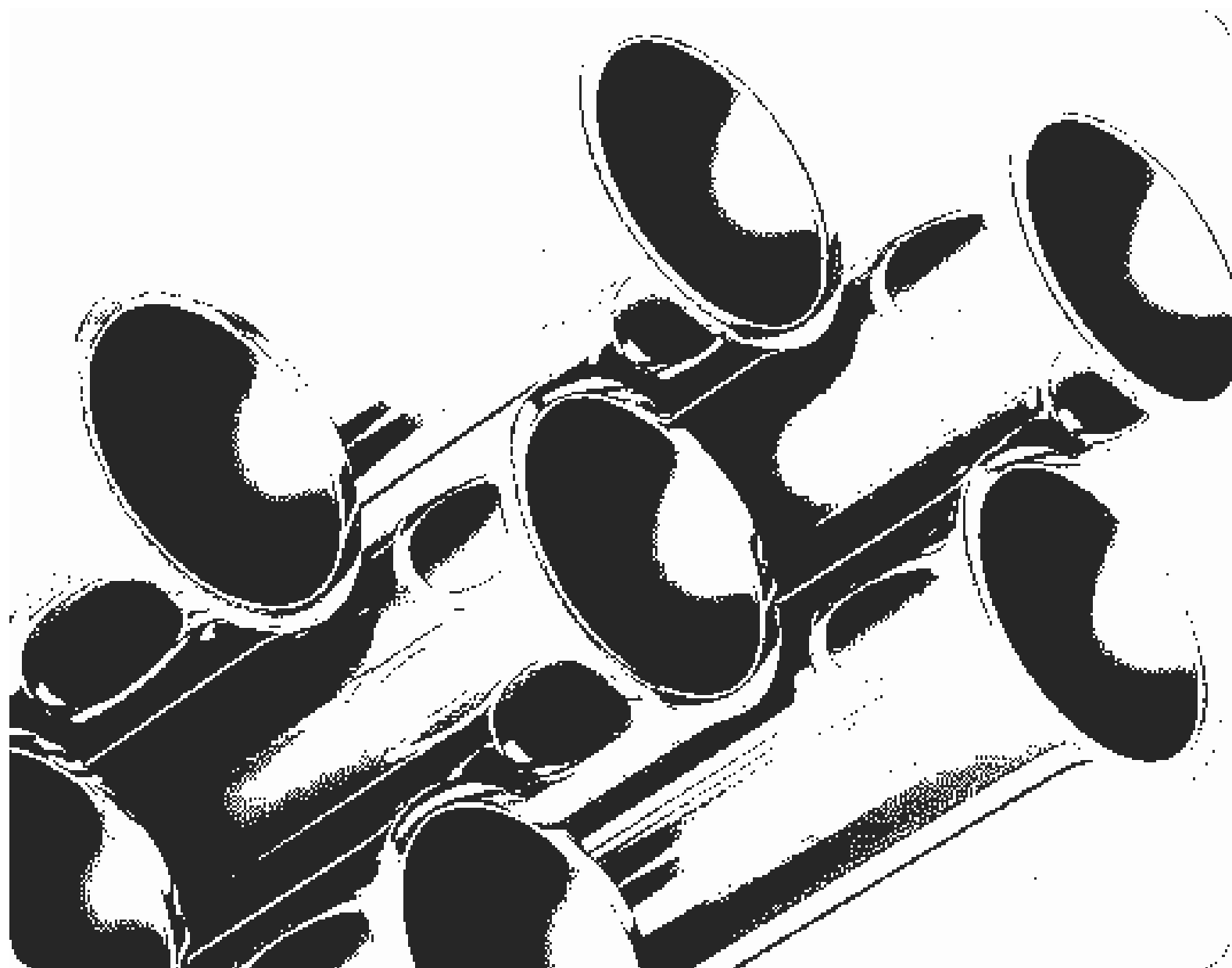


فرآیندهای تولید لوله و تیوب فولادی

نگارش : دکتر مهندس کارل-هاینز برنسینگ، دوسلدورف

دیپلم مهندس بالدور سُمِر، Salzgitter Großrohre GmbH

برگردان: کیارش ناویا



در عصر کنونی که فناوری‌های صنعتی با شتابی چشمگیر در حال تحول‌اند، صنایع فولاد و فلزکاری نیز از این قاعده مستثنی نیستند. یکی از مهم‌ترین بخش‌های این صنعت، تولید لوله‌ها و تیوب‌هاست که نقشی حیاتی در زیرساخت‌های انرژی، پتروشیمی، خودروسازی و ساخت‌وساز ایفا می‌کند. شناخت دقیق روش‌های تولید، کنترل کیفیت و ویژگی‌های فنی لوله‌های بدون درز و درزدار جوشی، برای مهندسان و متخصصان این حوزه اهمیتی بنیادین دارد.

کتاب حاضر با رویکردی مقدماتی و فنی، به معرفی روش‌های مختلف ساخت لوله و تیوب‌های فولادی پرداخته است؛ از فرآیندهای نورد گرم و سرد گرفته تا تکنیک‌های جوشکاری و شکل‌دهی. نویسندگان با تکیه بر منابع معتبر صنعتی و تجربیات عملی، تصویری از فناوری‌های تولیدی ارائه کرده‌اند که برای متخصصان کارخانه‌های لوله‌سازی، مهندسان طراحی، بازرسان فنی و دانشجویان رشته‌های مهندسی مواد و مکانیک بسیار سودمند خواهد بود.

ترجمه این اثر با هدف فراهم آوردن دسترسی به دانش روز دنیا برای مهندسان و علاقه‌مندان فارسی‌زبان صورت گرفته است. در جریان ترجمه، تلاش شده ضمن حفظ امانت‌داری در انتقال مفاهیم تخصصی، متن به گونه‌ای روان و قابل فهم ارائه شود. برای برخی اصطلاحات فنی که معادل دقیق فارسی آن‌ها در ادبیات صنعتی کشور رایج نیست، توضیح یا برگردان نزدیک به مفهوم اصلی ارائه شده یا همان اصطلاح آورده شده تا درک بهتری از مطلب حاصل گردد.

امید است این ترجمه بتواند گامی کوچک در جهت ارتقای دانش فنی و توسعه صنعت لوله‌سازی کشور بردارد و مورد استفاده پژوهشگران، استادان و کارشناسان این حوزه قرار گیرد.

در پایان از تمامی همکاران و دوستانی که در انجام این کار یاری رسان بودند به ویژه از مدیریت محترم عامل شرکت جناب آقای **دکتر علی اصغر دادخواه ترکداری** صمیمانه سپاسگزارم.

شرکت لوله گستر اسفراین – واحد تحقیق و توسعه

کیارش ناویا شهرپور هزار چهارصد و چهار

۱	مقدمه.....	۱
۲	لوله و تیوب بدون در.....	۲
۲.۱	فرآیند سوراخ کاری و نورد پیلگر.....	۲.۱
۲.۲	فرآیند نورد با پلا.....	۲.۲
۲.۳	فرآیند نورد مداوم با مندرل.....	۲.۳
۲.۴	فرآیند پوش بنچ..... (Push Bench)	۲.۴
۲.۵	فرآیند سوراخ کاری و کشش.....	۲.۵
۲.۶	فرآیند اکستروژن لوله.....	۲.۶
۲.۷	فرآیندهای نورد عرضی.....	۲.۷
۲.۷.۱	فرآیند نورد آسل..... (Assel)	۲.۷.۱
۲.۷.۲	فرآیند نورد دیشر..... (Diescher)	۲.۷.۲
۳	شکل دهی سرد لوله در مرحله پایین دست.....	۳
۳.۱	کشش سرد.....	۳.۱
۳.۲	پیلگر سرد.....	۳.۲
۴	لوله و تیوب جوشی.....	۴
۴.۱	فرآیندهای جوش فشاری.....	۴.۱
۴.۱.۱	فرآیند فرِتز-مون..... (Fretz-Moon)	۴.۱.۱
۴.۱.۲	جوشکاری مقاومتی الکتریکی.....	۴.۱.۲
۴.۱.۲.۱	فرآیندهای جریان مستقیم..... (DC)	۴.۱.۲.۱
۴.۱.۲.۲	فرآیند فرکانس پایین.....	۴.۱.۲.۲
۴.۱.۲.۳	فرآیندهای فرکانس بالا.....	۴.۱.۲.۳
۴.۲	فرآیندهای جوش ذوبی.....	۴.۲
۴.۲.۱	فرآیند جوشکاری قوسی زیرپودری.....	۴.۲.۱
۴.۲.۲	فرآیندهای جوشکاری قوسی با گاز محافظ.....	۴.۲.۲
۴.۲.۳	تولید لوله های جوش طولی) فرآیند..... U-ing/O-ing)	۴.۲.۳
۴.۲.۴	تولید لوله مارپیچ.....	۴.۲.۴
۴.۲.۴.۱	تولید لوله مارپیچ در خطوط یکپارچه شکل دهی و جوش زیرپودری..... (SAW)	۴.۲.۴.۱
۴.۲.۴.۲	تولید لوله مارپیچ با خطوط جداگانه شکل دهی و جوش زیرپودری..... (SAW)	۴.۲.۴.۲
۵	فهرست منابع.....	۷۱

ظهور فناوری نورد و توسعه آن در نیمه‌ی نخست قرن نوزدهم، آغازگر تولید صنعتی لوله و تیوب نیز بود. در ابتدا، نوارهای نوردشده‌ی ورق فلزی به کمک قالب‌های قیفی یا غلتک‌ها به مقاطع دایره‌ای شکل تبدیل می‌شدند و سپس در همان حرارت به روش جوش آهنگری، به‌صورت لب‌به‌لب (Butt Weld) یا هم‌پوشان (Lap Weld) به هم جوش داده می‌شدند. در اواخر همان قرن، روش‌های مختلفی برای تولید لوله و تیوب بدون درز ابداع شد و حجم تولید آن‌ها در مدت زمان نسبتاً کوتاهی به‌سرعت افزایش یافت. با وجود به‌کارگیری سایر روش‌ها، توسعه‌ی پیوسته و بهبود مستمر فناوری‌های تولید بدون درز، باعث شد لوله‌های جوشی تقریباً به‌طور کامل از بازار کنار بروند و در نتیجه، لوله‌ها و تیوب‌های بدون درز تا زمان جنگ جهانی دوم بر بازار تسلط داشته باشند. در دوره‌ی پس از آن، نتایج تحقیقات در زمینه‌ی فناوری جوشکاری موجب احیای جایگاه لوله‌های جوشی شد؛ به‌طوری که فعالیت‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی توسعه‌ی فرآیندهای مختلف جوشکاری لوله انجام گرفت و این روش‌ها به‌سرعت گسترش یافتند. در حال حاضر، حدود دو سوم تولید جهانی لوله‌های فولادی از طریق فرآیندهای جوشکاری انجام می‌شود. با این حال، تقریباً یک چهارم از این مقدار مربوط به لوله‌های موسوم به "لوله‌های انتقال با قطر بزرگ" است که اندازه‌ی آن‌ها خارج از محدوده‌ی اقتصادی تولید لوله‌های بدون درز می‌باشد.

نمودار ۱ نمای کلی از محدوده‌های ابعادی لوله‌های بدون درز (طبق استاندارد DIN 2448) و لوله‌های جوشی (طبق استاندارد DIN 2458) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لوله‌های جوشی عمدتاً در محدوده‌هایی تولید می‌شوند که با ضخامت دیواره کم و قطر خارجی زیاد مشخص می‌گردند، در حالی که لوله‌های بدون درز عمدتاً در محدوده‌ای با ضخامت دیواره معمولی تا بسیار زیاد و در قطرهایی تا حدود ۶۶۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند. انتخاب فرآیند تولید — به‌ویژه در نواحی هم‌پوشانی که امکان انتخاب واقعی بین لوله بدون درز و جوشی وجود دارد — اساساً توسط نوع کاربرد لوله تعیین می‌شود؛ یعنی الزامات مربوط به جنس ماده و شرایط کاری آن.

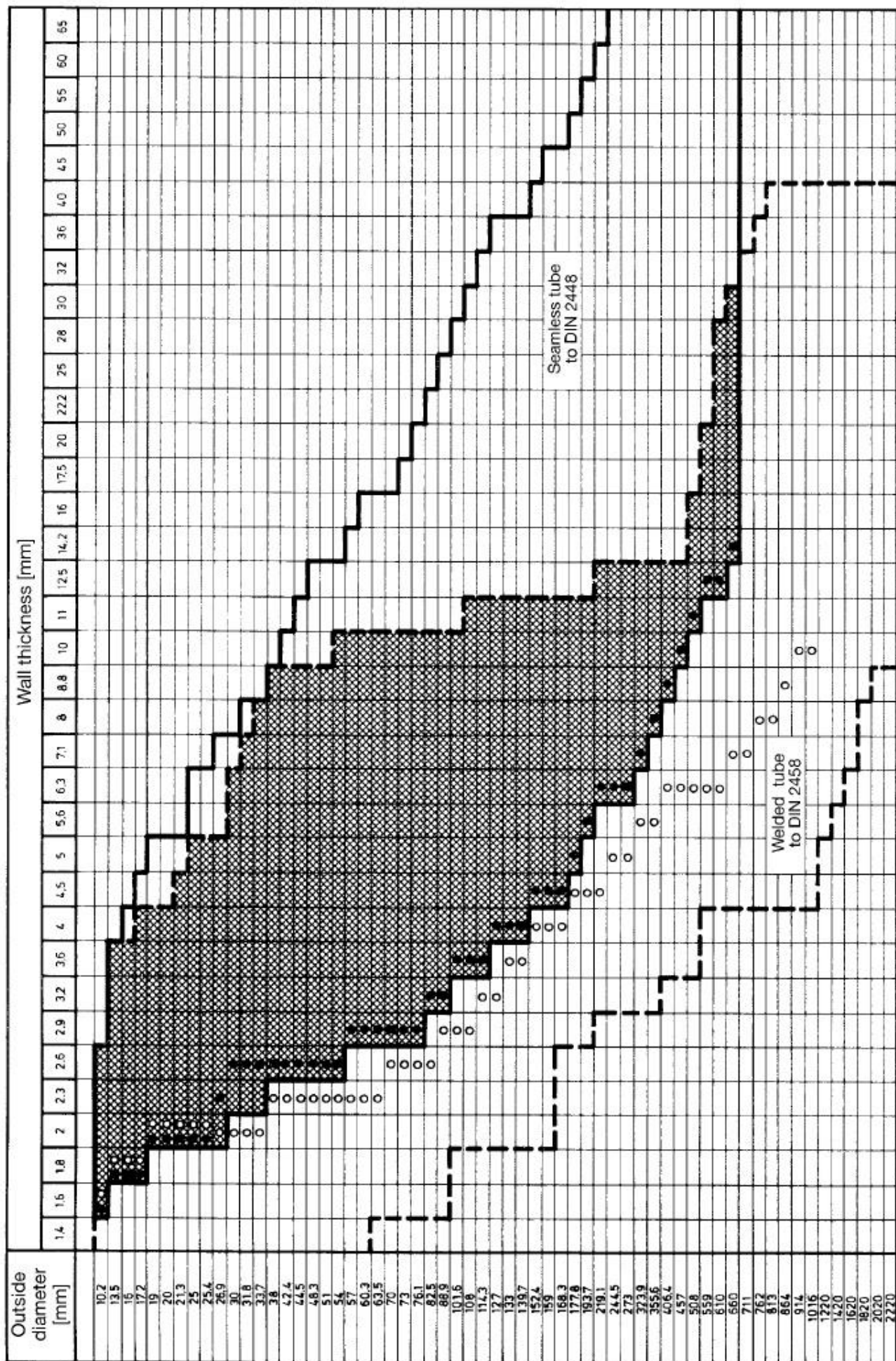
نمودار ۲ خلاصه‌ای از فرآیندهای اصلی تولید لوله‌های فولادی بدون درز و جوشی که امروزه به کار گرفته می‌شوند را نشان می‌دهد. در این نمودار همچنین مراحل اولیه‌ی تولید (پیش‌فرآوری مواد اولیه)، عملیات تکمیلی پس از تولید (فرآیندهای پایین‌دستی)، و محصولات معمول حاصل از هر یک از فناوری‌ها مشخص شده‌اند. این طرح با هدف نشان دادن این موضوع ارائه شده است که برای تغذیه و پشتیبانی واحدهای مختلف در مرحله‌ی تولید لوله، به تعداد متفاوتی از مراحل آماده‌سازی مواد اولیه یا مراحل ابتدایی شکل‌دهی نیاز است.

در مورد لوله‌های بدون درز و همچنین در فرآیند جوشکاری Fretz-Moon، مرحله‌ی تولید همواره شامل عملیات حرارتی (گرم کردن) است؛ از این‌رو محصول حاصل را می‌توان لوله یا تیوب گرم شکل‌داده‌شده (Hot-Formed) نیز نامید. واحدهای پایین‌دستی برای عملیات کشش گرم (Hot Drawing) یا انبساط گرم (Hot Expanding) نسبتاً نادر هستند؛ در مقابل، لوله‌های گرم شکل داده شده به‌طور گسترده به‌عنوان محصولات اولیه برای فرآیند شکل‌دهی سرد (Cold Forming) مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از به‌کارگیری فرآیند شکل‌دهی سرد، گسترش دامنه‌ی تولید یک کارخانه به سمت قطرها و ضخامت‌های دیواره کمتر (مطابق استاندارد DIN 2391)، کاهش تolerانس‌های قطر و ضخامت دیواره، و ایجاد پرداخت سطحی ویژه یا ویژگی‌های مکانیکی و ترمومکانیکی خاص در لوله است.

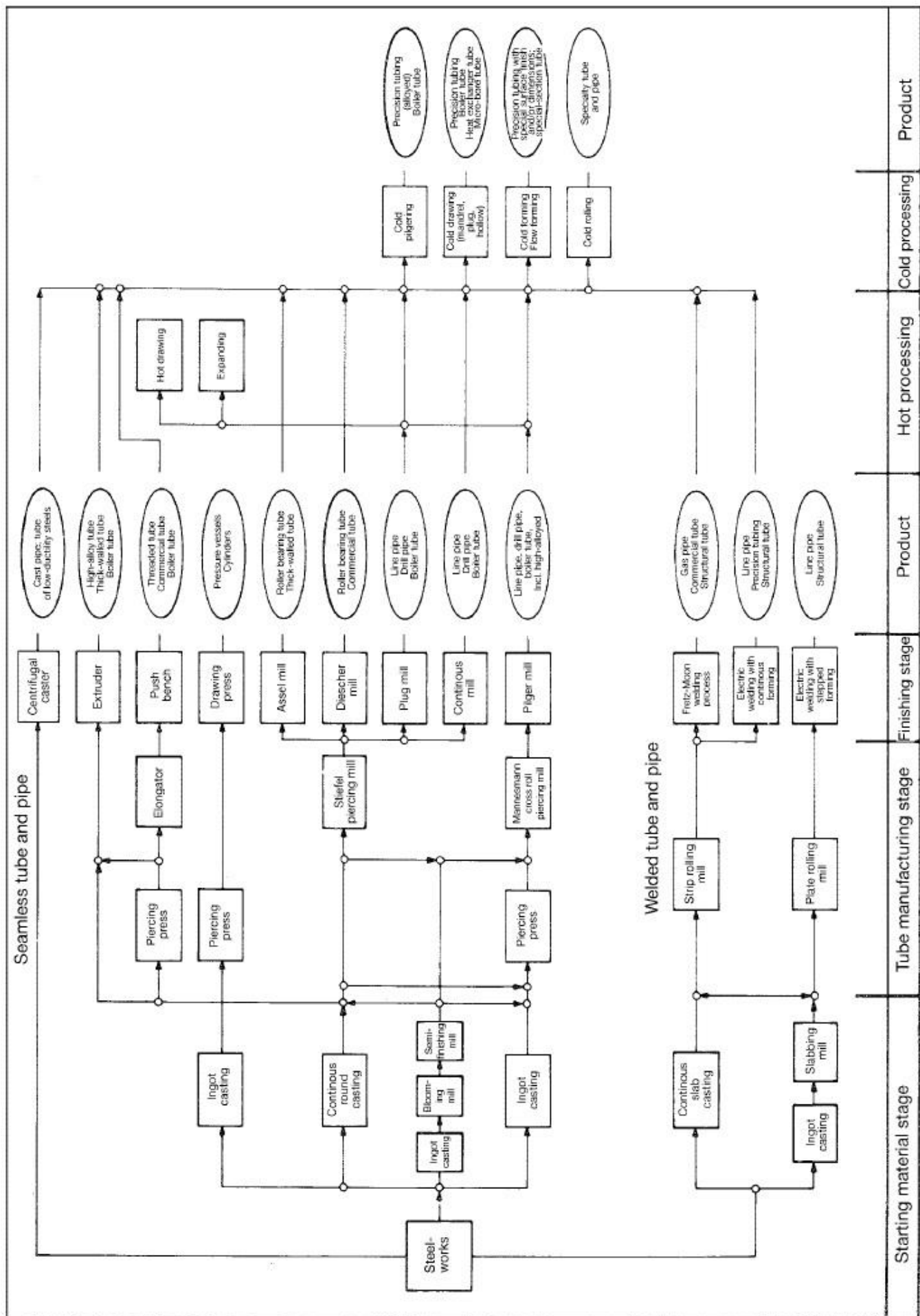
تولید لوله‌های جوشی در ابتدا شامل شکل‌دهی پیوسته‌ی نوار، ورق یا صفحه‌ی فولادی در قفسه‌های غلتکی — (Roll Stands) که گاهی با عنوان قفسه‌های غلتک (Roller Cages) نیز شناخته می‌شوند — یا در پرس‌ها (فرآیندهای U-ing و O-ing یا C-ing) است. نوار فولادی همچنین می‌تواند به‌صورت سرد در دستگاه خم‌کن سه‌غلتکه (Three-Roll Bending Machine) شکل داده شود و سپس از طریق جوش فشاری (Pressure Welding) یا جوش ذوبی (Fusion Welding) به یک لوله‌ی نهایی تبدیل گردد.

بسته به نوع فرآیند شکل‌دهی، لوله‌های جوشی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- ۱- لوله‌های جوش طولی (Longitudinally Welded Tube) ۲- لوله‌های جوش مارپیچی (Spiral-Welded Tube) که نوع دوم را گاهی با نام لوله با درز مارپیچی (Helical Seam Pipe) نیز می‌شناسند.



نمودار ۱: ابعاد استاندارد لوله‌ها و تیوب‌های فولادی بدون درز و درزدار



نمودار ۲: روش‌های تولید لوله‌ها و تیوب‌های فولادی بدون درز و درزدار، به‌همراه کاربردهای مرتبط با هر محصول

با افزایش مداوم الزامات و نیازهای کیفی اعمال شده بر محصولات لوله‌ای، نه تنها فرآیندهای تولید مرتبط به طور پیوسته بهبود یافتند، بلکه سیستم‌های مناسب برای کنترل مؤثر تولید و تضمین کیفیت نیز معرفی شدند. امروزه، تولیدکنندگان معتبر لوله و تیوب همگی دارای سیستم‌هایی یکپارچه هستند که امکان پایش و مستندسازی پیوسته‌ی فرآیند تولید از مرحله‌ی فولادسازی تا محصول نهایی را فراهم می‌سازد. این سیستم‌ها، قابلیت رهگیری کامل (Total Traceability) را تضمین کرده و کنترل مؤثر فرآیند را بر اساس معیارهای کیفی ممکن می‌سازند. آزمایش‌های مکانیکی و غیرمخرب (NDT) که در مشخصات فنی مربوطه الزام شده‌اند، توسط کارکنانی مستقل از بخش کنترل تولید انجام می‌شوند تا کیفیت یکنواخت و پایدار محصول تضمین گردد.

