cạnh tranh về giá thành của sắt xốp, với thép phế và gang.
- (2) Cải tiến công nghệ hoàn nguyên trực tiếp và tiềm năng phát triển của nó.
- (3) Khả năng thực hiện luyện thép trực tiếp từ sắt xốp trong tương lai.

2) Sản xuất kim loại bột.

Sắt xốp là nguyên liệu lý tưởng cho sản xuất kim loại bột vì dễ nghiền nhỏ. Dùng khí H_2 để tiếp tục hoàn nguyên sắt xốp trong lò lớp sôi, sau đó đưa qua tuyển từ là có thể thu được bột Fe kim loại có chất lượng cao.

3) Dùng làm chất làm nguội cho sản xuất thép lò thổi oxy.

Hiệu quả làm nguội cũng như chất vào lò khi dùng sắt xốp cao và thuận lợi hơn thép phế. Ngoài ra, còn nâng cao được chất lượng thép vì giảm được nguyên tố hóa học có hại của mạt thép.

4) Dùng cho sản xuất gang lò cao.

Dùng sắt xấp cho một phần nguyên liệu lò cao. Cứ nâng cao 10% mức độ kim loại hóa của nguyên liệu lò cao (với một giới hạn nhất định) thì có thể nâng cao 7% sản lượng gang, giảm 7% tỷ lệ cok. Tỷ lệ dùng sắt xấp trong lò cao phụ thuộc vào điều kiện thao tác của lò cao.

1.1.2. Công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng (nóng chảy)

Hoàn nguyên trực tiếp thể lỏng (hay còn gọi là hoàn nguyên trực tiếp nóng chảy) khác với công nghệ hoàn nguyên trực tiếp thể rắn là một phần hoặc tất cả phản ứng luyện kim được thực hiện ở thể lỏng. Đây là một công nghệ luyện gang mới trong quá trình phát triển công nghiệp gang thép với mục đích lấy than đá thay cho than cok, trực tiếp dùng quặng mịn để luyện gang. Do công nghệ này không cần luyện cok, vê viên hay thiêu kết nên đơn giản hơn lưu trình công nghệ luyện gang, đang được nhiều quốc gia đánh giá cao. Trong quá trình nghiên cứu và phát triển công nghệ này, nhiều phương án đã được đưa ra. Hiện nay, một số công nghệ đang được quan tâm và áp dụng trên quy mô công nghiệp là công nghệ COREX (Áo), FINEX (Hàn Quốc). Công nghệ đang được thử nghiệm ở quy mô công nghiệp có DIOS (Nhật Bản), HISMELT (Australia), CCF (châu Âu) và PJV (Nga) v.v.. Mục đích phát triển các công nghệ hoàn nguyên thể lỏng này là để nhằm sản xuất gang lỏng không dùng lò cao.

Hiện nay, phần lớn lưu trình sản xuất của công nghệ hoàn nguyên thể lỏng đều thực hiện qua hai bước: (1) hoàn nguyên sơ bộ quặng sắt (hoàn nguyên trước) trong lò đứng (dạng cục) hoặc lò lớp sôi (dạng bột); (2) hoàn nguyên kết thúc trong lò phản ứng thể lỏng. Than được chất vào lò, oxy được thổi vào từ mắt gió để đốt cháy than, phát sinh nhiệt và tạo thành khí hoàn nguyên (H_2 , CO). Khác với lưu trình lò cao, công nghệ này không dùng cok nên không cần xưởng luyện cok, dùng khí oxy là chủ yếu (lò cao dùng không khí). Điểm giống với lò cao là sử dụng quặng cục (công nghệ COREX) hoặc quặng mịn (công nghệ DIOS, HISMELT v.v.). Cho đến nay, công nghệ này đã đi vào sản xuất công nghiệp nhưng còn ở một quy mô khiêm tốn so với tiềm năng mà nó mang lại. Công nghệ COREX có nhà máy ở Nam Phi đạt sản lượng 300.000 tấn/năm, nhà máy ở Pohang (Hàn Quốc) sản lượng 600.000 ÷ 700.000 tấn/năm, hai nhà máy ở Bảo Sơn (Trung Quốc) sản lượng mỗi lò 300.000 tấn/năm. Thành phần và nhiệt độ gang lỏng cơ bản như lò cao. Ưu điểm của công nghệ COREX là dùng trực tiếp than đá nên không có ô nhiễm do luyện cok và nguồn nhiên liệu than sẵn có hơn than luyện cok. Tuy nhiên, nhược điểm của nó là không dùng được trực tiếp quặng mịn, tiêu hao than và oxy cho mỗi tấn gang lớn ($640 m^3$ oxy/tấn gang và 1180 kg than/tấn gang). Tất nhiên, công nghệ này cũng sản sinh ra một lượng khí lò lớn với nhiệt trị cao ($1650 m^3$ khí than, nhiệt trị $7000 kJ/m^3$). Hướng cải tiến của công nghệ này là giảm tiêu hao than và oxy, tận dụng hiệu quả lượng khí than. Đối với vấn đề này, khó khăn trước mắt là việc khử CO_2 trong khí than và khống chế nhiệt độ để tránh hiện tượng sinh ra muối than do phản ứng khí hóa xảy ra ngược chiều.