بخش‌های بعدی تنها به توصیف آن دسته از فرآیندهای تولیدی می‌پردازند که امروزه به طور گسترده در تولید انبوه لوله و تیوب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. لوله و تیوب بدون درز

اصلی‌ترین فرآیندهای تولید لوله و تیوب بدون درز نزدیک به پایان قرن نوزدهم پدید آمدند. با پایان یافتن حقوق مالکیت و پتنت‌ها، توسعه‌های موازی مختلف که در ابتدا دنبال می‌شدند، کم‌کم از هم تمایز یافتند و مراحل شکل‌دهی هر یک در فرآیندهای جدید ادغام شدند. امروزه، تکنولوژی پیشرفته به مرحله‌ای رسیده است که ترجیح بر استفاده از فرآیندهای نوین و با کارایی بالا به شرح زیر است:

– فرآیند نورد ماندربل پیوسته (Continuous Mandrel Rolling) و فرآیند Push Bench در محدوده‌ی قطر خارجی تقریباً ۲۱ تا ۱۷۸ میلی‌متر.

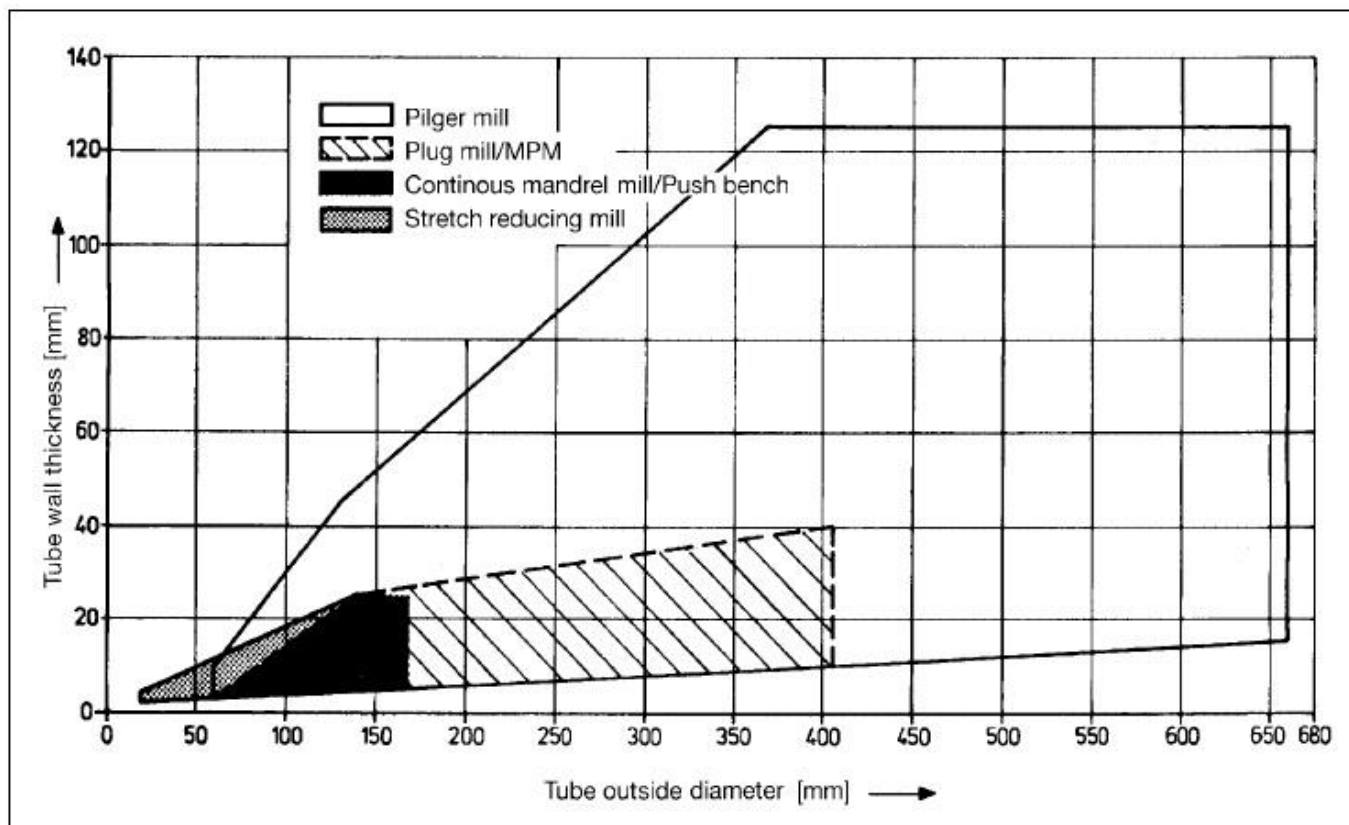
– کارخانه نورد چند قفسه (استند یا ایستگاه) با قالب پلاگ (Multi-Stand Plug Mill – MPM) با میله ماندربل شناور کنترل شده (Constrained Floating Mandrel Bar) و فرآیند Plug Mill در محدوده‌ی قطر خارجی تقریباً ۱۴۰ تا ۴۰۶ میلی‌متر.

– فرآیند سوراخ‌کاری با غلتک‌های متقاطع (Cross Roll Piercing) و نورد پیلگر (Pilger Rolling) در محدوده‌ی قطر خارجی تقریباً ۲۵۰ تا ۶۶۰ میلی‌متر

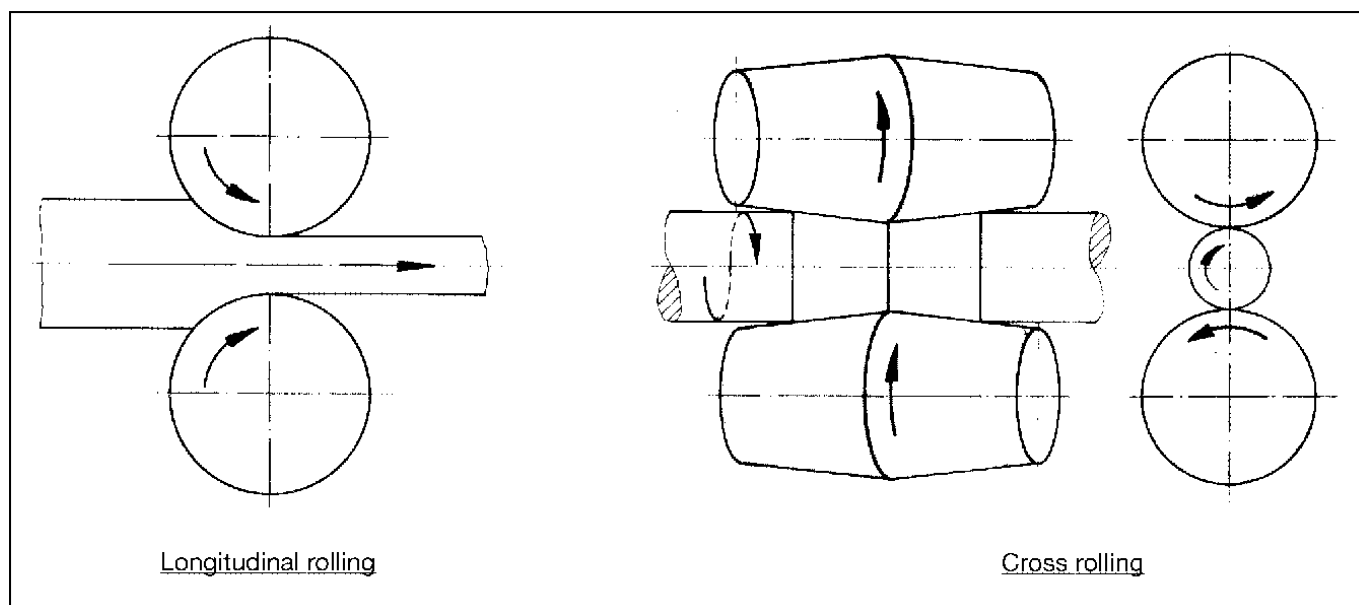
علاوه بر این محدوده‌های ابعادی کلی، بسیاری از واحدها نیز در محدوده‌های ابعادی دیگر فعالیت می‌کنند، همان‌طور که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده و در شکل ۱ نشان داده شده است.

با وجود انجام آزمایش‌ها، آزمون‌ها و توسعه‌ی فناوری‌های متعدد در گذشته، اختراع فرآیند سوراخ‌کاری با غلتک‌های متقاطع (Cross Roll Piercing) توسط برادران مانسمن (Mannesmann) در اواخر دهه ۱۸۸۰ به طور گسترده به عنوان آغاز تولید لوله و تیوب در مقیاس صنعتی شناخته می‌شود.

این مفهوم غلتک متقاطع (Cross Roll)، اولین جدایی از ویژگی مشخص تمام فرآیندهای نورد شناخته شده تا آن زمان را نشان داد، یعنی اینکه در آن فرآیندها: محورهای غلتک‌ها همگی در یک صفحه قرار داشتند، غلتک‌ها در جهت‌های مخالف می‌چرخیدند و سرعت خروج قطعه تقریباً با سرعت محیطی غلتک‌ها برابر بود (شکل ۲). در فرآیند سوراخ‌کاری با غلتک‌های متقاطع، محورهای غلتک موازی با محور قطعه قرار می‌گرفتند اما با زاویه نسبت به صفحه‌ی قطعه تنظیم می‌شدند. از آنجا که غلتک‌ها در یک جهت می‌چرخیدند، این چیدمان مسیر مارپیچی (Helical Passage) برای عبور قطعه از فاصله‌ی بین غلتک‌ها ایجاد می‌کرد. علاوه بر این، سرعت خروج قطعه تقریباً ده برابر کمتر از سرعت محیطی غلتک‌ها بود.



شکل ۱: محدوده‌های تولید در ساخت لوله های بدون درز بر حسب نوع نورد (کارخانه نورد)



شکل ۲: مقایسه بین نورد طولی و نورد عرضی

با وارد کردن پلاگ سوراخ کاری در فاصله‌ی بین غلتک‌ها، امکان سوراخ کاری ماده‌ی گرد و جامد فراهم شد و پوسته‌ای توخالی (شل) در حرارت نورد با اثر غلتک‌های متقاطع ایجاد گردید. با این حال، هنوز امکان تولید لوله‌هایی با ضخامت دیواره‌ی عادی و طول‌های قابل استفاده تنها با فرآیند سوراخ کاری غلتک متقاطع وجود نداشت. تنها پس از توسعه و معرفی مرحله‌ی دوم شکل‌دهی-فرآیند نورد پیلگر (Pilger Rolling)، که مجدداً توسط برادران مانسمن انجام شد، تولید لوله فولادی بدون درز به صورت عملی و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه گردید.

فرآیند پیلگر نیز فناوری ای غیرمعمول و نوآورانه بود، زیرا پوسته‌ی توخالی با دیواره‌ی ضخیم با کمک عملیات آهنگری غیرپیوسته‌ی غلتک‌های پیلگر یا “قالب‌ها” روی ماندریل قرار گرفته در داخل پوسته توخالی به ابعاد نهایی لوله کشیده می‌شد.

بدیهی است که این پیشرفت پیشگامانه، بسیاری از مخترعان آن زمان را تشویق کرد تا تعداد زیادی درخواست ثبت اختراع ارائه دهند – در برخی موارد صرفاً برای دور زدن حقوق مالکیت برادران مانسمن، و در موارد دیگر برای گشودن مسیرهای کاملاً جدید در تولید لوله بدون درز.

یکی از اعضای گروه اول، R.C. Stiefel، کارمند سابق شرکت مانسمن، شایسته‌ی ذکر ویژه است. با توسعه‌ی بیشتر تکنیک سوراخ‌کاری با غلتک متقاطع، او موفق شد در ایالات متحده آمریکا، پوسته‌های توخالی با دیواره‌ی نازک تولید کند که سپس در یک کارخانه نورد دوغلتکه پلاگ (Two-High Plug Mill) به لوله‌ی نهایی تبدیل شدند؛ این نورد پلاگ پیش‌تر به دلیل استفاده در فرآیند جوشکاری به خوبی شناخته شده بود. این فرآیند نورد پلاگ در ابتدا به‌ویژه در ایالات متحده موفقیت‌آمیز بود و امروزه در سراسر جهان، تقریباً به همان اندازه‌ی فرآیندهای سوراخ‌کاری غلتک متقاطع و پیلگرینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کارخانه نورد موسوم به Continuous Mandrel Rolling Mill با نام‌های Charles Kellog و بعدها Aloys Fassel گره خورده است. این فرآیند در ابتدا شامل چند ایستگاه نورد دوغلتکه (Two-High Stands) به‌صورت سری بود که به کمک آن‌ها شمش توخالی با دیواره نازک بر روی یک میله‌ی ماندریل نورد می‌شد تا لوله‌ی نهایی تولید گردد.

با این حال، به دلیل مشکلات مهندسی مکانیک و محرکه (درايو)، این فرآیند به‌زودی به تاریخ پیوست. پنجاه سال بعد، با ظهور فناوری مدرن برای حل به‌ویژه مشکلات کنترل حلقه باز و حلقه بسته، این فرآیند دوباره احیا شد و به یکی از کارآمدترین کارخانه‌های نورد لوله‌ای تبدیل گردید که تاکنون اختراع شده است.

راه دیگری برای تولید لوله بدون درز توسط H. Ehrhardt ابداع شد. او با سوراخ‌کاری شمش مربع شکل جامد در قالب گرد توانست پوسته‌ای توخالی با دیواره‌ی ضخیم و ته بسته تولید کند. این پوسته سپس بر روی میله ماندریل و از طریق قالب‌های حلقوی قرار گرفته به‌صورت سری (Tandem-Arranged Ring Dies) کشیده شد تا به ابعاد نهایی لوله برسد. این فرآیند، که به آن Push Bench Process گفته می‌شود، در شکل اصلاح‌شده خود تا به امروز همچنان مورد استفاده و قابل بهره‌برداری است.

پس از انقضای پتنت‌های مختلف، در دهه‌های بعد، فرآیندهای تولید اصلی تا حدودی اصلاح شدند و واحدهای شکل‌دهی جداگانه در ترکیب‌های متنوعی با یکدیگر ادغام گردیدند. بسته به اندازه لوله، ترکیب تولید و همچنین دسترس‌پذیری مواد اولیه، در طول زمان واحدهای نورد با طراحی‌های نسبتاً متفاوت توسعه یافته و ساخته شدند.

علاوه بر این، در نتیجه‌ی توسعه‌ی بیشتر واحدهای شکل‌دهی جداگانه، فرآیندهای جدیدی نیز ابداع شدند، مانند شاخه‌های کارخانه سوراخ‌کاری با غلتک متقاطع (Cross Roll Piercing Mill) در قالب فرآیندهای Assel و Diescher، یا فرآیند اکستروژن لوله (Tube Extrusion Process) که از پرس Ehrhardt مشتق شده است.

۲.۱ فرآیند سوراخ‌کاری و نورد پیلگر (Pierce and Pilger Rolling Process)

روش سوراخ‌کاری و نورد پیلگر برای تولید لوله بدون درز، به نام فرآیند مانسمن (Mannesmann Process) نیز شناخته می‌شود که به افتخار برادران مانسمن، مخترعان آن نام‌گذاری شده است. امروزه این روش برای قطرهای خارجی تقریباً ۶۰ تا ۶۶۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۳ تا ۱۲۵ میلی‌متر به کار می‌رود.

بسته به نسبت ضخامت دیواره به قطر و وزن شمش اولیه، طول لوله‌های تا ۲۸ متر می‌تواند با این تکنیک تولید شود. همچنین، قطرهای لوله بالاتر از محدوده‌ی نورد مشخص شده نیز با فرآیند انبساط (Expansion) قابل تولید هستند. برای این منظور، بزرگ‌ترین لوله‌های نوردشده دوباره حرارت داده می‌شوند و سپس با یکی از دو روش زیر افزایش قطر داده می‌شوند:

- کشیدن لوله از روی یک پلاگ (Pulling Through a Plug) که اغلب در چند مرحله (پاس) انجام می‌شود تا قطر خارجی به تدریج افزایش یابد، یا

• نورد روی دستگاه Becking Mill

صرف‌نظر از روش به‌کار رفته، ضخامت دیواره نیز کاهش می‌یابد.

در کارخانه‌های کوچک پیلگر برای تولید محدوده‌های کوچکتر اندازه، فرآیند نورد دو مرحله‌ای همچنان تا امروز به کار می‌رود.

مواد اولیه معمولاً به شکل شمش‌های نوردشده‌ی گرد (Round Rolled Steel Blooms) است، اگرچه شمش‌های گرد (Round Ingots) هنوز هم به‌طور مکرر استفاده می‌شوند. علاوه بر این، بیلتهای ریخته‌گری مداوم گرد (Round Continue cast Billets) با قطر بین ۱۰۰ تا تقریباً ۳۰۰ میلی‌متر نیز به‌طور فزاینده‌ای به کار گرفته می‌شوند.

شمش‌های ورودی از نظر قطر، طول و وزن با ابعاد نهایی لوله مورد نظر مطابقت داده می‌شوند. این شمش‌ها از طریق نواحی حرارتی مختلف در یک کوره چرخان با کف متحرک – (Rotary Hearth Furnace) معمولاً با سوخت گاز یا نفت – به دمای نورد گرم می‌شوند. این دما معمولاً در محدوده‌ی ۱۲۵۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد و بسته به ترکیب مواد ممکن است کمی کمتر باشد. پس از خارج شدن از کوره‌ی چرخان و زدودن پوسته‌ی سطحی (Descaling) با جت آب با فشار بالا، شمش‌ها به کارخانه سوراخ‌کاری با غلتک متقاطع (Cross Roll Piercing Mill) منتقل می‌شوند تا پوسته‌ای توخالی با دیواره‌ی ضخیم تولید گردد. در این فرآیند، طول ماده بین ۱.۵ تا ۲ برابر طول اولیه افزایش می‌یابد و کاهش مقطع عرضی بین ۳۳ تا ۵۰ درصد است.

کارخانه‌ی سوراخ‌کاری (Piercing Mill) دارای دو غلتک کاری با شکل خاص است که در یک جهت چرخش حرکت می‌کنند. محورهای آن‌ها با زاویه‌ی تقریباً ۳ تا ۶ درجه نسبت به صفحه‌ی افقی قطعه متمایل هستند. به‌طور معمول، فاصله بین غلتک‌ها (Roll Gap) توسط یک غلتک تکیه‌گاهی غیرمتحرک در بالا و یک کفشک تکیه‌گاهی در پایین بسته می‌شود. در مرکز فاصله‌ی بین غلتک‌ها یک نقطه سوراخ‌کاری (Piercing Point) قرار دارد که به‌عنوان ابزار داخلی عمل می‌کند و توسط یک بلوک فشار خارجی (External Thrust Block) از طریق ماندریل در جای خود ثابت نگه داشته می‌شود.

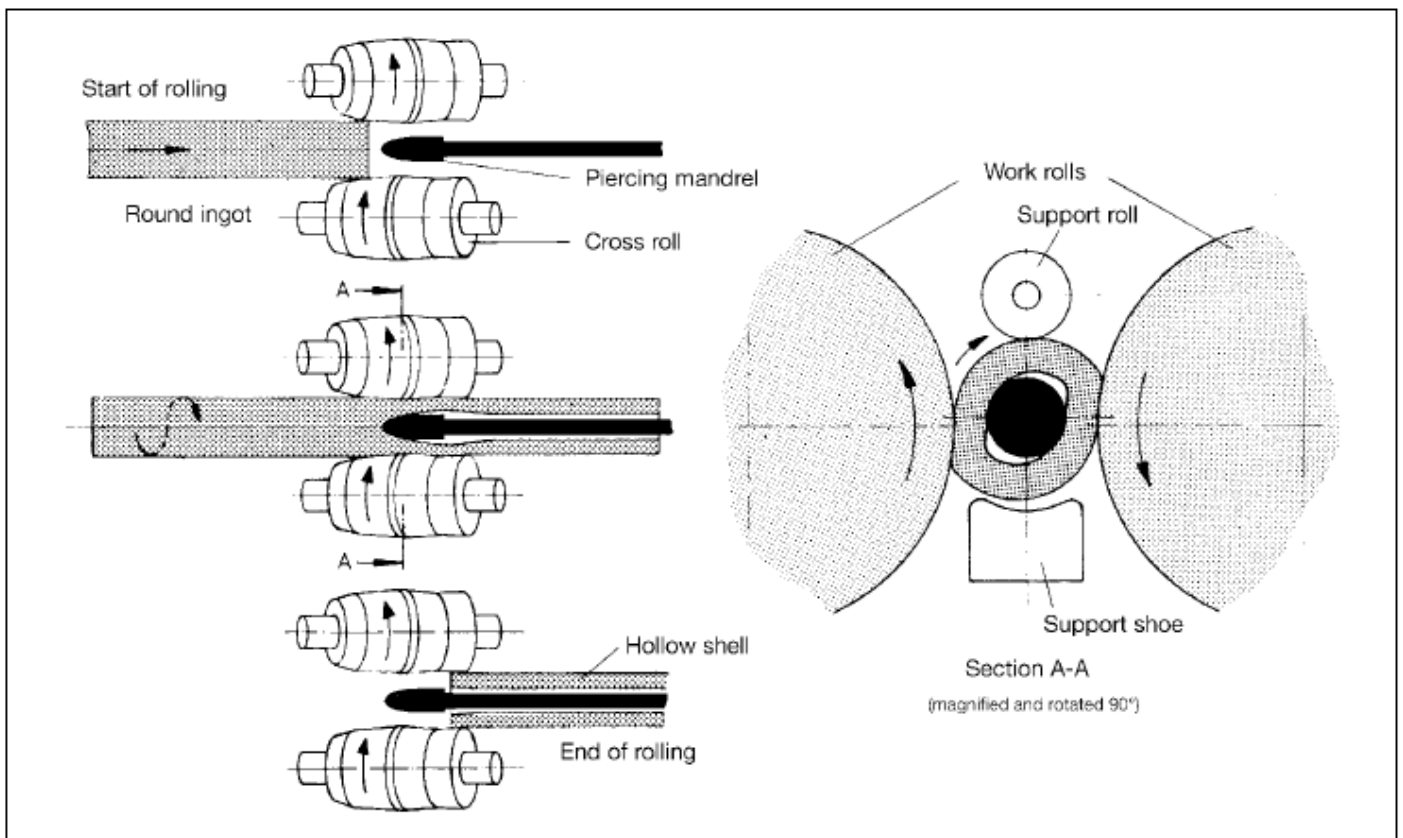
شکل ۳ نمای شماتیک ترتیب اجرای فرآیند سوراخ‌کاری با غلتک متقاطع (Cross Roll Piercing Process) را نشان می‌دهد. شمش گرد به داخل دستگاه فشار داده می‌شود، توسط بخش مخروطی ورودی غلتک‌ها «گرفته» می‌شود و به‌صورت حرکت مارپیچی بر روی ماندریل سوراخ‌کاری شکل داده می‌شود تا پوسته‌ای توخالی با دیواره‌ی ضخیم تولید گردد. در ابتدا، قطعه در صفحه‌ی افقی باریک می‌شود (Necked Down) در حالی که در صفحه‌ی عمودی منبسط می‌گردد. پس از آنکه ماندریل در دهانه‌ی تازه شکل‌گرفته‌ی قطعه وارد شد، ماده به‌طور پیوسته هنگام عبور بین غلتک‌ها و روی ماندریل تغییر شکل می‌یابد (بخش A-A) شکل ۴ یک دستگاه سوراخ‌کاری مدرن را از سمت خروجی محصول نشان می‌دهد.

پس از عملیات سوراخ‌کاری با غلتک متقاطع (Cross Roll Piercing)، پوسته‌ی توخالی با دیواره‌ی ضخیم در همان حرارت در ایستگاه نورد پیلگر (Pilgering Stand) نورد می‌شود تا لوله‌ی نهایی تولید گردد. نسبت کشیدگی (Elongation Ratio) در طول فرآیند پیلگر بین ۵ تا ۱۰ است و همراه با کاهش مقطع عرضی تقریباً ۸۰ تا ۹۰ درصد می‌باشد.

ایستگاه نورد پیلگر (Pilgering Stand) دارای دو غلتک است که گاهی به دلیل عملیات آهنگری به آن‌ها قالب (Dies) گفته می‌شود و دارای شیب مخروطی در سطح محیطی خود هستند. غلتک‌ها در جهت مخالف جریان نهایی ماده می‌چرخند. طرح گذر غلتک‌های پیلگر در شکل ۵ نشان داده شده است. گذر کاری (Work Pass) بین ۲۰۰ تا ۲۲۰ درجه از محیط "قالب" را در بر می‌گیرد و شامل بخش‌های زیر است:

- دهانه‌ی ورودی مخروطی (Tapered Inlet).
 - گذر استوانه‌ای یکنواخت برای صیقل‌دهی (Even, Cylindrical Polishing Pass).
 - گذر واگرا (Diverging Pass) که به فضای بزرگ‌تر برای آزاد کردن قطعه تبدیل می‌شود.
- شکل ۶ نمای شماتیک ترتیب نورد پیلگر (Pilger Rolling Sequence) را نشان می‌دهد.

پوسته‌ی توخالی بر روی یک ماندریل استوانه‌ای روغن کاری شده قرار می‌گیرد که قطر آن تقریباً با قطر داخلی مورد نظر لوله نهایی مطابقت دارد. سپس مجموعه پوسته و ماندریل توسط یک تغذیه‌کننده (Feeder) به سمت غلتک‌های پیلگر منتقل می‌شود. هنگامی که پوسته توسط دهانه‌ی ورودی مخروطی گذر کاری (Work Pass) "گرفته" می‌شود، یک موج کوچک ماده از سطح خارجی آن فشرده و سپس توسط بخش صیقل‌دهنده‌ی گذر کاری روی ماندریل به ضخامت دیواره‌ی مورد نظر شکل داده می‌شود. با توجه به جهت چرخش غلتک‌ها، ماندریل همراه با پوسته توخالی به عقب هدایت می‌شوند، یعنی در جهت مخالف نورد تا زمانی که گذر آزادسازی (Release Pass) وارد عمل شود و قطعه آزاد گردد. در طول این حرکت عقب‌رو (چرخه نورد)، انرژی فشرده‌سازی هوا در سیلندر پنوماتیک تغذیه‌کننده ذخیره می‌شود. هنگامی که پوسته توخالی از گذر آزادسازی عبور می‌کند، انرژی فشرده‌سازی برای بازگرداندن ماندریل و پوسته به موقعیت اولیه‌ی نورد استفاده می‌شود. همزمان، یک محور مارپیچی (Helical Spindle) قطعه را ۹۰ درجه می‌چرخاند و سیستم هیدرولیک تغذیه‌کننده را به جلو می‌برد به طوری معادل حجم پوسته‌ی توخالی قبلاً نورد شده. در همین حال، غلتک‌ها به نقطه‌ای می‌رسند که قطعه دوباره توسط دهانه‌ی ورودی گذر کاری گرفته شود و موج جدیدی از ماده روی سطح پوسته فشرده گردد و چرخه قبلی تکرار شود. از آنجایی که قطعه ۹۰ درجه چرخیده است، هر برجستگی ایجادشده توسط فاصله‌ی غلتک‌ها اکنون در ریشه شیار برای چرخه‌ی بعدی قرار می‌گیرد و به شکل کانتور نهایی لوله در می‌آید. با توجه به اینکه هر ناحیه از ماده حداقل دو بار نورد می‌شود، لوله‌ی حاصل ضخامت دیواره‌ی یکنواخت و هم‌مرکزی عالی دارد.



شکل ۳: فرآیند سوراخ کاری در یک نورد سوراخ کاری متقاطع مانسمان (Mannesmann)



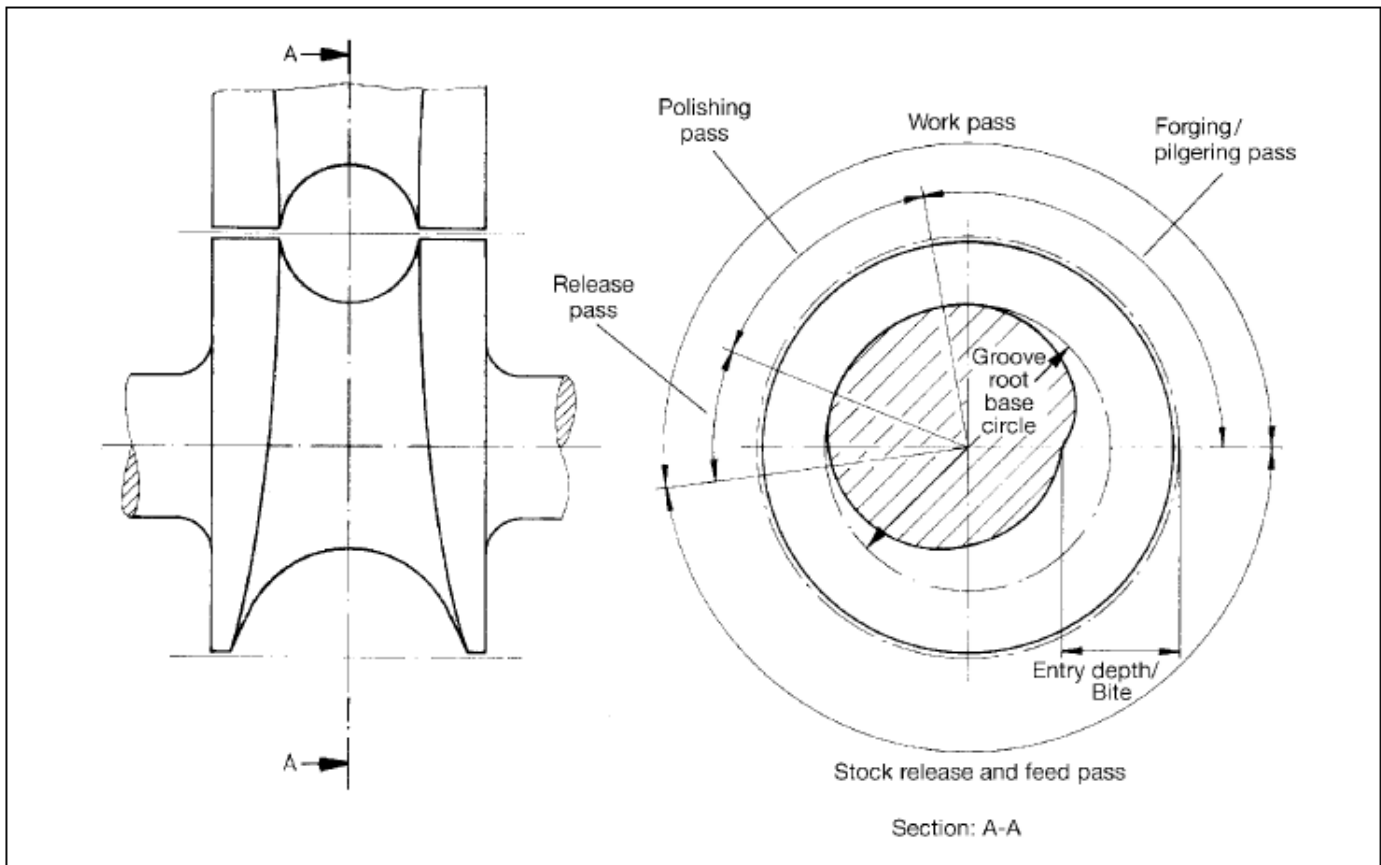
شکل ۴: سوراخ‌کاری یک شمش در نورد سوراخ‌کاری متقاطع مانیسمان (سمت خروجی)
عکس از کارخانه (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES):

۱- پوسته توخالی

۲- غلتک‌های کاری

۳- غلتک نگهدارنده

۴- میله ماندریل همراه با ماندریل سوراخ‌کاری

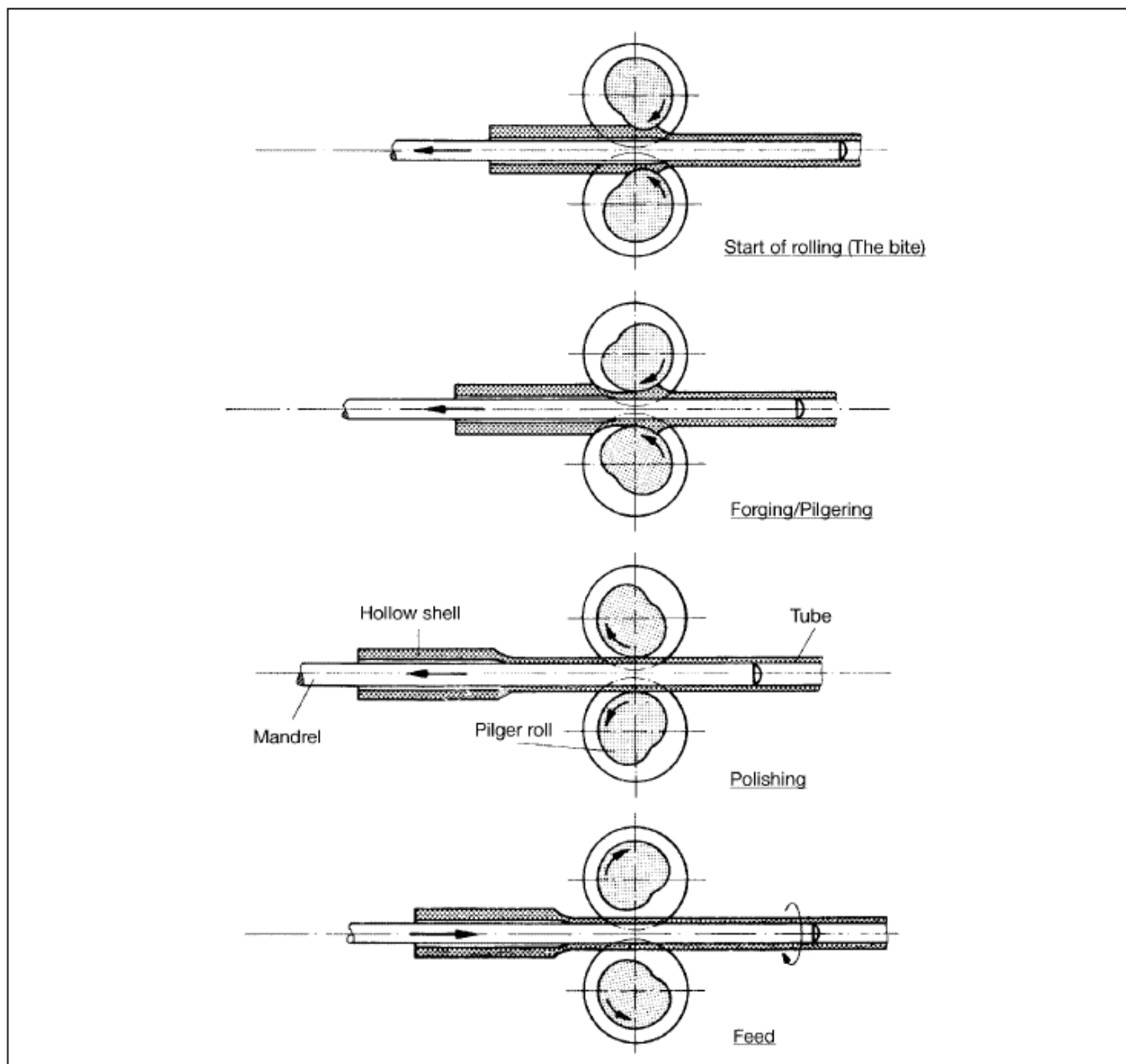


شکل ۵: نماهای جلویی و مقطع عرضی یک غلتک پیلگر

این فرآیند نورد و آهنگری مرحله‌ای با حرکت‌های (رفت و برگشت) عقب و جلو تکرارشونده، به نام " پیلگر (Pilger) " نام‌گذاری شد (واژه‌ای آلمانی به معنی «زائر» یا «پیروزی»). این نام به دلیل شباهت آن با رژه‌ی مشهور رقص در شهر Echternach انتخاب شده است، که در آن شرکت‌کنندگان سه قدم به جلو و دو قدم به عقب در مسیر خود برمی‌دارند، مشابه حرکت‌های جلو و عقب در فرآیند پیلگر.

پس از اتمام فرآیند پیلگرینگ (Pilgering Process)، لوله‌ی نهایی از ماندریل جدا می‌شود. بخش باقی‌مانده‌ی پوسته‌ی توخالی که کار نشده است و به آن سر پیلگر (Pilger Head) گفته می‌شود، با اره‌ی داغ (Hot Saw) از بدنه‌ی لوله جدا می‌گردد؛ همچنین سر جلویی لوله نیز در صورتی که دارای ناهمواری یا تغییر شکل باشد، بریده می‌شود. سپس لوله، پس از گرمادهی مجدد در صورت نیاز، به کارخانه‌ی تعیین اندازه (Sizing Mill) یا کاهش‌دهنده‌ی قطر (Reducing Mill) منتقل می‌شود.

کارخانه تعیین اندازه (Sizing Mill) برای ایجاد قطر خارجی دقیق و بهبود بیشتر هم‌مرکزی (Concentricity) لوله به کار می‌رود. این کارخانه معمولاً از سه ایستگاه نورد با آرایش‌های دوغلتکی (Two-High) یا سه‌گلتکی (Three-High) تشکیل شده است. غلتک‌های کاری (Work Rolls) یک گذر بسته (Closed Pass) را تشکیل می‌دهند و در پیکربندی‌های چندایستگاهی، هر گذر ایستگاه با زاویه‌ای نسبت به گذر ایستگاه قبلی جابجا شده است.



شکل ۶: فرآیند نورد پیلگر

در کارخانه کاهش‌دهنده یا کشش-کاهش‌دهنده (Reducing or Stretch-Reducing Mill)، قطر خارجی لوله به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و ضخامت دیواره در این فرآیند کمی افزایش یا کاهش می‌یابد. بسته به ترکیب محصول (Product Mix)، برای این منظور از کارخانه‌هایی با ۵ تا ۲۸ ایستگاه نورد استفاده می‌شود.

پس از آخرین عملیات شکل‌دهی، لوله‌ها/تیوب‌های نهایی روی بسترهای خنک‌کننده (Cooling Bed) تا دمای محیط سرد می‌شوند و پس از بازرسی ابعادی (Dimensional Check)، در بسترهای نگهدارنده (Cradles) جمع‌آوری می‌گردند تا به بخش تکمیل (Finishing Department) منتقل شوند.

در این بخش، فرآورده‌های زیر انجام می‌شود:

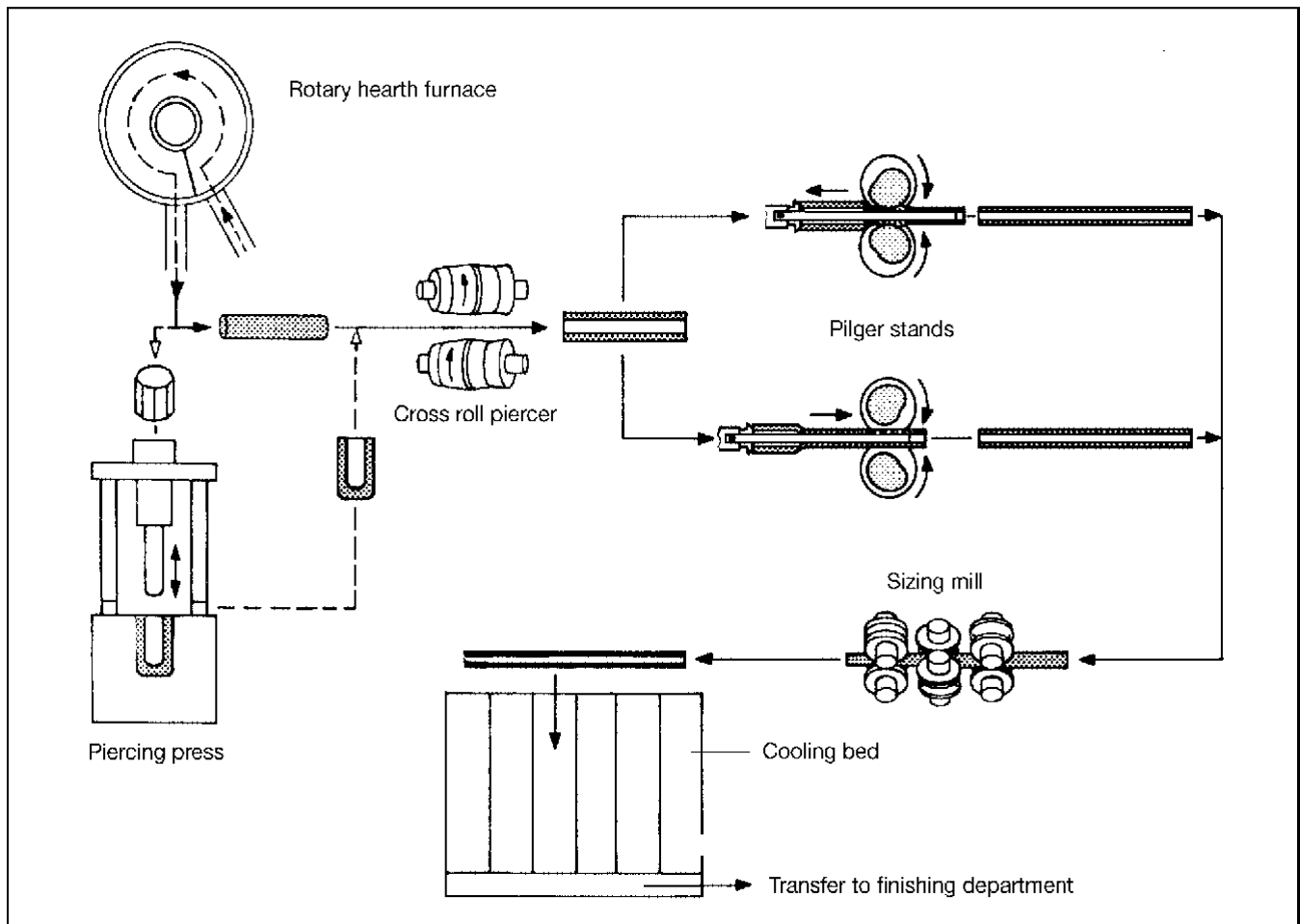
- ماشین‌کاری انتهای لوله/تیوب.

- تابگیری (Straightening).

- آزمایش هیدرواستاتیک (Hydrostatic Testing).

سپس ممکن است آزمایش‌ها و بازرسی‌های بیشتری مطابق با مشخصات مشتری انجام گیرد.

شکل ۷ چیدمان اصلی و ترتیب اجرای فرآیند در یک کارخانه نورد سوراخ‌کاری و پیلگر (Pierce and Pilger Rolling Mill) را نشان می‌دهد.



شکل ۷: چینش پایه‌ای یک کارخانه نورد سوراخ‌کاری و پیلگر

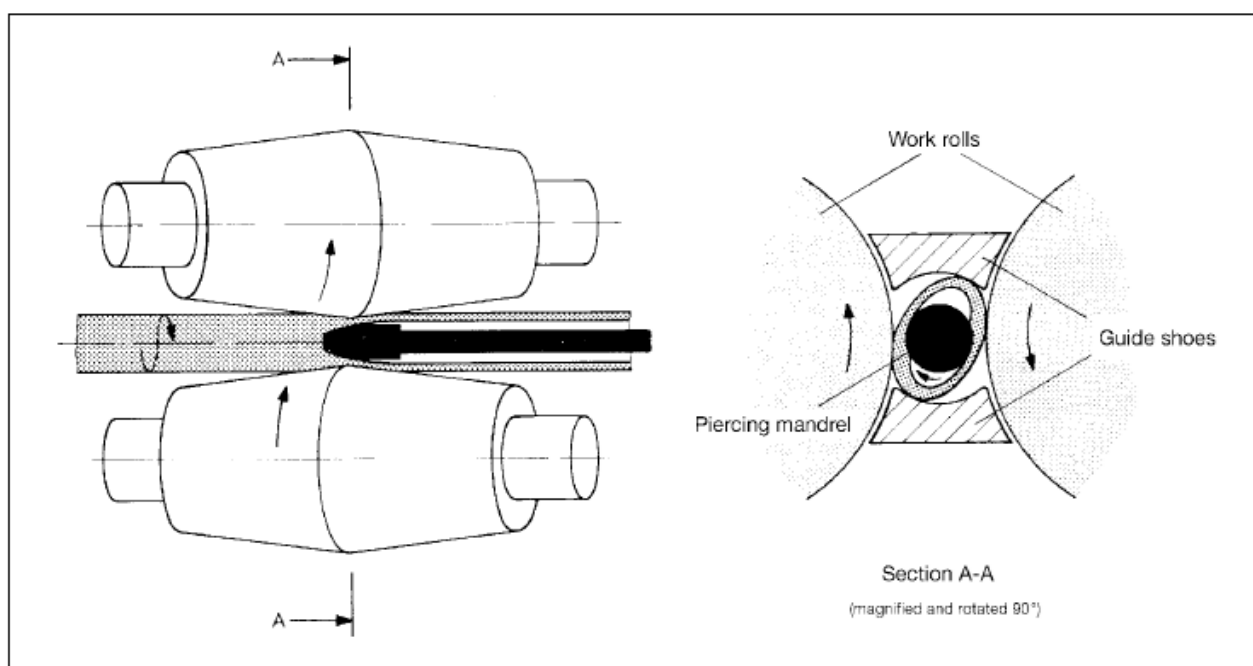
طراحی کارخانه‌های پیلگر سنگین (Heavy Pilger Mills) برای تولید لوله‌های با قطر بزرگ نیز اساساً مشابه آنچه قبلاً توضیح داده شد، است. با این حال، مواد اولیه به شکل شمش چندضلعی (Polygonal Ingot) با ابعاد لبه‌ای بین ۳۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر و وزن غالباً بیش از ۵ تن می‌باشد. پس از گرمادهی شمش تا دمای نورد در کوره چرخان با کف متحرک (Rotary Hearth Furnace)، شمش ابتدا در قالب گرد (Round Die) روی یک پرس سوراخ‌کاری معمولاً عمودی (Vertical Piercing Press) قرار داده می‌شود. سپس شمش جامد با یک پانچ استوانه‌ای (Cylindrical Punch) با تقریباً نصف قطر قالب سوراخ‌کاری می‌شود تا پوسته‌ای توخالی با ته بسته ایجاد گردد. عملیات بعدی شامل کاهش ضخامت دیواره است.

۲.۲ فرآیند نورد پلاگ

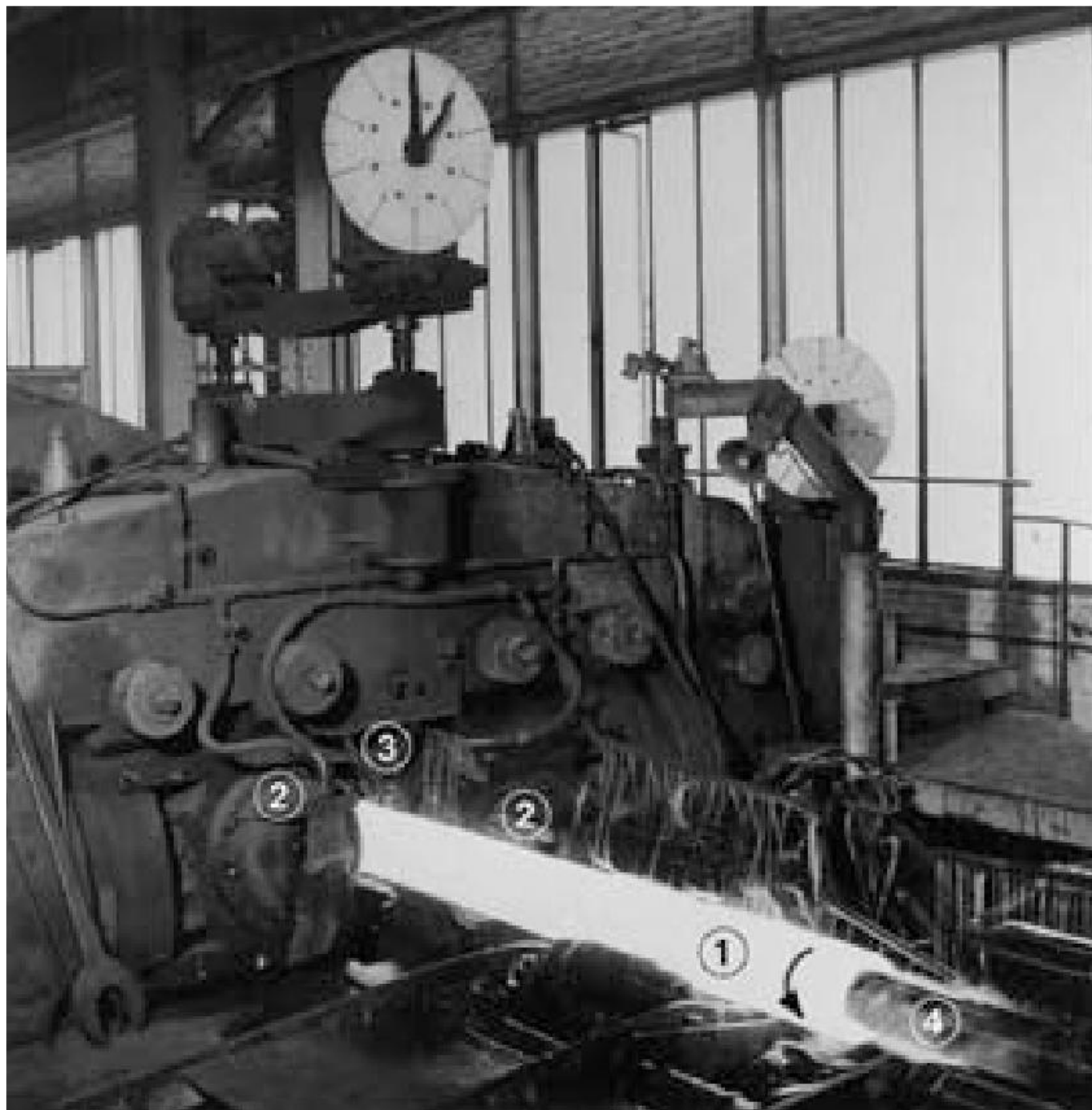
فرآیند نورد با پلاگ که به نام فرآیند اشتیفل (Stiefel) نیز شناخته می‌شود - به‌ویژه در کشورهای آلمانی‌زبان - که نام آن برگرفته از مخترع آن است، و در کشورهای انگلیسی‌زبان به نام "کارخانه خودکار (Automatic Mill)" نامیده می‌شود. امروزه لوله‌های بدون درز با قطر حدود ۶۰ تا ۴۰۶ میلی‌متر و ضخامت دیواره حدود ۳ تا ۴۰ میلی‌متر بر روی دستگاه‌های پلاگ تولید می‌شوند. محدوده معمول ضخامت دیواره بین ضخامت دیواره معمولی طبق DIN 2448 تا چهار برابر ضخامت معمولی بسته به قطر خارجی لوله قرار دارد. بیشترین طول لوله‌های تولید شده بین ۱۲ تا ۱۶ متر است. در کارخانه‌های نورد کوچک و متوسط، فرآیند شکل‌دهی از ماده جامد به لوله دوباره در دو مرحله انجام می‌شود، با شمش‌های نورد شده یا به‌تازگی با شمش‌ها (بلوم‌های) ریخته‌گری مداوم با قطر بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر به‌عنوان ماده اولیه. برخلاف فرآیند پیلگرینگ، قطر شمش تقریباً معادل قطر لوله‌ای است که از آن تولید می‌شود و در نتیجه، طول بلوم‌ها بزرگ‌تر بوده و بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر قرار دارد.

بلوم‌ها در کوره‌های چرخان (Rotary Hearth Furnace) تا دمای شکل‌دهی حدود ۱۲۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند. پس از پاک‌سازی با جت آب پرفشار (Descaling)، بلوم در کارخانه سوراخ‌کاری با غلتک‌های متقاطع (Cross roll piercing mill) سوراخ می‌شود تا یک پوسته توخالی با دیواره نازک تولید شود که طول آن ۳ تا ۴/۵ برابر طول اولیه افزایش می‌یابد، که معادل سطح تغییر شکل بین ۶۵ تا ۷۵ درصد است.

شکاف بین غلتک‌های کار تا حد زیادی توسط یک راهنمای بالایی و پایینی (Top and Bottom Guide Shoe) بسته می‌شود. این راهنماها که توسط R.C. Stiefel معرفی شده‌اند، با عمل کردن به‌عنوان غلتک‌های ثابت، به فرآیند طول‌دهی کمک می‌کنند و امکان تولید یک ala توخالی با دیواره نسبتاً نازک را فراهم می‌آورند. مجدداً، قطعه کار هنگام عبور از شکاف غلتک، مسیر مارپیچی (هلیکال) را دنبال می‌کند، که این امکان را به ماندل سوراخ‌کاری (Piercing Mandrel) می‌دهد تا به‌عنوان ابزار داخلی، مواد را مؤثرتر جابه‌جا کند. به دلیل زاویه نسبتاً بزرگ شیب غلتک‌ها و سرعت‌های بالاتر نورد، سرعت خروج قطعه کار در سوراخ‌کننده‌های نوع بشکه‌ای (Barrel-type Piercers) به‌طور قابل توجهی سریع‌تر از کارخانه‌های سوراخ‌کاری مانسمان (Mannesmann Piercing Mills) است. این سرعت بالاتر به دلیل زمان سیکل ایستگاه پلاگ پایین‌دست لازم است.



شکل ۸: روش عملکرد سوراخ‌کننده با غلتک متقاطع (نوع بشکه‌ای)



شکل ۹: سوراخ کاری شمش (بلوم) در سوراخ کننده با غلتک متقاطع نوع بشکه ای (نما از سمت خروجی)
عکس از کارخانه (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES) :

۱- شمش توخالی

۲- غلتک های کاری

۳- کفش راهنما

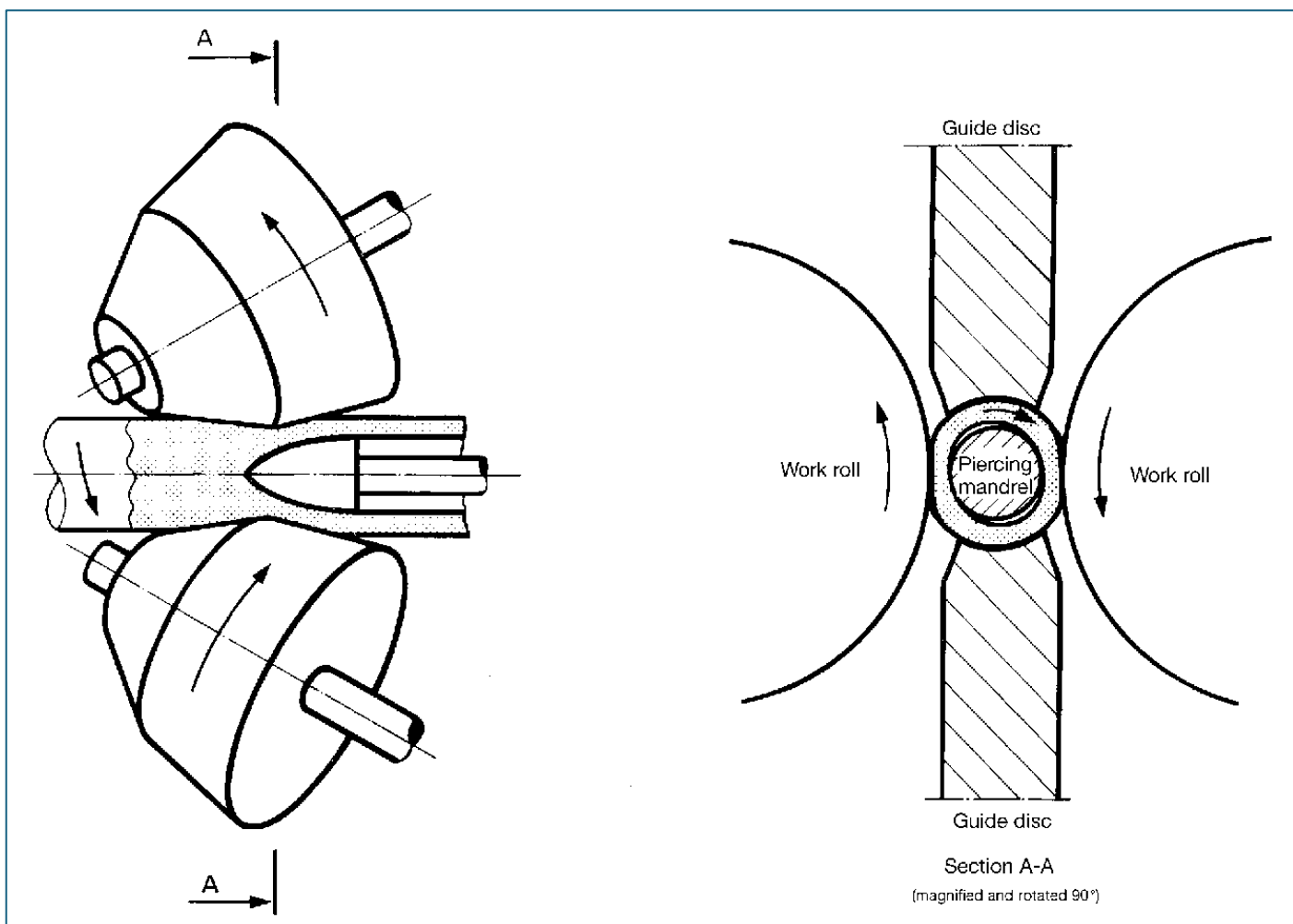
۴- میله ماندریل همراه با ماندریل سوراخ کاری

شکل ۹ انتهای خروجی یک سوراخ کننده متقاطع نوع بشکه ای (Barrel-Type Cross Roll Piercer) را نشان می دهد.

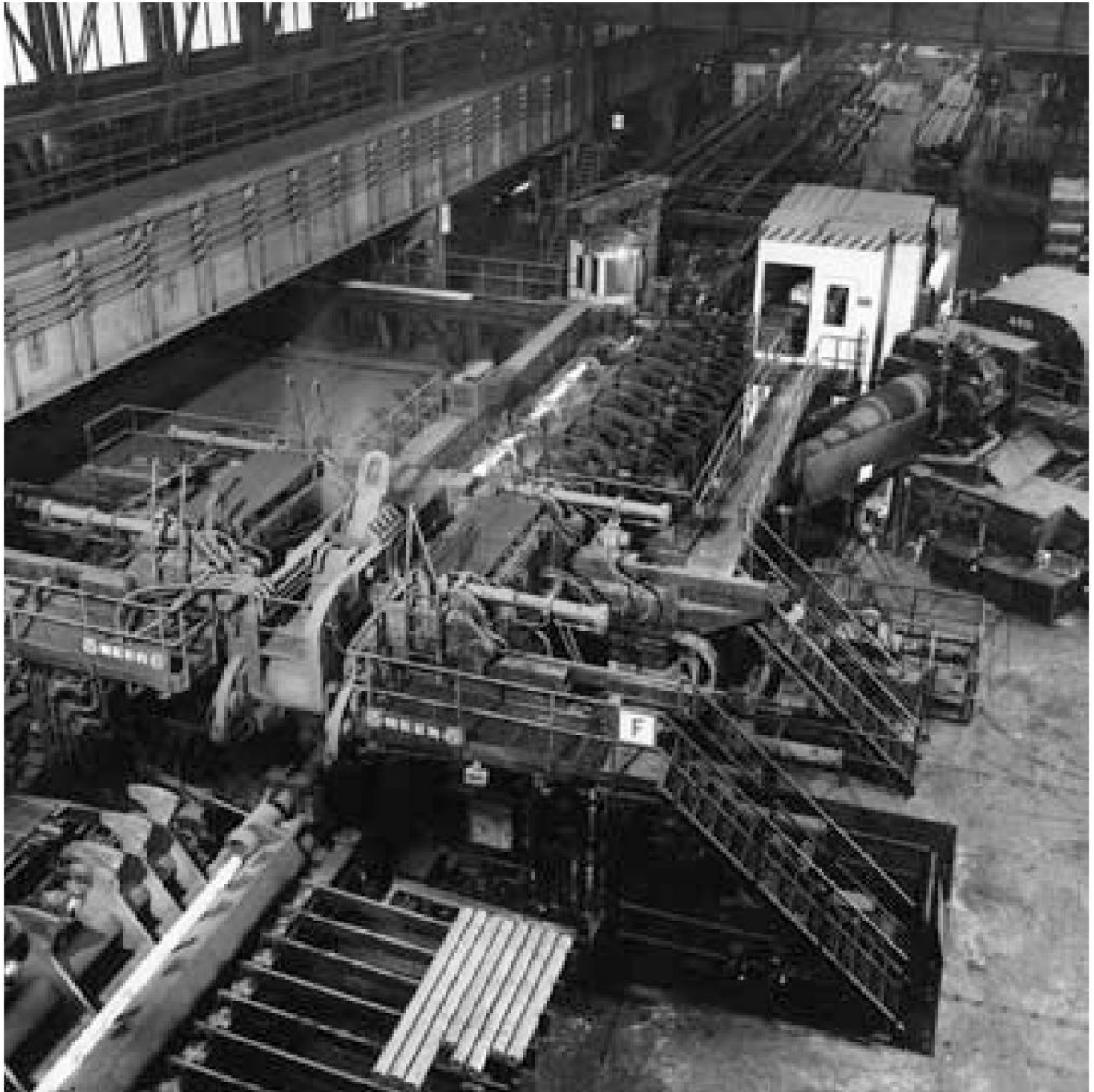
در کارخانه‌های پلاگ که برای تولید لوله‌های با قطر بزرگ استفاده می‌شوند، معمولاً بین سوراخ‌کننده نوع بشکه‌ای و ایستگاه پلاگ، یک کارخانه سوراخ‌کاری دوم با همان طراحی قرار دارد. این دستگاه اغلب به‌عنوان "افزایش دهنده طول یا طول‌دهنده" (Elongator) توصیف می‌شود که هدف آن به‌ویژه افزایش قطر داخلی و خارجی و طولانی‌تر کردن پوسته توخالی است.

با این حال، در سال‌های اخیر، این دو کارخانه سوراخ‌کاری توسط کارخانه‌های پلاگ سنگین جایگزین شده‌اند که تنها یک واحد سوراخ‌کاری مخروطی (Cone Piercing Unit) دارند (شکل ۱۰). در اینجا نیز، غلتک‌های کار دارای طراحی دو مخروطی (Biconical) هستند. هر یک از آن‌ها حدود ۳۰ درجه نسبت به محور شمش توخالی و حدود ۱۰ تا ۱۲ درجه نسبت به افق زاویه دارند. شکاف غلتک‌ها توسط دو دیسک جانبی که آن‌ها نیز محرک هستند بسته می‌شود. این آرایش منجر به سطوح بالاتر طول‌دهی (تا ۶ برابر)، افزایش قطر بیشتر و همچنین سرعت‌های بالاتر خروج پوسته توخالی (تا ۱/۵ متر بر ثانیه) می‌شود. شکل ۱۱ یک کارخانه سوراخ‌کاری مخروطی مدرن را از انتهای ورودی نشان می‌دهد که یک واحد محرک آن در بالای سمت راست تصویر قابل مشاهده است.

فرآیند شکل‌دهی پوسته توخالی به لوله نهایی در همان گرمادهی (Heat) در ایستگاه پلاگ پایین‌دست انجام می‌شود، با طول‌دهی تقریباً دو برابر (کاهش مقطع عرضی حدود ۵۰٪)، که معمولاً دو مرحله (پاس) نورد برای آن اعمال می‌گردد.



شکل ۱۰: نمایش شماتیک یک کارخانه نورد سوراخ‌کاری مخروطی

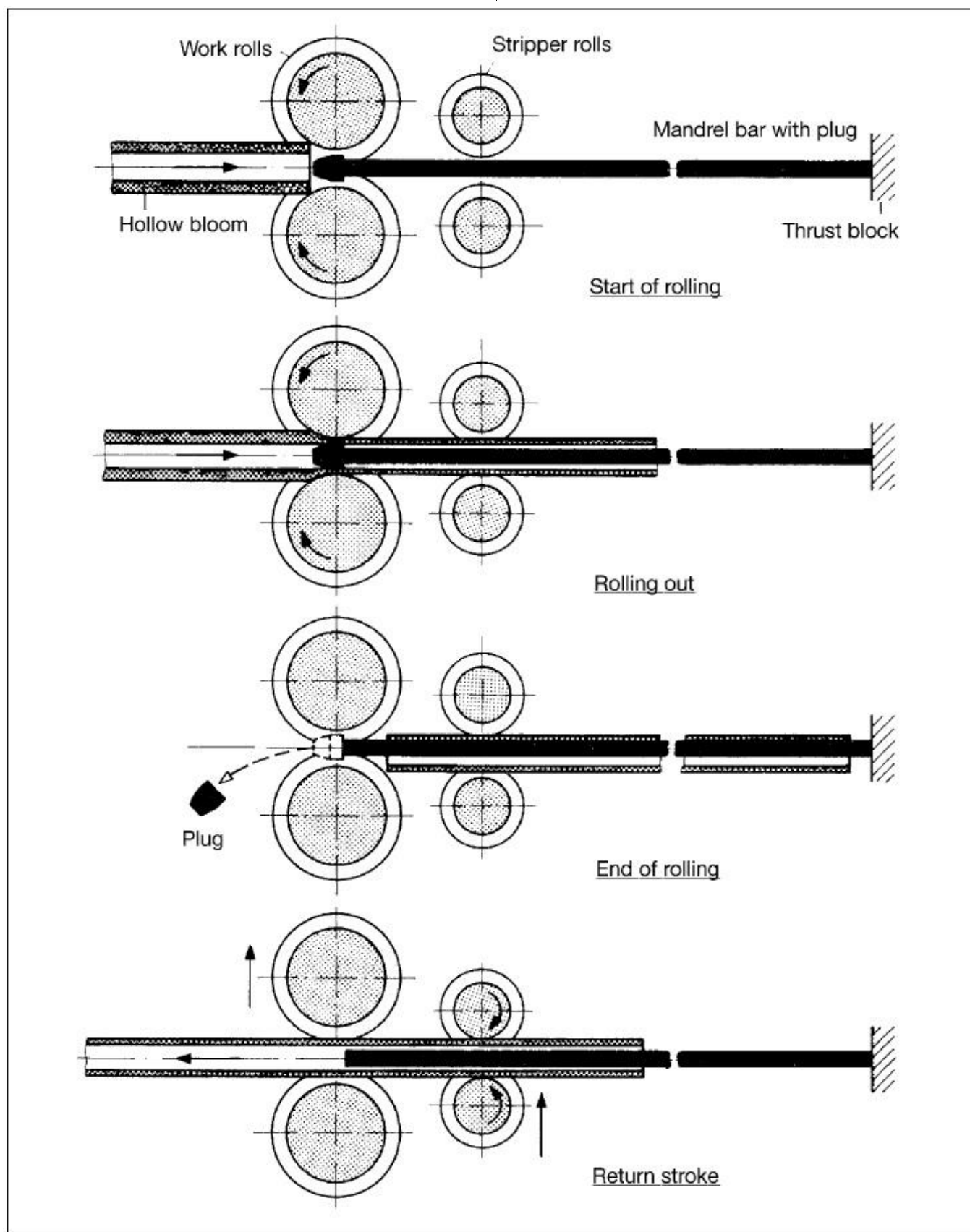


شکل ۱۱: کارخانه نورد سوراخ کاری مخروطی مدرن (نما از سمت ورودی) عکس از کارخانه: (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES)

در ایستگاه پلاگ، دو غلتک استوانه‌ای کار نصب شده‌اند که دارای شیارهای تقریباً دایره‌ای هستند، و همچنین دو غلتک جداگانه محرک برای جدا کردن (Stripper Rolls) تعبیه شده‌اند. یک پلاگ که در مرکز شکاف غلتک‌ها قرار دارد، توسط یک میله یا ماندرل (Mandrel) که توسط یک بلوک رانش (Thrust Block) در پایین دست ایستگاه نورد حمایت می‌شود در موقعیت خود نگه داشته می‌شود. شکاف حلقوی حاصل بین غلتک‌ها و پلاگ معادل ضخامت دیواره لوله نهایی است.

شکل ۱۲ نمایش نموداری فرآیند نورد را نشان می‌دهد. پوسته توخالی با کمک یک هل‌دهنده پنوماتیکی (Pneumatic Pusher) به داخل دستگاه وارد می‌شود. سپس توسط غلتک‌ها گرفته شده و بر روی پلاگ نورد می‌شود، که باعث کاهش قطر خارجی و ضخامت دیواره می‌گردد. پس از پایان عملیات نورد، ماندرل در داخل لوله باقی می‌ماند، در حالی که پلاگ از شکاف عبور کرده و وارد دستگاه ابزارگذاری و تعویض می‌شود. برای بازگرداندن لوله به سمت ورودی شکاف، غلتک بالایی بالا برده می‌شود و همزمان غلتک‌های جداکننده (Stripper Rolls) به

حرکت درمی آیند. پس از چرخش لوله به میزان ۹۰ درجه، پاس نورد دوم با استفاده از پلاگی با قطر تقریباً ۱ تا ۳ میلی متر بزرگ تر آغاز می شود و لوله به انتهای جلویی ایستگاه نورد بازگردانده می شود.

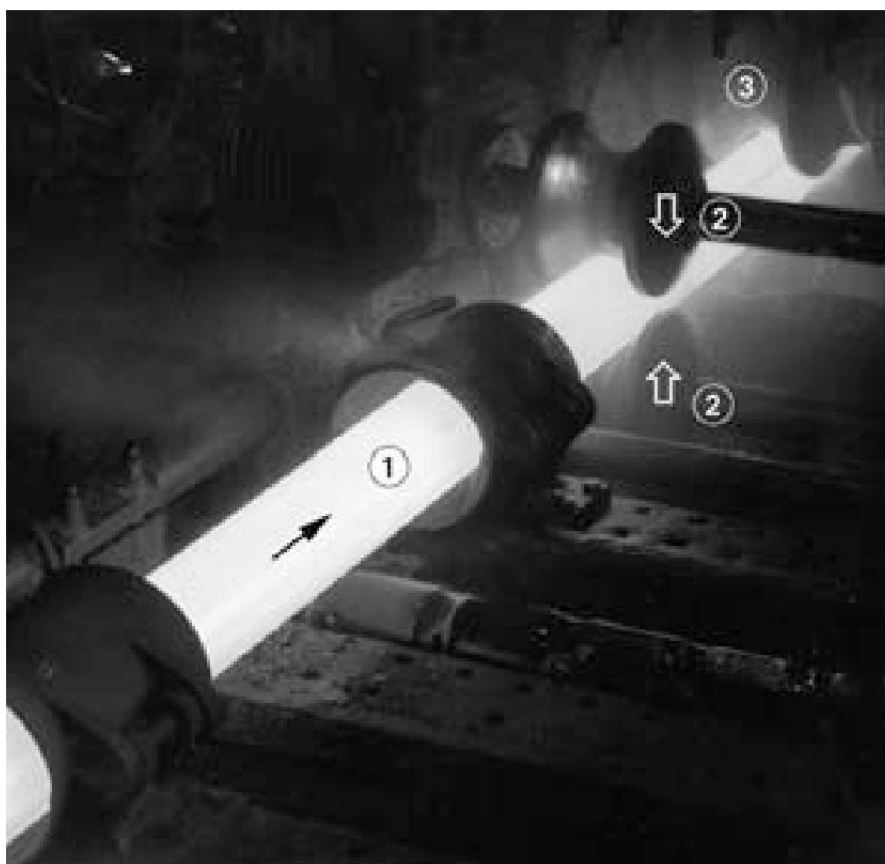


شکل ۱۲: توالی عملیاتی در فرآیند نورد با پلاگ

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ایستگاه پلاگ در یک کارخانه نورد پلاگ بزرگ را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳: کارخانه نورد دوغلتکی با پلاگ (سمت ورودی) عکس از کارخانه: (VALLOUREC & MANNESMANN TUBES)



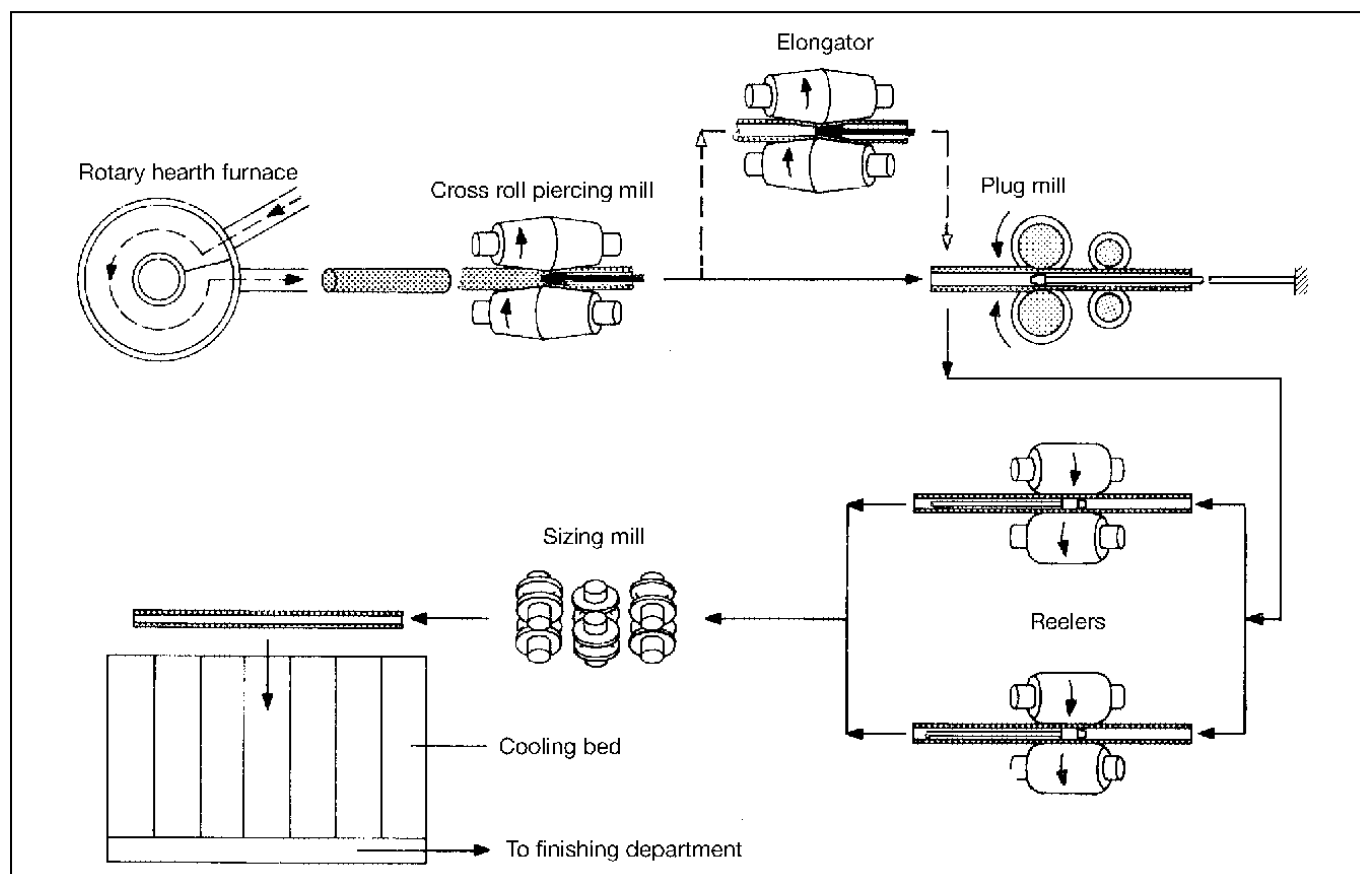
شکل ۱۴: کارخانه نورد دوغلتکی با پلاگ (سمت خروجی - غلتک‌های جداکننده درگیر)

(عکس از کارخانه VALLOUREC & MANNESMANN TUBES)

۱ - شمش توخالی ۲ - غلتک‌های جداکننده ۳ - غلتک‌های کاری

پس از اینکه ضخامت دیواره لوله به مقدار دلخواه نورد شد، لوله بدون گرمادهی مجدد به جمع کن لوله یا "ریلر" (Reeler) منتقل می‌شود. در آنجا، بین دو غلتک متقاطع بشکهای و با پلاگی که به عنوان ابزار داخلی عمل می‌کند، لوله گرد و صیقلی می‌شود، فرآیندی که منجر به افزایش جزئی قطر لوله نیز می‌گردد. سپس لوله از یک نورد چند ایستگاهی سایزینگ (Multi-Stand Sizing Mill) عبور می‌کند تا قطر خارجی به اندازه مشخصی نورد شود. لوله‌های نهایی سپس بر روی تخت خنک‌کننده (Cooling Bed) قرار داده می‌شوند. پس از عملیات صاف‌کاری بعدی (Straightening)، لوله به بخش پایان‌کاری (Finishing Department) منتقل می‌شود تا برای پردازش و تست‌های بعدی آماده گردد.

شکل ۱۵ نمایش نموداری ساختار و توالی عملیاتی یک کارخانه پلاگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: نمایش شماتیک یک کارخانه نورد با پلاگ

در برخی موارد - به‌ویژه برای لوله‌های با قطر متوسط - واحد پایین‌دست کارخانه پلاگ ممکن است به جای نورد سایزینگ (Sizing Mill) به شکل نورد کاهش‌دهنده یا کاهش‌دهنده کششی همراه با کوره گرمادهی مجدد طراحی شود تا انطباق بهتر با برنامه تولید (Program Mix) ممکن گردد (به بخش‌های مربوط به کارخانه پیلگر و نورد مداوم با مغزه داخلی نیز مراجعه شود).

۲.۳ فرآیند نورد مداوم با مغزه داخلی (Continuous Mandrel Rolling Process)

فرآیند نورد مداوم با ماندِرل داخلی نیز تقریباً در آستانه قرن بیستم شکل گرفت - این بار به دلیل چیدمان چند پاس نورد با اندازه‌های تدریجی به‌صورت متوالی در یک سری ایستگاه‌های نورد برای تشکیل یک خط نورد. این نوع کارخانه، پوسته توخالی سوراخ‌شده در کارخانه سوراخ‌کاری را بر روی میله ماندِرل شناور که به‌عنوان ابزار داخلی عمل می‌کند طولانی می‌کند تا لوله نهایی تولید شود.

در دوره‌های اولیه توسعه این فرآیند، مشکلات هماهنگی جریان ماده بین ایستگاه‌های مختلف معمولاً رخ می‌داد، و میزان متفاوت فرسایش غلتک‌ها در ایستگاه‌های مختلف وضعیت را تشدید می‌کرد. تنها با پیشرفت فناوری‌های مدرن درایو و کنترل، کارخانه‌های نورد مداوم با ماندلر داخلی توانسته‌اند در چند دهه اخیر به فرآیند تولید با کارایی بالا تبدیل شوند، فرآیندی که به‌طور گسترده برای لوله‌های بدون درز با قطر خارجی بین ۶۰ تا ۱۷۸ میلی‌متر به کار می‌رود. در کارخانه‌های مدرن این نوع، رویه‌ای به کار گرفته شده که تنها یک یا دو اندازه پوسته توخالی/شمش لوله در خط نورد مداوم تولید می‌شود و نورد کاهش‌دهنده کششی پایین‌دست آن‌ها را به اندازه‌های مورد نظر - گاهی تا قطر خارجی ۲۱ میلی‌متر - نورد نهایی می‌کند. ضخامت دیواره تولید شده در این فرآیند بین ۲ تا ۲۵ میلی‌متر متغیر است و بسته به قطر خارجی لوله تعیین می‌شود.

در دوره‌های اولیه توسعه این فرآیند، مشکلات هماهنگی جریان ماده بین ایستگاه‌های مختلف معمولاً رخ می‌داد، و میزان متفاوت فرسایش غلتک‌ها در ایستگاه‌های مختلف وضعیت را تشدید می‌کرد. تنها با پیشرفت فناوری‌های مدرن درایو و کنترل، کارخانه‌های نورد مداوم با ماندلر داخلی توانسته‌اند در چند دهه اخیر به فرآیند تولید با کارایی بالا تبدیل شوند، فرآیندی که به‌طور گسترده برای لوله‌های بدون درز با قطر خارجی بین ۶۰ تا ۱۷۸ میلی‌متر به کار می‌رود. در کارخانه‌های مدرن این نوع، رویه‌ای به کار گرفته شده که تنها یک یا دو اندازه پوسته توخالی/شمش لوله در خط نورد مداوم تولید می‌شود و نورد کاهش‌دهنده کششی پایین‌دست آن‌ها را به اندازه‌های مورد نظر - گاهی تا قطر خارجی ۲۱ میلی‌متر - نورد نهایی می‌کند. ضخامت دیواره تولید شده در این فرآیند بین ۲ تا ۲۵ میلی‌متر متغیر است و بسته به قطر خارجی لوله تعیین می‌شود.

به دلیل سرعت‌های تولید بالای مورد نیاز، غلتک‌های کار با زاویه ۱۰ تا ۱۲ درجه نسبت به محور قطعه کار قرار دارند. امروزه به جای راهنماهای قبلی (Guide Shoes)، از دیسک‌های راهنمای محرک - موسوم به دیسک‌های دیشر (Diescher Discs) استفاده می‌شود تا تلفات اصطکاکی کاهش یافته و ظرفیت تولید افزایش یابد.

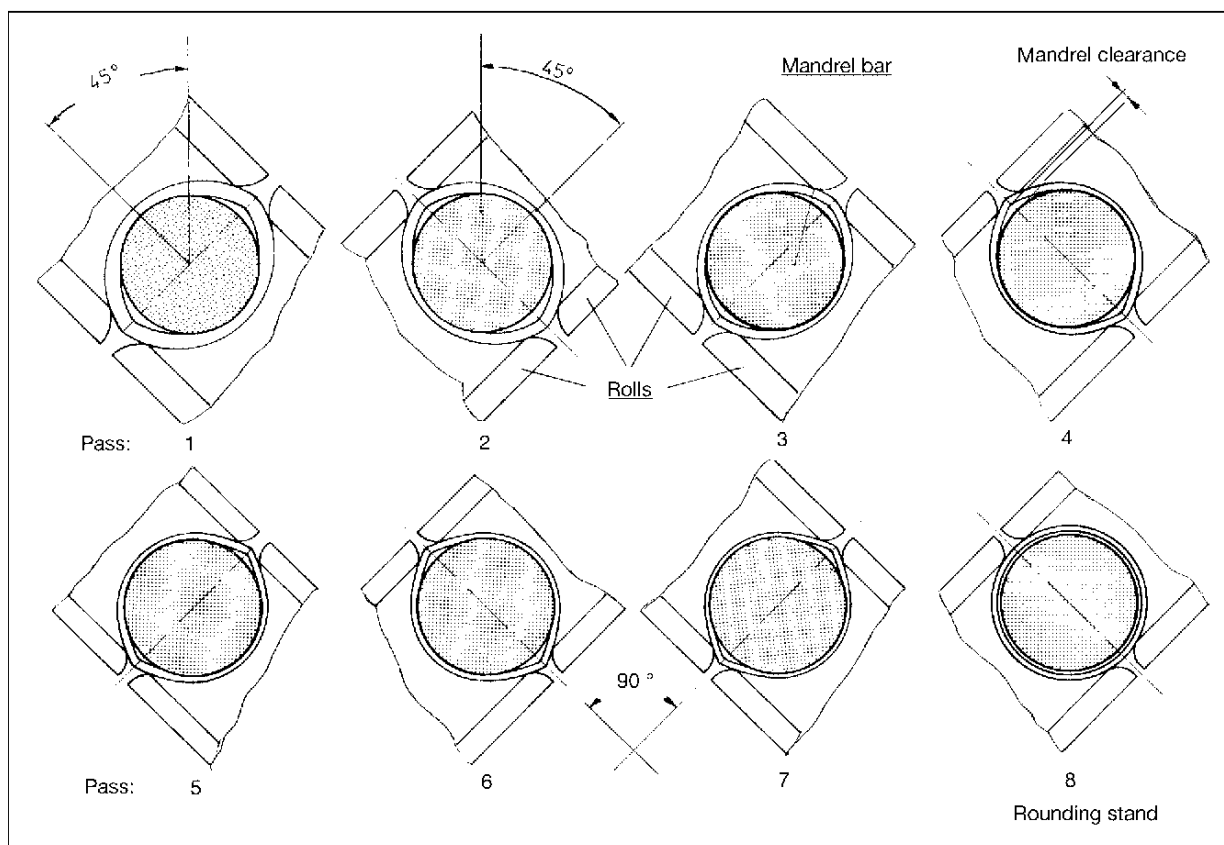
پوسته توخالی تولید شده در سوراخ‌کننده متقاطع (Cross Roll Piercer)، سپس در کارخانه نورد مداوم بر روی میله ماندلر و بدون گرمادهی مجدد نورد می‌شود تا لوله مداوم تولید شود. در این فرآیند، حداکثر طول دهی ۴۰۰٪ حاصل می‌گردد که معادل کاهش سطح مقطع ۷۵٪ است.

کارخانه‌های نورد مداوم با ماندلر داخلی از ۷ تا ۹ ایستگاه نورد متوالی و نزدیک به هم تشکیل شده‌اند که هر یک به میزان ۹۰ درجه نسبت به هم‌سایه خود جابه‌جا شده و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق قرار دارند (شکل ۱۶). هر ایستگاه دارای موتور محرک با سرعت متغیر خود است. سرعت‌های محیطی غلتک‌ها با یکدیگر مطابق با کاهش‌های سطح مقطع تنظیم می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که نیروهای کششی یا فشاری قابل توجهی بر قطعه کار بین ایستگاه‌ها وارد نشود. در ناحیه کناره‌های شکاف بیضوی شکل داده شده توسط غلتک‌های دوگانه (Two-high rolls)، فضای خالی مشخصی بین میله ماندلر و ماده لوله وجود دارد (شکل ۱۷). در پاس نورد آخر، این فضای خالی به‌طور یکنواخت در سراسر محیط توزیع می‌شود تا امکان جدا شدن لوله از میله ماندلر فراهم گردد.



شکل ۱۶: کارخانه نورد با ماندریل پیوسته (سمت خروجی) (عکس از کارخانه VALLOUREC & MANNESMANN)

۱-لوله ۲-تعویض کننده پایه نورد ۳-پایه نورد



شکل ۱۷: چینش غلتک‌ها و برنامه عبور فلز در کارخانه نورد با ماندریل پیوسته

پیش از آغاز عملیات نورد، میله ماندریل درون پیوسته توخالی قرار داده می‌شود؛ سپس، پس از آنکه به موقعیت مشخصی رسید، مجموعه پیوسته و ماندریل به داخل نورد پیوسته وارد می‌گردد. قطعه کار توسط غلتک‌ها گرفته شده و در حین عبور از قفسه‌ای به قفسه دیگر، با کاهش تدریجی قطر غلتک‌ها روی ماندریل کشیده و طولی می‌شود. با افزایش سرعت عبور قطعه از میان قفسه‌های نورد، سرعت حرکت ماندریل نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد.

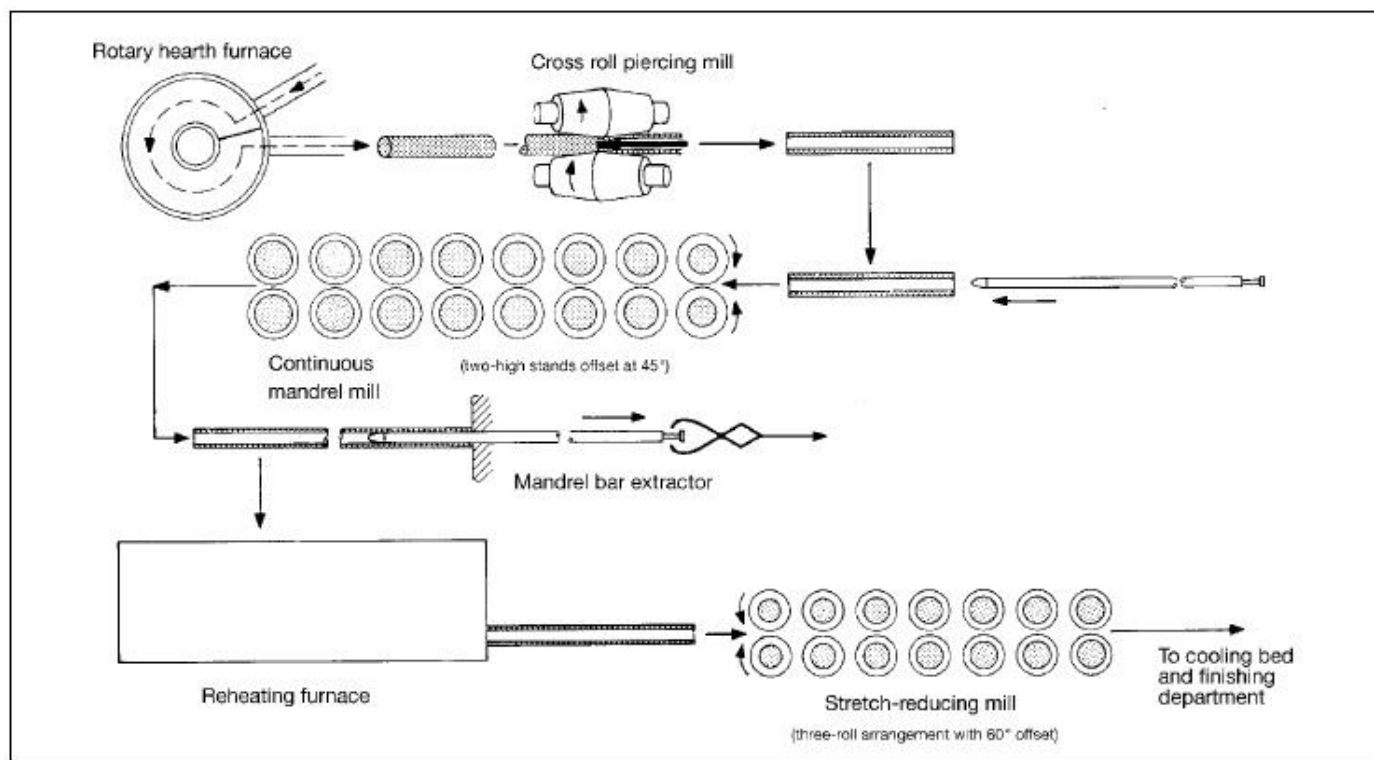
در نهایت، در نقطه‌ای مجاور خط نورد، میله ماندریل از درون لوله خارج شده، خنک می‌شود و برای عملیات نورد بعدی آماده می‌گردد. به طور معمول، بین ۸ تا ۱۰ میله ماندریل با اندازه یکسان به طور هم‌زمان در چرخه تولید در گردش هستند.

در نوردهای پیوسته از این نوع، می‌توان لوله‌هایی با طولی تا حدود ۳۰ متر تولید کرد که در این حالت، طول مورد نیاز میله ماندریل تقریباً ۲۵ متر است.

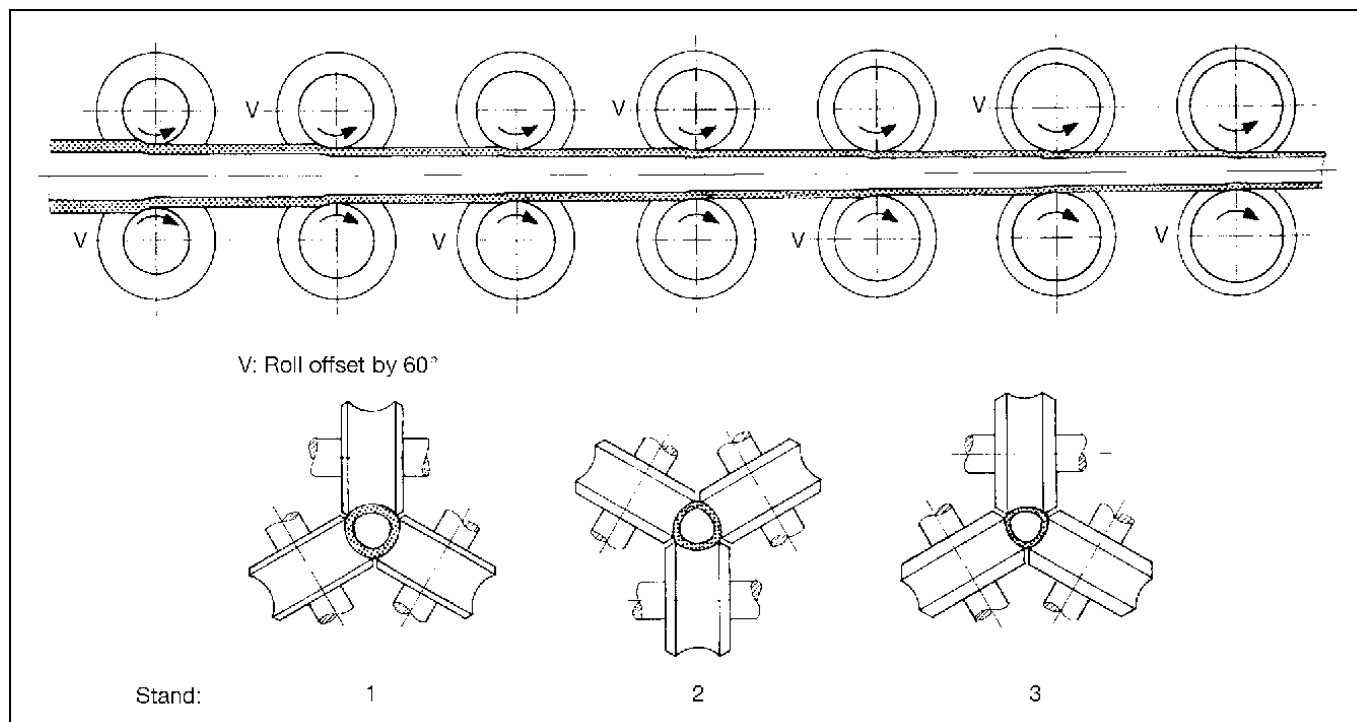
شکل ۱۸ ساختار و توالی فرآیند موجود در یک نورد ماندریل پیوسته را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، روش نورد در نوردهای از این نوع به استفاده از میله‌های ماندریل کنترل شده، یعنی محدود شده، به جای میله‌های ماندریل شناور آزاد بازگشته است. مزیت این نوع فرآیند در این است که به طور قابل توجهی میله‌های ماندریل کوتاه‌تر و کمتری نیاز است و لوله مستقیماً از روی ماندریل نورد می‌شود؛ به دلیل شرایط شکل‌دهی مطلوب، امکان تولید لوله‌هایی با قطر خارجی بزرگ‌تر (تا حداکثر ۴۰۶ میلی‌متر) و طول‌های لوله تا ۳۰ متر فراهم می‌شود.

این نسخه از فرآیند نورد ماندریل پیوسته همچنین به‌طور ساده «MPM» (نورد چندقفسه‌ای با ماندریل) نامیده می‌شود و به‌طور فزاینده‌ای در سراسر جهان به‌عنوان جایگزینی برای نوردهای بزرگ‌تر در سرمایه‌گذاری‌های جدید کارخانه‌ها محبوبیت پیدا کرده است.



شکل ۱۸: نمایش شماتیک یک کارخانه نورد با ماندریل پیوسته



شکل ۱۹: نمایش شماتیک فرآیند کاهش طول (Stretch-Reducing)

در طول این فرآیند نورد پیوسته و تا زمان خارج کردن میله ماندربل، دمای لوله به حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در نتیجه، لوله به کوره بازگرم‌کننده منتقل می‌شود و به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه در آن نگه داشته می‌شود تا دمای شکل‌پذیری آن به حدود ۹۵۰ تا ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد بازگردد. به‌طور معمول، از کوره‌های گامی (Walking Beam) با سوخت گاز طبیعی یا نفتی استفاده می‌شود تا توزیع دمای یکنواخت تضمین گردد.

پس از خروج از کوره بازگرم‌کننده، لوله تحت عملیات زدودن پوسته با آب پرفشار قرار می‌گیرد و در نورد کاهش‌دهنده طول پایین‌دست، بدون استفاده از ابزار داخلی، به ابعاد نهایی خود نورد می‌شود. بسته به ابعاد نهایی مورد نیاز، این فرآیند می‌تواند باعث افزایش طول لوله تا ده برابر طول اولیه آن شود.

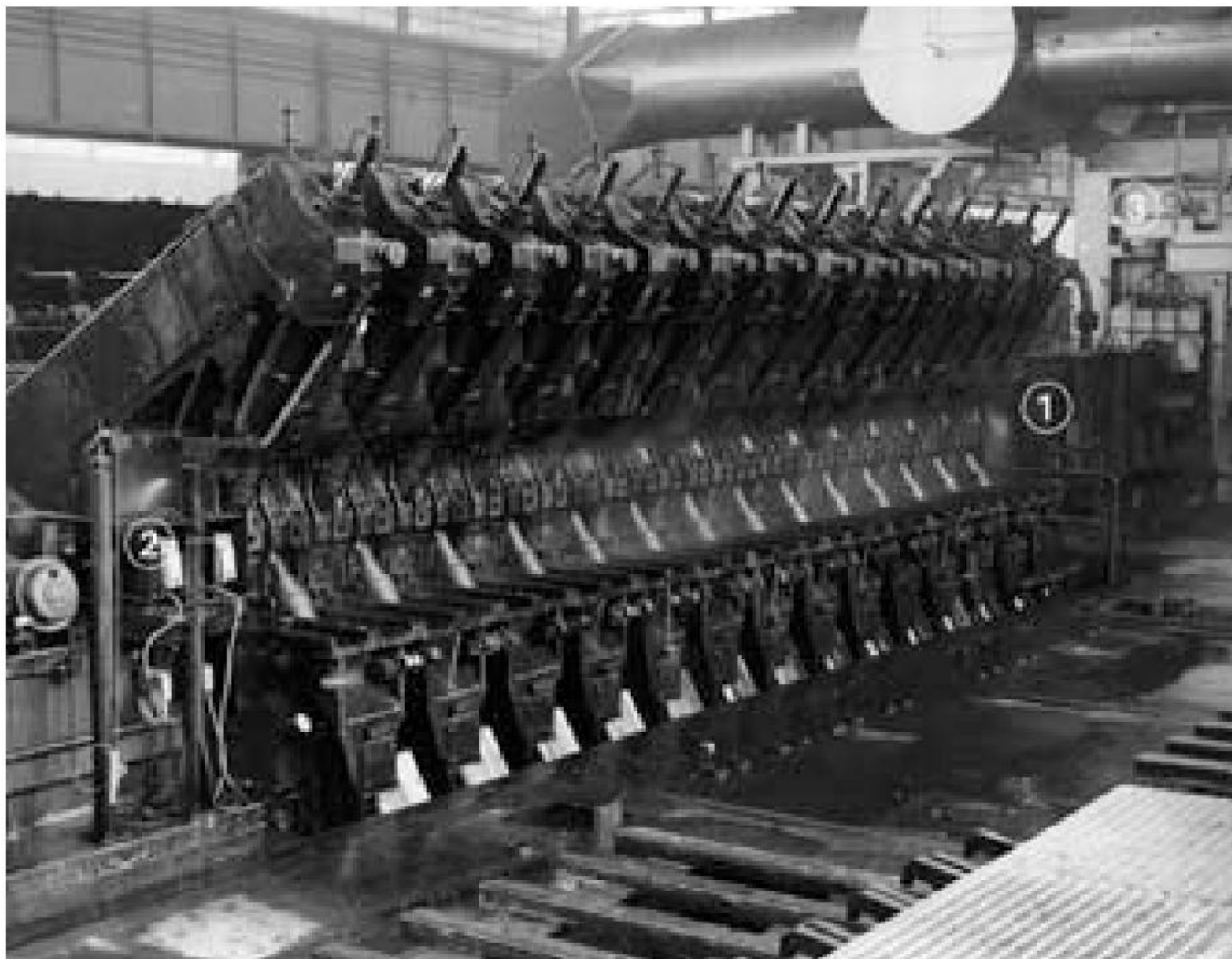
نوردهای کاهش‌دهنده طول می‌توانند شامل ۲۴ تا ۲۸ قفسه یا حتی بیشتر باشند که همگی به‌صورت نزدیک و خطی چیده شده‌اند. امروزه هر قفسه معمولاً دارای یک موتور با سرعت متغیر مستقل است و مجهز به سه غلتک با کوچک‌ترین قطر ممکن می‌باشد. این سه غلتک با هم یک مسیر نورد (Pass) را تشکیل می‌دهند که انتقال یافته و از قفسه‌ای به قفسه دیگر به‌تدریج کوچکتر می‌شود (شکل ۱۹).

با توجه به افزایش مستمر طول لوله و کاهش همزمان قطر خارجی و ضخامت دیواره آن، سرعت محیطی غلتک‌ها از ابتدای خط نورد تا انتهای آن به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد.

بسته به تعداد قفسه‌های نصب شده، می‌توان با چنین آرایشی، لوله‌های نهایی با قطرهای مختلف تولید کرد. با تغییر تنش طولی بین قفسه‌های جداگانه، نه تنها می‌توان قطر لوله را کاهش داد، بلکه می‌توان به سطح خاصی از کاهش ضخامت دیواره نیز دست یافت. این تنش طولی با افزایش نامتناسب سرعت محیطی غلتک‌ها از یک قفسه به قفسه بعدی ایجاد می‌شود، به مقداری که بیشتر از حد معمول مورد نیاز برای جبران کاهش سطح است. با تجهیز هر قفسه به موتور مستقل و استفاده از دامنه کنترل وسیع موتورهای مدرن امروزی، امکان تولید لوله‌های نهایی با ضخامت‌های دیواره مختلف از یک قطعه لوله ورودی واحد فراهم شده است. در محدوده اندازه‌های کوچکتر، می‌توان لوله‌هایی با طول تا ۱۵۰ متر تولید کرد، که سرعت خروجی آنها به حداکثر ۱۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

دستگاه‌های ویژه امکان می‌دهند تا نوردهای کاهش‌دهنده طول مدرن در عرض چند دقیقه قفسه خود را تعویض کنند و بدین ترتیب به قطر دیگری از لوله تبدیل شوند. به همین دلیل، تغییر اندازه زمان‌بر که در نوردهای ماندلر پیوسته مدرن لازم است، حذف می‌شود و تولید تنها به یک قطر قطعه لوله ورودی محدود می‌گردد. سپس نوردهای کاهش‌دهنده طول تمام تغییرات اندازه را انجام می‌دهد.

شکل ۲۰ یک نوردهای کاهش‌دهنده طول مدرن را نشان می‌دهد.

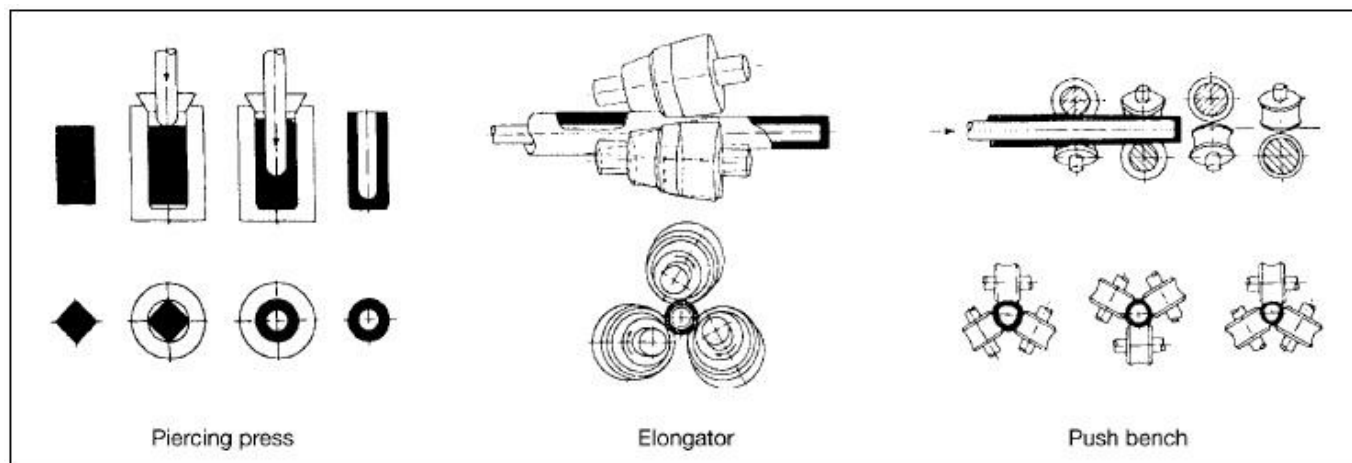


شکل ۲۰: کارخانه کاهش طول با ۲۸ پایه نوردهای (عکس از کارخانه VALLOUREC & MANNESMANN TUBES) :
۱- ورودی ۲- سمت خروجی ۳- کوره دوباره گرم‌کننده

۲.۴ فرآیند پرس (Push Bench)

این فرآیند همچنین به عنوان فرآیند فورج چرخشی شناخته می‌شود و در آلمان، به نام مخترع آن، به فرآیند ارهاردت (Ehrhardt) معروف است. این روش برای تولید لوله در محدوده قطر تقریباً ۵۰ تا ۱۷۰ میلی‌متر، با ضخامت دیواره ۳ تا ۱۸ میلی‌متر و طول تا ۱۸ متر به کار می‌رود. کارخانه‌های مدرن پرس معمولاً تنها یک اندازه بزرگ قطعه توخالی (Hollow Bloom) تولید می‌کنند و سپس یک نوردهای کاهش‌دهنده طول پایین‌دست آن را به تمام ابعاد معمول لوله تبدیل می‌کند، تا قطر خارجی کوچک‌ترین لوله تقریباً به ۲۰ میلی‌متر برسد.

مواد اولیه مورد استفاده می‌توانند قطعات مربع، هشت‌ضلعی یا گرد، چه نوردشده و چه از جنس ریخته‌گری پیوسته، باشند. پس از گرم شدن به دمای شکل‌دهی در کوره صفحه چرخان (Rotary Hearth Furnace)، این قطعات در قالب استوانه‌ای یک پرس سوراخ‌کاری قرار داده می‌شوند. سپس یک ماندریل سوراخ‌کاری آن‌ها را به یک پوسته توخالی با دیواره ضخیم و کف بسته شکل می‌دهد (شکل ۲۱). پوسته توخالی به یک دستگاه طول‌دهنده منتقل می‌شود که معمولاً دارای سه غلتک است و روی میله ماندریل تا حدود ۱/۸ برابر طول اولیه خود فورج می‌شود. این فرآیند کاهش همچنین باعث یکنواخت‌تر شدن ضخامت دیواره می‌شود. سپس قطعه توخالی روی میز پرس (Push Bench) بدون بازگرم شدن، با استفاده از میله ماندریل به طولی بین ۱۰ تا ۱۵ برابر طول ورودی خود کشیده می‌شود.



شکل ۲۱: عملیات‌های شکل‌دهی گنجانده شده در فرآیند Push Bench

در بستر پایه میز پرس (push bench) تا ۱۵ قفسه غلتکی چیده شده‌اند (شکل ۲۲). هر قفسه غلتکی معمولاً شامل سه (و گاهی چهار) غلتک شیار دار غیرمتحرک و توزیع شده به صورت محیطی است. مقاطع عرضی به تدریج کاهش‌یابنده مسیرهای غلتک، کاهش‌هایی ایجاد می‌کنند که در مسیرهای اصلی کار می‌تواند تا ۲۵٪ باشد. در این فرآیند، بین ۶ تا ۷ قفسه غلتکی هم‌زمان در هر لحظه فعال هستند. نیروی پرس به میله ماندریل توسط یک سیستم دنده شانه‌ای (rack-and-pinion) اعمال می‌شود و سرعت‌های عملیاتی می‌تواند تا ۶ متر بر ثانیه برسد.



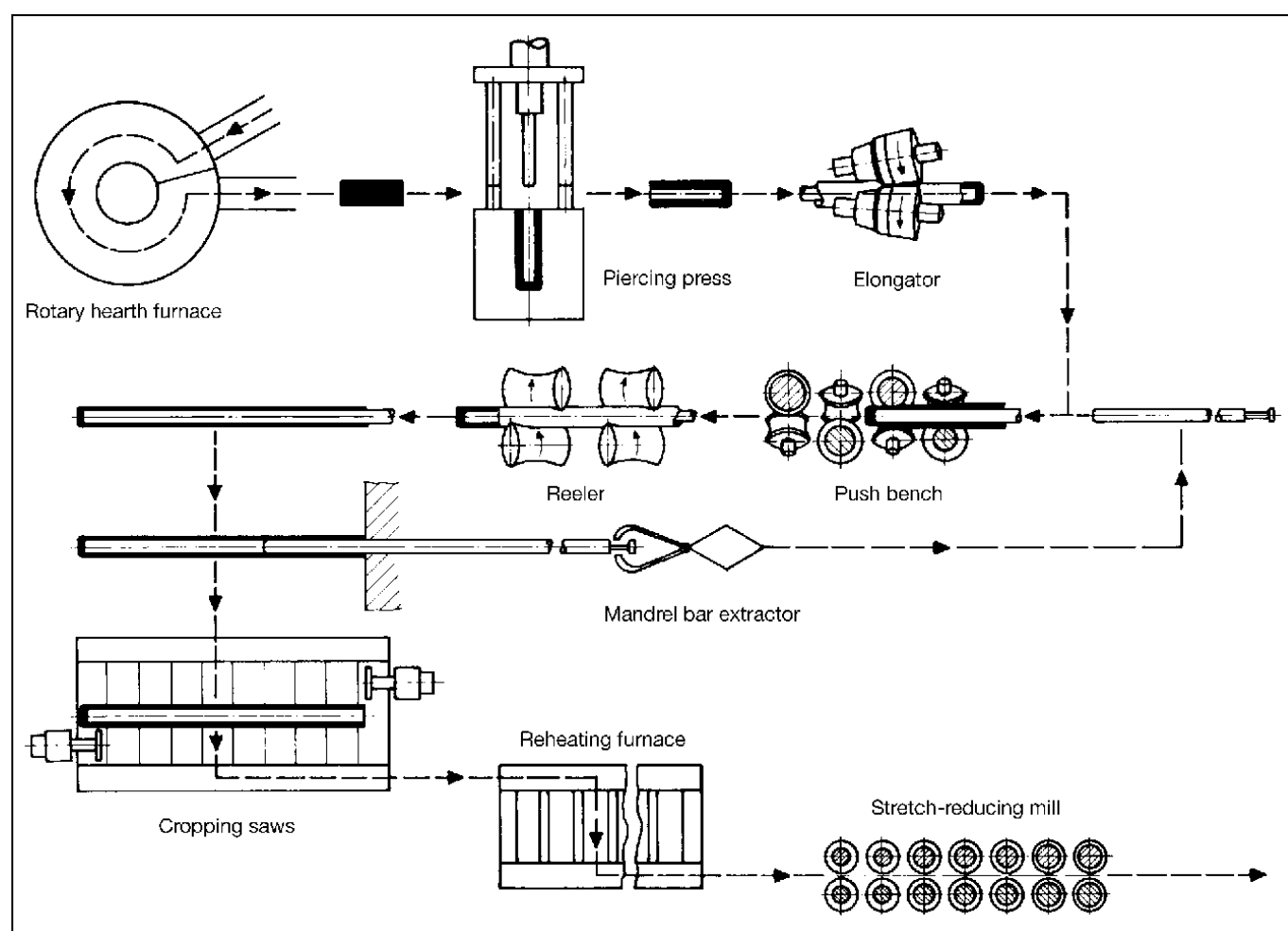
شکل ۲۲: دستگاه Push Bench با پایه‌های غلتک (عکس از کارخانه VALLOUREC & MANNESMANN TUBES)

۱- بستر Push Bench ۱- پایه‌های غلتک ۳- میله ماندریل ۴- تیوب

پس از این فرآیند طول‌دهی، لوله‌ای که روی میله ماندریل نورد شده وارد یک نورد جداکننده یا دستگاه جمع‌کننده (Reeler) می‌شود تا امکان خارج کردن میله ماندریل فراهم گردد. پس از خارج کردن میله ماندریل، کف بسته و همچنین انتهای باز لوله توسط یک اره داغ بریده می‌شوند. سپس در یک نورد کاهش‌دهنده طول پایین‌دست، لوله که مجدداً به دمای شکل‌دهی بازگرم شده است، به اندازه نهایی خود نورد می‌شود (به بخش مربوط به فرآیند نورد پیوسته ماندریل مراجعه شود).

شکل ۲۳ نمایش شماتیک یک کارخانه میز پرس (Push Bench) همراه با نورد کاهش‌دهنده طول را نشان می‌دهد.

یکی از مشتقات نوین فرآیند اهراردت، فرآیند CPE، سوراخ‌کاری طول‌دهی با غلتک‌های متقاطع (Cross-Roll Piercing - Elongation) است که در آن پرس سوراخ‌کاری و دستگاه طول‌دهنده با یک نورد سوراخ‌کاری چرخشی جایگزین می‌شوند. در این عملیات امکان بسته گذاشتن یک انتهای قطعه سوراخ‌کاری شده وجود ندارد، بنابراین یک انتها باید چین‌خورده (Crimped) شود. سپس سیلندر توخالی روی میز پرس طول داده می‌شود تا پوسته تولید گردد. بزرگ‌ترین سایزی که می‌توان تولید کرد، در حدود قطر خارجی تقریباً ۲۴۵ میلی‌متر است و همانند قبل، لوله نهایی توسط یک نورد کاهش‌دهنده طول پایین‌دست تولید می‌شود.



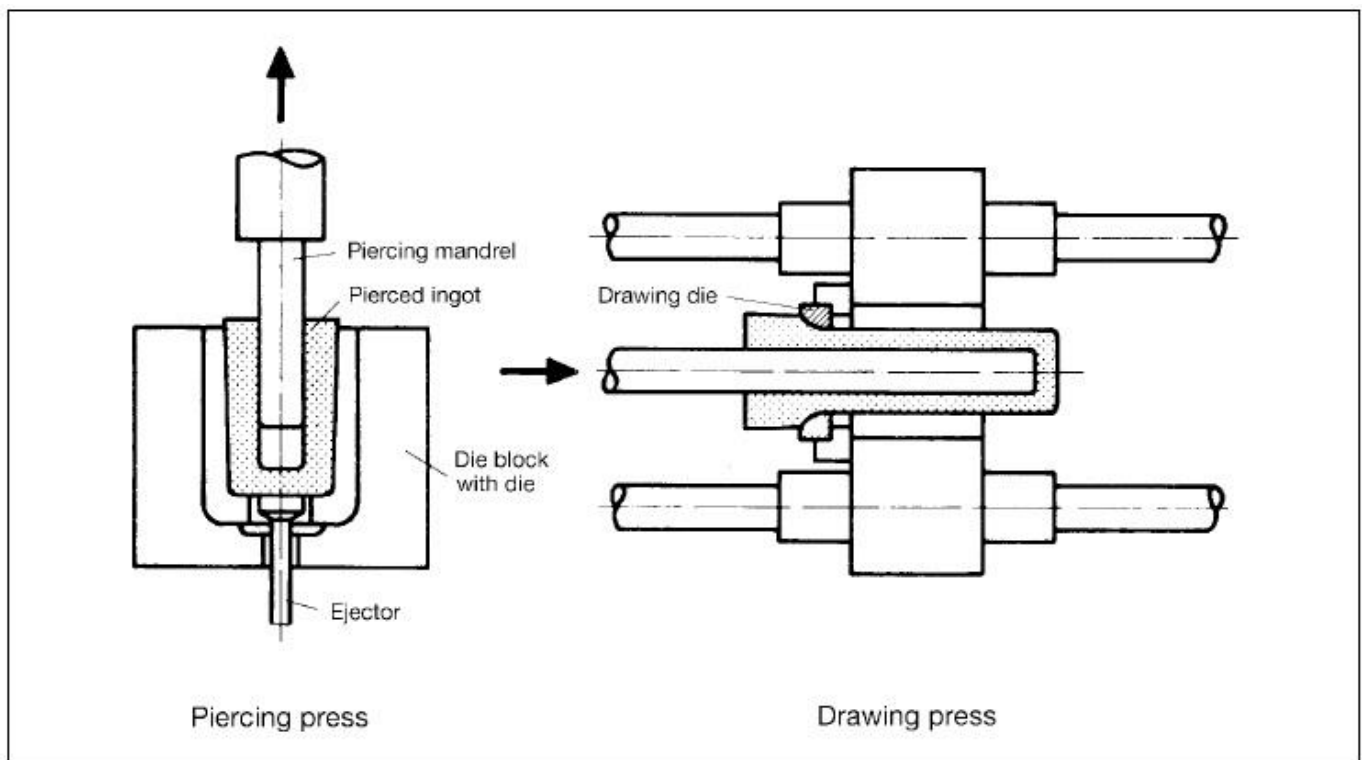
شکل ۲۳: نمایش شماتیک یک تأسیسات Push Bench

۲.۵ فرآیند سوراخ‌کاری و کشش (Pierce and Draw)

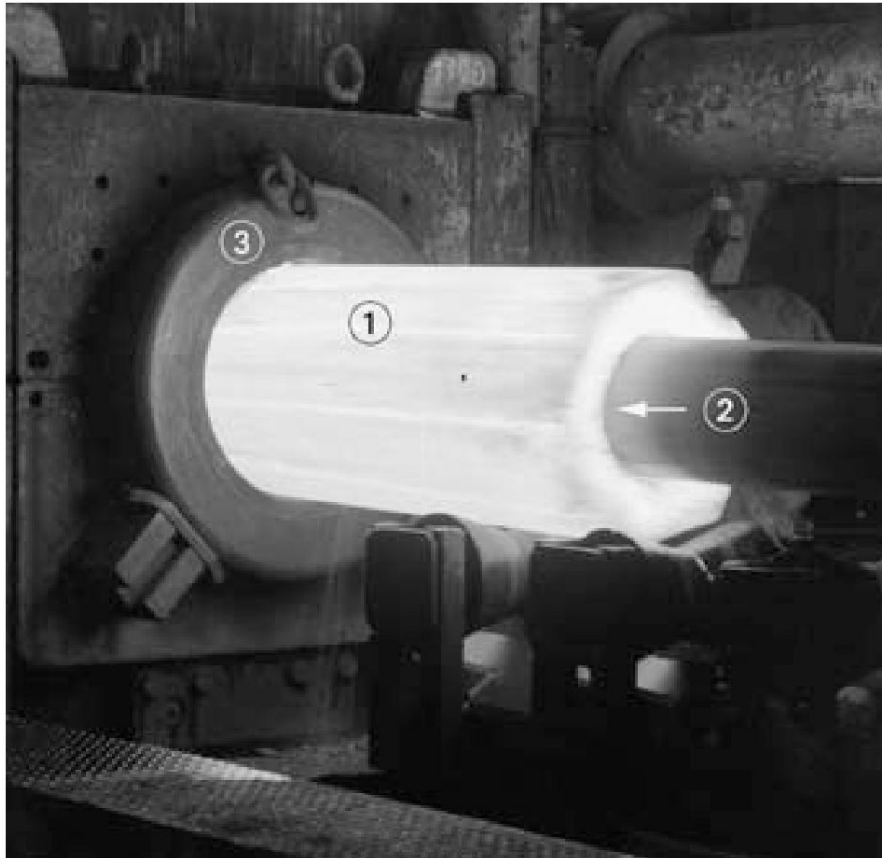
این فرآیند که توسط ه. ارهاردت نیز توسعه یافته، مشابه نسخه میز پرس (Push Bench) است، اما برخلاف تکنولوژی‌های توضیح داده شده تاکنون، برای تولید انبوه مناسب نیست. در نتیجه، تعداد کارخانه‌هایی که از این فرآیند استفاده می‌کنند بسیار کم است. با این حال، این کارخانه‌ها به‌طور ویژه برای تولید قطعات توخالی بدون درز طراحی شده‌اند که ترکیبی از قطرهای بزرگ و ضخامت‌های دیواره بالا را فراهم می‌کنند.

دامنه تولید چنین کارخانه‌هایی بین تقریباً ۲۰۰ تا ۱۴۵۰ میلی‌متر قطر خارجی و با ضخامت دیواره‌ای در حدود ۲۰ تا ۲۷۰ میلی‌متر قرار دارد. بنابراین، این فرآیند تکمیل مؤثری برای مجموعه محصولات موجود در نوردهای بزرگ پیلگر فراهم می‌کند. با طول حداکثر حدود ۱۰ متر، قطعات لوله‌ای و مقاطع توخالی می‌توانند با استفاده از این فرآیند در تمام گریدهای فولاد تولید شوند، برای محصولاتی مانند قطعات نیروگاهی، سیلندرهای هیدرولیک، سیلندرهای گاز پرفشار و مخازن تحت فشار، و همچنین محصولاتی مانند لوله‌های مربع شکل با دیواره ضخیم.

مواد اولیه معمولاً به شکل شمش‌های قالب‌ریزی شده چندضلعی با قطر ۵۰۰ تا ۱۴۰۰ میلی‌متر و وزن تا ۲۶ تن است. این شمش‌ها در یک حوضچه حرارتی (Soaking Pit) تا دمای شکل‌دهی گرم می‌شوند و سپس روی یک پرس هیدرولیکی عمودی سوراخ‌کاری به سیلندر با کف یکپارچه تبدیل می‌شوند (شکل ۲۴). سپس این سیلندر روی یک پرس هیدرولیکی افقی کشیده می‌شود تا به اندازه نهایی خود برسد، با استفاده از ماندریل که مطابق با قطر داخلی مورد نیاز قطعه توخالی است. همراه با ماندریل، پوسته توخالی به‌طور متوالی از مجموعه‌ای قالب‌های کشش با قطر کاهش‌یافته عبور داده می‌شود تا قطر خارجی مورد نیاز به دست آید (شکل ۲۵). بسته به نرخ خنک شدن قطعه کار و دامنه دمای مشخص برای فرآیند شکل‌دهی، می‌توان تا پنج عبور (Pass) را در یک مرحله حرارتی انجام داد. در صورت لزوم، ماده دوباره گرم می‌شود. پس از اتمام کار شکل‌دهی، قطعه نهایی توسط دستگاه جداکننده از ماندریل خارج می‌شود. بسته به کاربرد، کف یکپارچه ممکن است روی قطعه توخالی باقی بماند (مثلاً برای مخازن) یا پس از خنک شدن قطعه به دمای محیط بریده شود.



شکل ۲۴: فرآیند Pierce and Draw



شکل ۲۵: قرار دادن شمش سوراخ‌کاری‌شده در پرس کشش (عکس از کارخانه VALLOUREC & MANNESMANN TUBES)

۱- شمش سوراخ‌کاری‌شده ۲-ماندریل ۳- قالب کشش

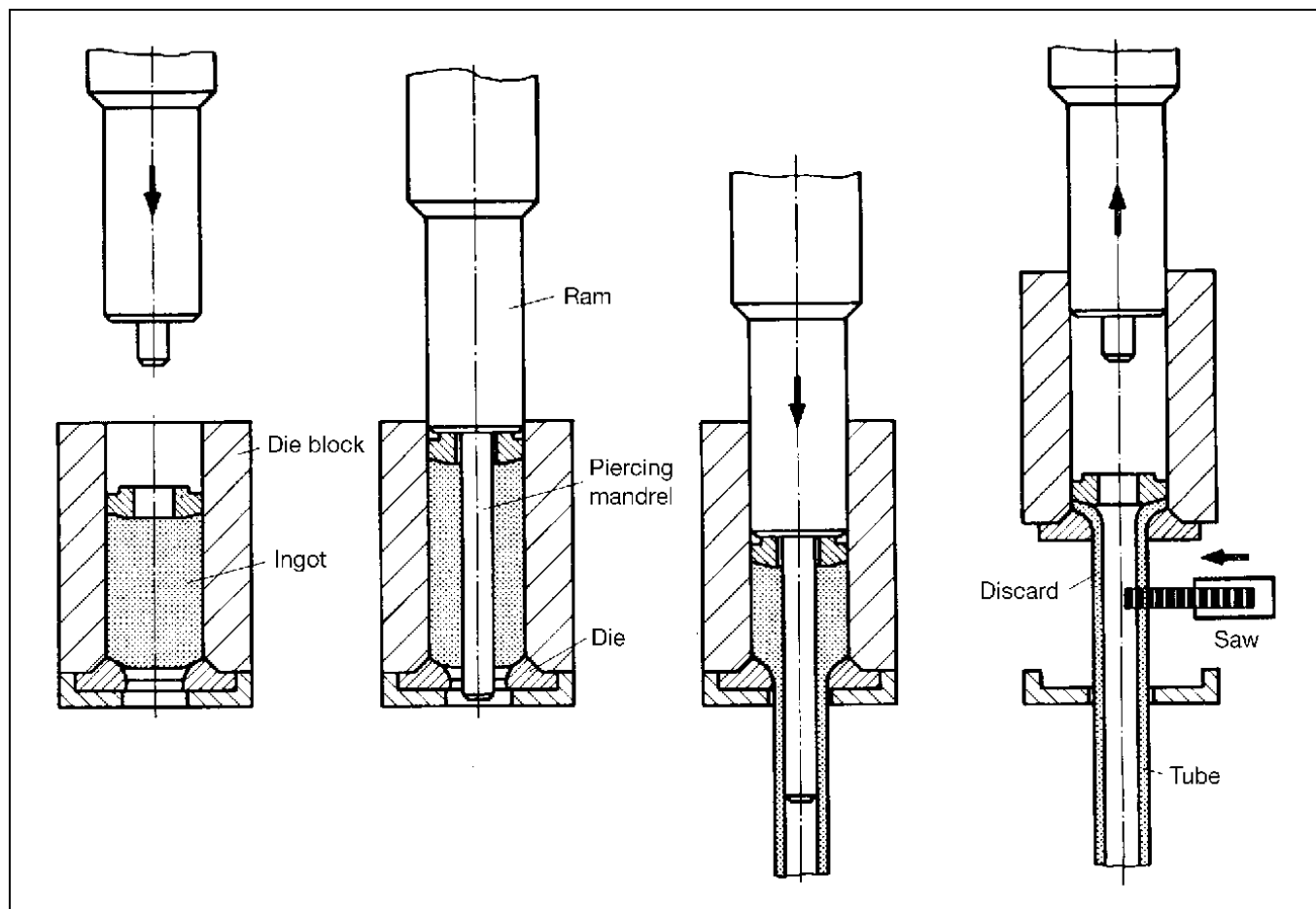
۲.۶ فرآیند اکستروژن لوله

این فرآیند برای تولید لوله‌هایی با قطر خارجی تا تقریباً ۲۳۰ میلی‌متر به کار می‌رود. ماده اولیه معمولاً به شکل شمش‌ها یا قطعات گرد فولادی است که می‌تواند نوردشده، فورج‌شده یا از جنس ریخته‌گری پیوسته باشد و قطر آن‌ها تا ۳۰۰ میلی‌متر می‌رسد.

پس از گرم شدن تا دمای شکل‌دهی، ماده اولیه در محفظه استوانه‌ای اکسترودر قرار داده می‌شود که در کف آن یک قالب با سوراخ گرد دارد. شمش ابتدا توسط یک ماندریل که توسط یک رام هیدرولیکی هدایت می‌شود، از مرکز سوراخ می‌گردد. با عبور ماندریل سوراخ‌کاری از قالب، یک فاصله حلقوی ایجاد می‌شود که از طریق آن ماده تحت فشار وارد شده توسط رام اکسترودر می‌شود تا لوله شکل گیرد (شکل ۲۶). ماده باقی‌مانده در اکسترودر پس از آن از لوله بریده شده و به عنوان ضایعات قابل بازیافت جدا می‌شود.

اکسترودرهای مکانیکی (نوع میل‌لنگ) با طراحی عمودی قادر به تولید لوله‌های فولادی از مواد مختلف، از جمله فولادهای با آلیاژ بالا، در محدوده قطر خارجی ۶۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر و با ضخامت دیواره ۳ تا ۱۵ میلی‌متر هستند. فرآیند اکستروژن اغلب با یک نورد کاهش‌دهنده طول دنبال می‌شود، که امکان گسترش محدوده تولید تا قطر خارجی تقریباً ۲۰ میلی‌متر در یک مرحله حرارتی را فراهم می‌کند. اکسترودرهای مکانیکی می‌توانند ابعاد شمش تا قطر تقریباً ۲۰۰ میلی‌متر و وزن ورودی حدود ۱۰۰ کیلوگرم را پردازش کنند و ظرفیت آن‌ها تا حداکثر ۱۵ مگانیوتن (MN) می‌رسد.

پرس‌های هیدرولیکی با طراحی افقی عمدتاً برای تولید لوله‌های فولادی با آلیاژ بالا تا قطر خارجی حدود ۲۳۰ میلی‌متر به کار می‌روند. در نتیجه، حداکثر ظرفیت اکسترودرها در محدوده تقریباً ۳۰ مگانیوتن (MN) قرار دارد.



شکل ۲۶: نمایش شماتیک فرآیند اکستروژن

پرس‌های هیدرولیکی با طراحی افقی عمدتاً برای تولید لوله‌های فولادی با آلیاژ بالا تا قطر خارجی حدود ۲۳۰ میلی‌متر به کار می‌روند. در نتیجه، حداکثر ظرفیت اکسترودرها در محدوده تقریباً ۳۰ مگانیوتن (MN) قرار دارد.

در تولید لوله‌های فولادی با آلیاژ بالا، معمولاً ماده اولیه ابتدا سوراخ‌کاری می‌شود، مجدداً گرم می‌گردد و سپس قطر داخلی آن تا اندازه مورد نیاز گسترش می‌یابد - معمولاً با استفاده از یک پرس بالادست. پس از تثبیت دما، این قطعه لوله به اکسترودر وارد می‌شود تا ابعاد نهایی لوله تولید گردد.

۲.۷ فرآیندهای نورد متقاطع (Cross Rolling Processes)

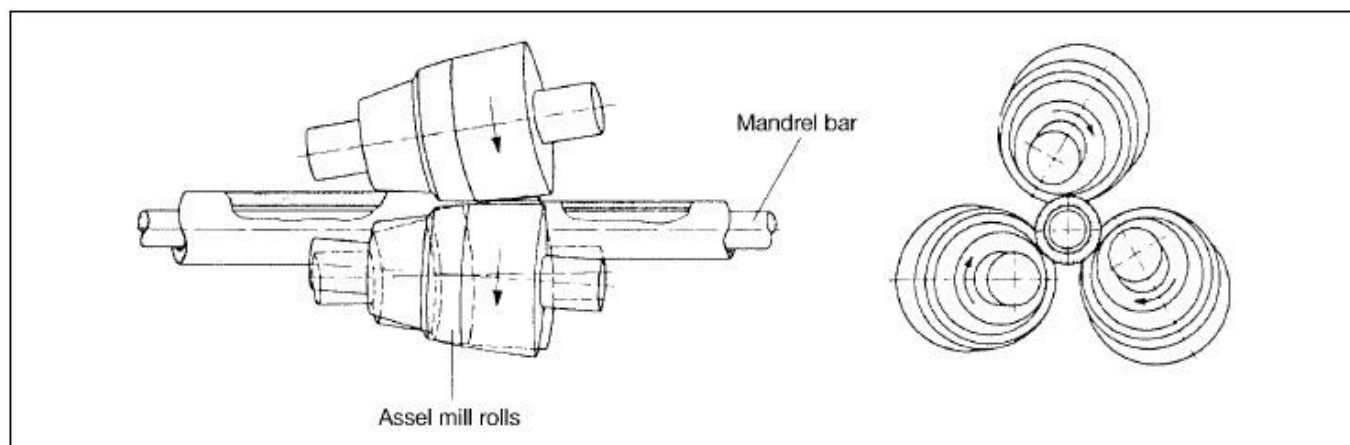
به‌عنوان توسعه‌ای از ایده اصلی که توسط برادران مانسمان مطرح شد، یعنی تولید لوله با استفاده از مفهوم نورد متقاطع، دو فرآیند دیگر در دهه ۱۹۳۰ معرفی شدند که به نام مخترعان خود، W.J. Assel و S.E. Diescher، شناخته شدند. هر دو سیستم از پرس سوراخ‌کاری استیفل (Stiefel) برای تولید پوسته توخالی از شمش گرد استفاده می‌کنند و یک عملیات نورد متقاطع اضافی اعمال می‌کنند تا ماده به ابعاد نهایی لوله نورد شود. با این حال، در حالی که فرآیند Assel به سرعت پذیرفته شد، روش Diescher تنها در چند کارخانه به کار گرفته شد.

۲.۷.۱ فرآیند نورد Assel

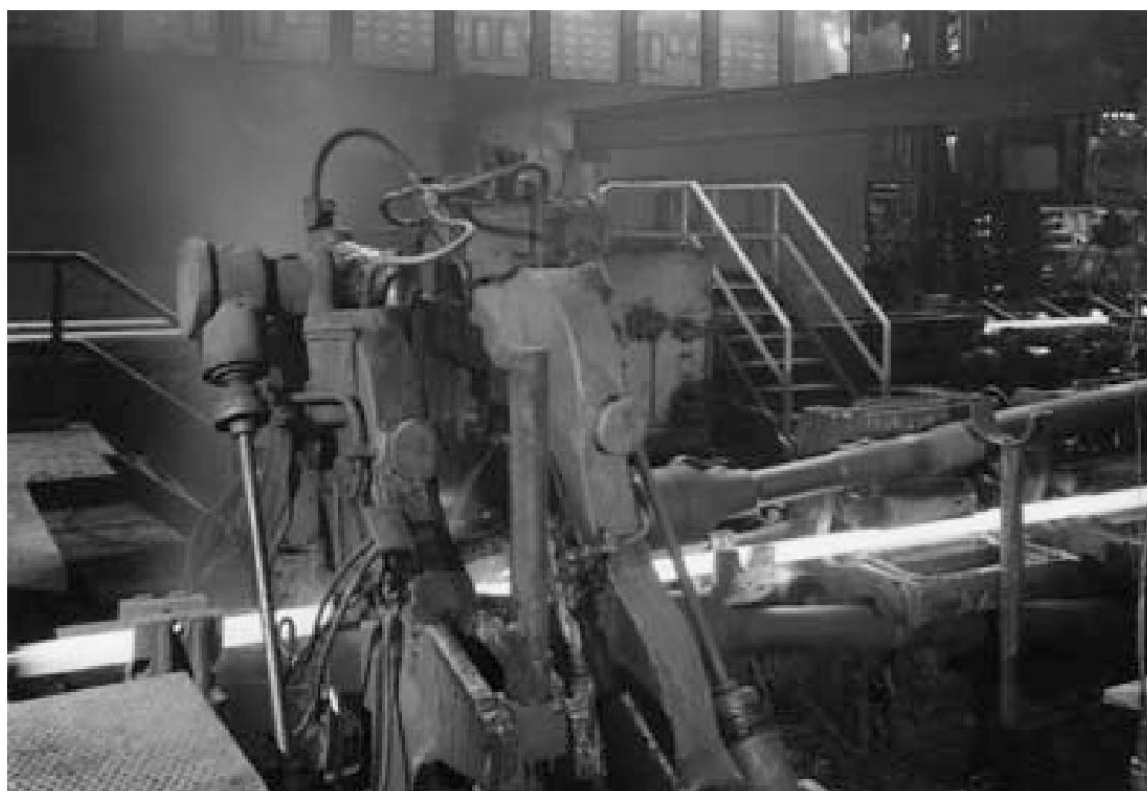
امروزه از نوردهای Assel برای تولید لوله‌های استنلس استیل با قطر خارجی ۶۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر و طول تا ۱۲ متر استفاده می‌شود. نسبت قطر خارجی به ضخامت دیواره معمولاً در محدوده ۴ تا ۱۵ قرار دارد. کوچک‌ترین قطر داخلی لوله‌ها تقریباً ۴۰ میلی‌متر است. لوله‌های تولیدشده

به این روش به دلیل هم‌مرکزی بسیار خوب خود شناخته می‌شوند و به‌طور گسترده در تولید قطعات تراش‌خورده (محورها، شفت‌ها) و همچنین برای تولید بلبرینگ‌های غلتکی از فولاد با آلیاژ متوسط (نام عمومی محصول: لوله مکانیکی) به کار می‌روند.

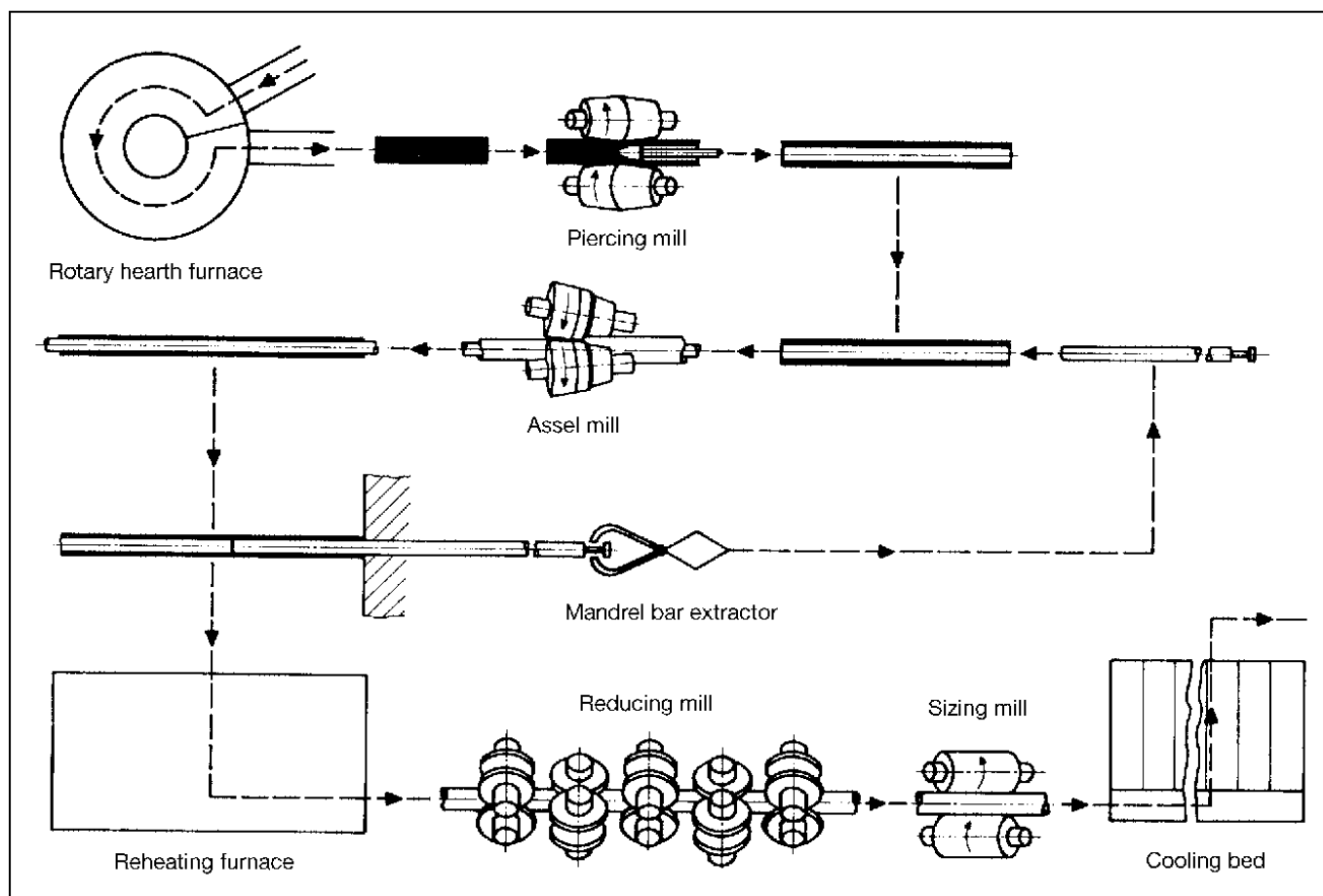
مواد اولیه عمدتاً به شکل شمش‌های گرد فولادی با طول مناسب است که در کوره صفحه چرخان (Rotary Hearth Furnace) تا دمای شکل‌دهی گرم می‌شوند. پس از زدودن پوسته سطحی و هم‌مرکزی کردن سطوح انتهایی، شمش در نورد سوراخ‌کاری متقاطع به یک پوسته توخالی شکل داده شده و سپس به نورد Assel منتقل می‌شود.



شکل ۲۷: نمایش شماتیک فرایند Assel



شکل ۲۸: کارخانه Assel (عکس از کارخانه Mannesmannröhren-Werke AG)



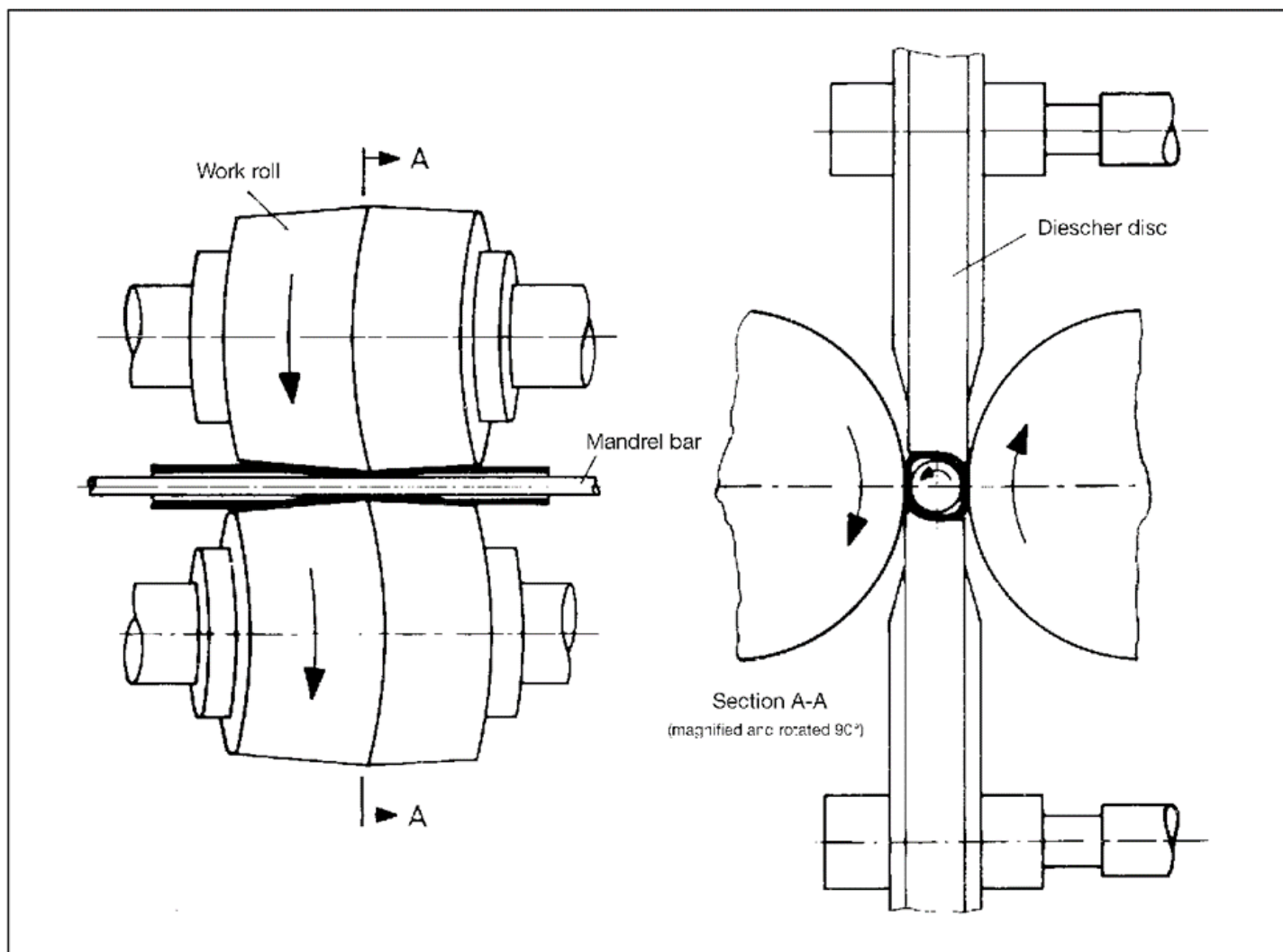
شکل ۲۹: نمایش شماتیک یک تأسیسات Assel

نورد Assel دارای سه غلتک مخروطی است که به‌طور متقارن و با فاصله ۱۲۰ درجه حول محور مرکزی نورد چیده شده‌اند. در این نورد متقاطع ثانویه، غلتک‌ها دوباره نسبت به صفحه قطعه کار مایل هستند (شکل‌های ۲۷ و ۲۸). ویژگی اصلی مسیر غلتک، به اصطلاح شانه یا «برآمدگی» (Hump) است که ارتفاع آن میزان کاهش ضخامت دیواره را تعیین می‌کند. مسیر آزادسازی (Release Pass) برای جدا کردن لوله از ماندریل و همچنین صیقل، گرد کردن و صاف کردن سطح خارجی لوله طراحی شده است. ابزار داخلی معمولاً یک میله ماندریل شناور است که در پایان عملیات نورد از لوله خارج می‌شود. یک نورد تعیین اندازه پایین‌دست (Rotary Sizer) یا نورد کاهش‌دهنده سپس برای تعیین اندازه نهایی لوله‌ها یا تولید ابعاد میانی به کار می‌رود (شکل ۲۹).

۲.۷.۲ فرآیند نورد Diescher

در فرآیند Diescher، پوسته توخالی تولیدشده در نورد سوراخ‌کاری متقاطع مجدداً در نورد Diescher روی یک میله ماندریل که به‌عنوان ابزار داخلی عمل می‌کند، طول داده می‌شود تا ابعاد نهایی لوله تولید گردد.

فاصله بین دو غلتک کاری بشکه‌ای شکل توسط به اصطلاح دیسک‌های Diescher بسته می‌شود، به‌جای کفش‌های راهنمای ثابت که معمولاً در نورد Stiefel (اتوماتیک) یافت می‌شوند. مسیری که توسط دیسک‌های Diescher ایجاد می‌شود، متناظر با مسیر غلتک تشکیل‌شده توسط غلتک‌های بشکه‌ای شکل است (شکل ۳۰). دیسک‌های Diescher با سرعتی بالاتر از سرعت خروجی قطعه لوله‌ای هدایت می‌شوند. این امر جریان مطلوب ماده را تسهیل کرده و تولید لوله‌های با دیواره نازک را آسان می‌کند. در نوردهای Diescher که هنوز در آمریکا، بریتانیا و چین فعال هستند، لوله‌ها در محدوده اندازه ۶۰ تا ۱۶۸ میلی‌متر قطر خارجی، با نسبت قطر خارجی به ضخامت دیواره بین ۴ تا ۳۰ و حداکثر طول لوله تقریباً ۱۲ متر تولید می‌شوند.



شکل ۳۰: نمایش شماتیک فرآیند کشیدن طولی انجام شده در کارخانه نورد Diescher

اگرچه نوردهای Diescher به عنوان تجهیزات طول دهی یا نورد نهایی، نفوذ گسترده ای در بازار نداشته اند، اما امروزه نوردهای سوراخ کاری متقاطع مدرن بیش از پیش با دیسک های Diescher تجهیز می شوند (به فرآیند پیوسته ماندزل و فرآیند نورد پلاگ MPM/ مراجعه کنید).

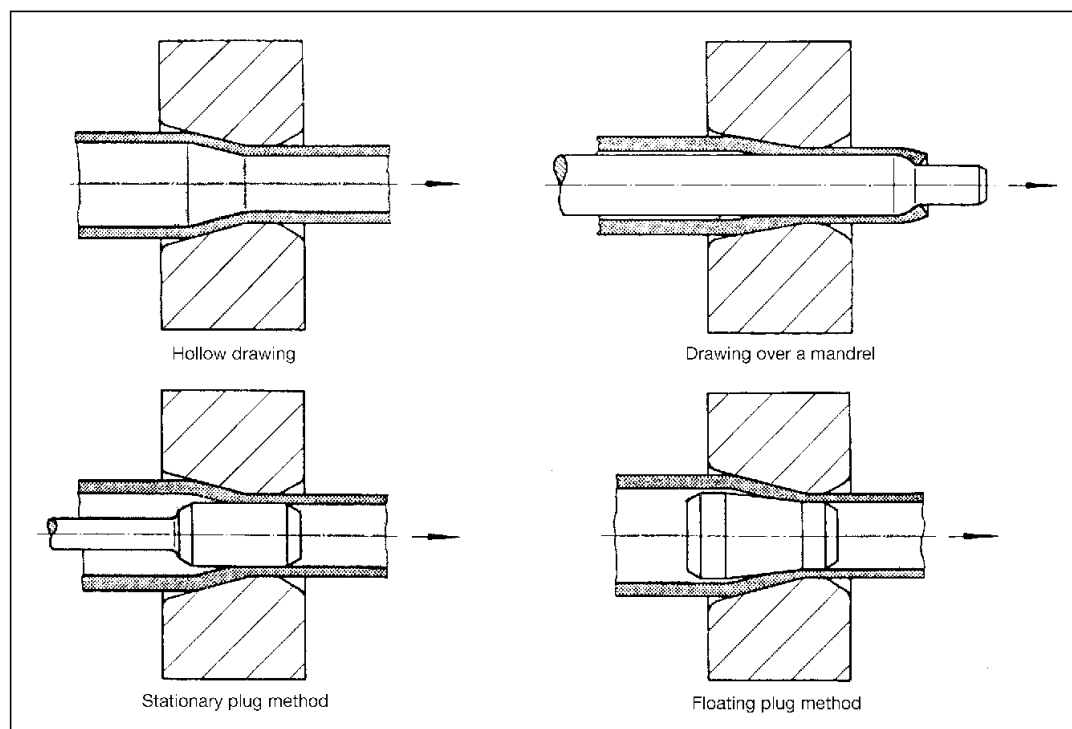
۳ شکل دهی سرد لوله های پایین دستی

بخش قابل توجهی از لوله ها و تیوب های بدون درز که با فرآیندهای فوق الذکر تولید می شوند، و همچنین لوله های با جوش طولی، تحت عملیات شکل دهی سرد بعدی قرار می گیرند (رجوع شود به نمودار ۲). هدف اصلی این فرآیندهای کار سرد، دستیابی به تolerانس های دقیق تر در ضخامت دیواره و قطر، بهبود سطح قطعه و خواص مکانیکی خاص در لوله است. شکل دهی سرد همچنین به گسترش ترکیب محصولات در سمت پایین مقیاس قطر خارجی (OD) و ضخامت دیواره کمک می کند. فرآیندهایی که در این زمینه بیشترین کاربرد را دارند، کشش سرد و پیلگر سرد هستند. فورجینگ سرد، شکل دهی جریان (flow forming)، نورد سرد و سایر فرآیندهایی که شامل عملیات ماشین کاری می شوند (مثل هونیگینگ) از نظر میزان تولید کمتر اهمیت دارند و معمولاً برای تولید لوله ها و تیوب های کاربرد ویژه (مثل سیلندر ها) به کار گرفته می شوند.

۳.۱ کشش سرد

لوله‌های فولادی بدون درز دقیق در استاندارد DIN 2391 برای محدوده قطر ۴ تا ۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۰.۵ تا ۱۰ میلی‌متر استاندارد شده‌اند. با این حال، اندازه‌های میانی غیر استاندارد و همچنین لوله‌هایی با قطر خارجی تا ۳۸۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره تا ۳۵ میلی‌متر نیز می‌توانند با کشش سرد تولید شوند.

سه فرآیند برای کشش سرد لوله به کار می‌روند: کشش توخالی، کشش با پلاگ ثابت یا شناور، و کشش روی ماندریل (که به آن کشش روی میله نیز گفته می‌شود) (شکل ۳۱).

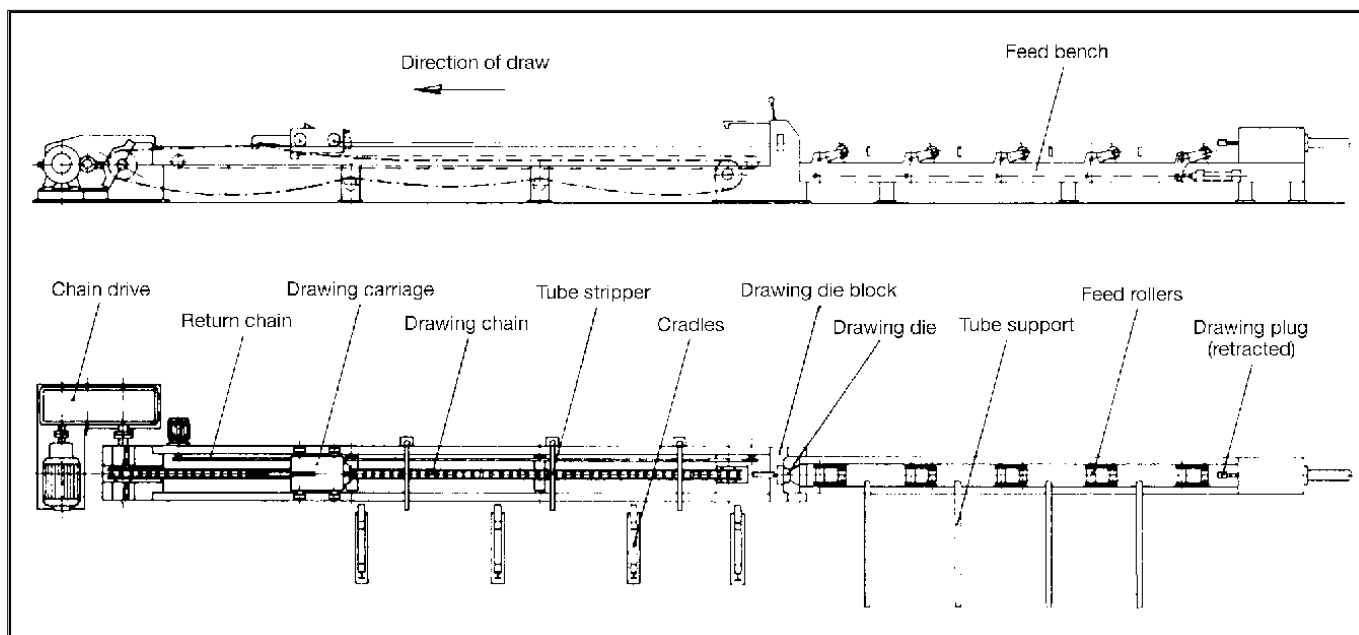


شکل ۳۱ - نمای شماتیک چهار فرآیند اصلی کشش لوله

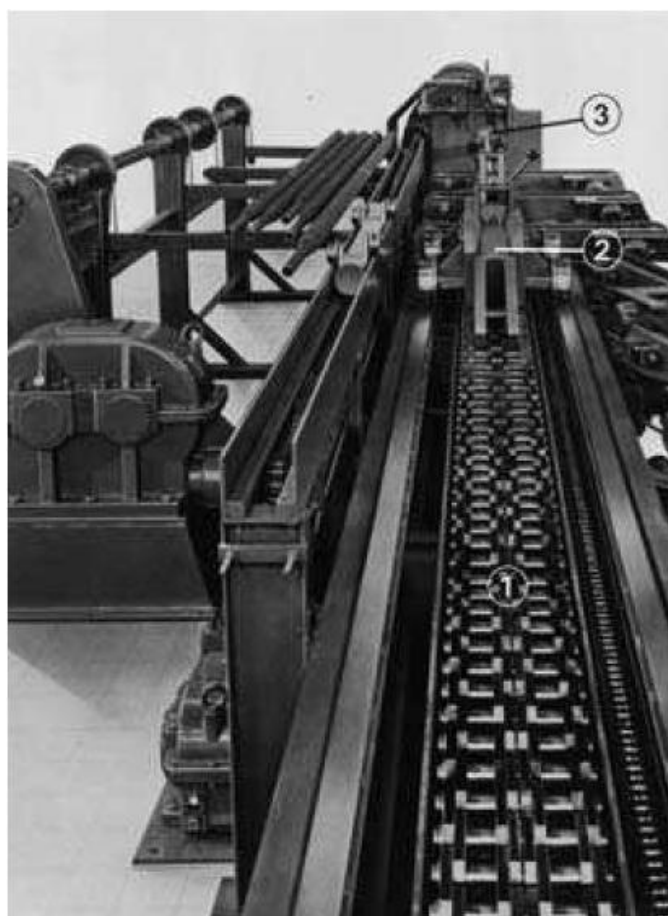
به دلیل نبود ابزار داخلی، در کشش توخالی تنها قطر خارجی لوله کاهش یافته و سطح خارجی آن در قالب صیقل داده می‌شود، در حالی که ضخامت دیواره تغییر چندانی نمی‌کند و نه از نظر مقدار مطلق و نه از نظر تفرانس‌های آن تغییر قابل توجهی رخ نمی‌دهد.

در کشش با پلاگ، پلاگی که یا به میله ماندریل متصل است یا به اصطلاح پلاگ شناور (که به دلیل شکل خاص خود و گذرگاه شکل‌دهی ایجاد شده، در ناحیه شکل‌دهی قرار می‌گیرد)، یک فاصله حلقوی با قالب بلوکی ایجاد می‌کند که لوله از آن عبور می‌کند. این فرآیند قطر داخلی و خارجی لوله را در محدوده تفرانس‌های دقیق کاهش می‌دهد و در نتیجه ضخامت دیواره را نیز کاهش داده و سطح داخلی و خارجی لوله را صاف و صیقل می‌کند. به طور کلی، پلاگ ثابت و ساکن برای کاهش سطح تا ۴۵٪ در هر مرحله کشش استفاده می‌شود. کشش با پلاگ شناور عمدتاً برای لوله‌های با قطر کوچک و طول‌های بلند به کار می‌رود و به ویژه زمانی که ماده اولیه از یک کلاف (کوئل) برداشته شده و پس از کشش دوباره روی Capstan پیچیده می‌شود، کاربرد دارد. در کشش روی ماندریل، لوله با کمک یک میله ماندریل وارد قالب می‌شود و قطر خارجی و داخلی و همچنین ضخامت دیواره کاهش می‌یابد. میزان کاهش سطح در هر مرحله کشش در این روش بیشتر از کشش با پلاگ است، اما طول لوله محدود به طول میله ماندریل می‌باشد. علاوه بر این، پس از کشش، لوله باید در یک نورد بازکننده کمی باز شود تا امکان بیرون آوردن ماندریل فراهم گردد. بنابراین، کشش روی ماندریل عمدتاً برای اندازه‌های استاندارد و به عنوان کشش اولیه (Preliminary)

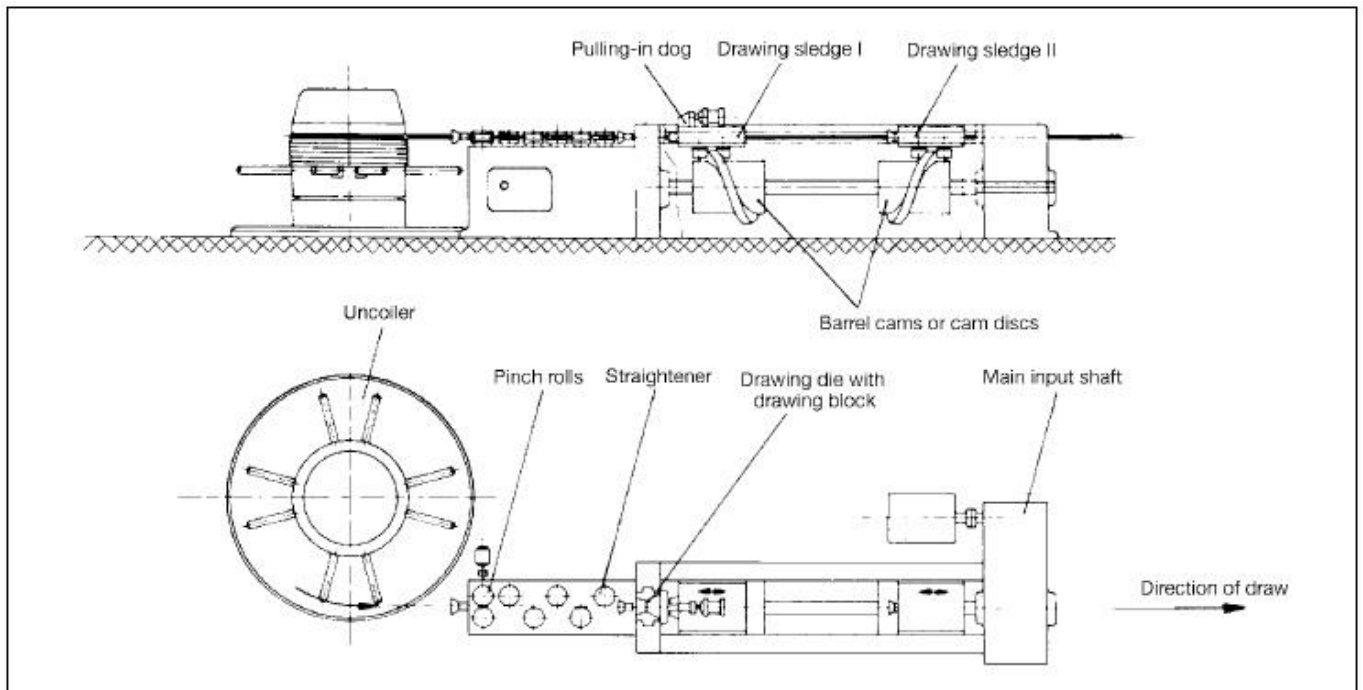
Draw) به کار می‌رود، جایی که ابعاد نهایی تنها در چند مرحله کشش متوالی با عملیات حرارتی میانی به دست می‌آیند. پیش از کشش سرد، پوسته اکسیدی که پس از فرآیند حرارت‌دهی یا آنیلینگ میانی روی لوله ایجاد شده، برداشته می‌شود و سطح با یک حامل روان‌کننده آماده می‌گردد؛ سپس کشش با افزودن روان‌کننده‌ها انجام می‌شود.



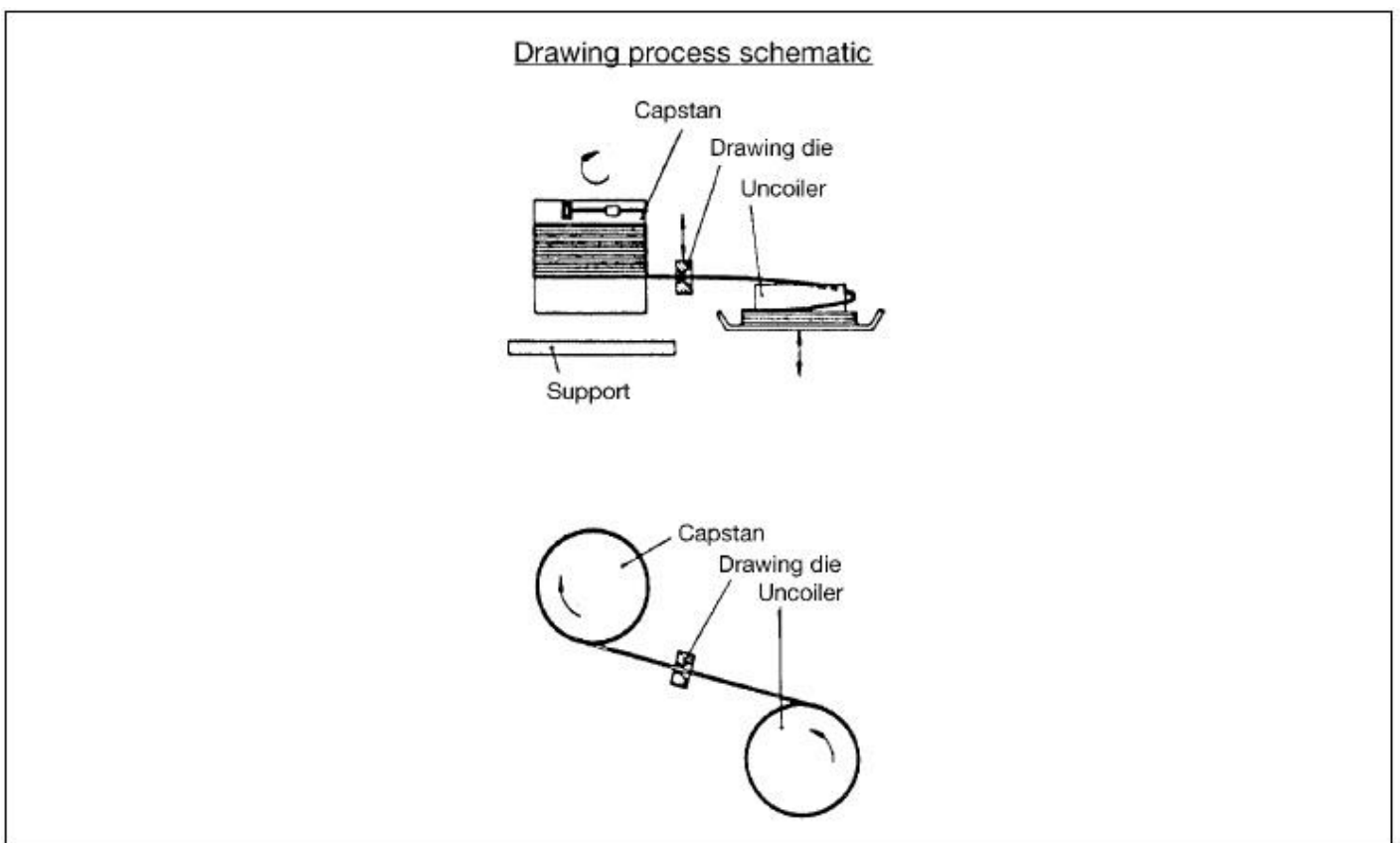
شکل ۳۲ - تخت کشش زنجیری با زنجیر پیوسته



شکل ۳۳ - میز کشش عکس از محل کار (Dahlhaus Iserlohn) ۱- زنجیر کشش ۲- واگن کشش یا ارباب کشش ۳. قالب کشش



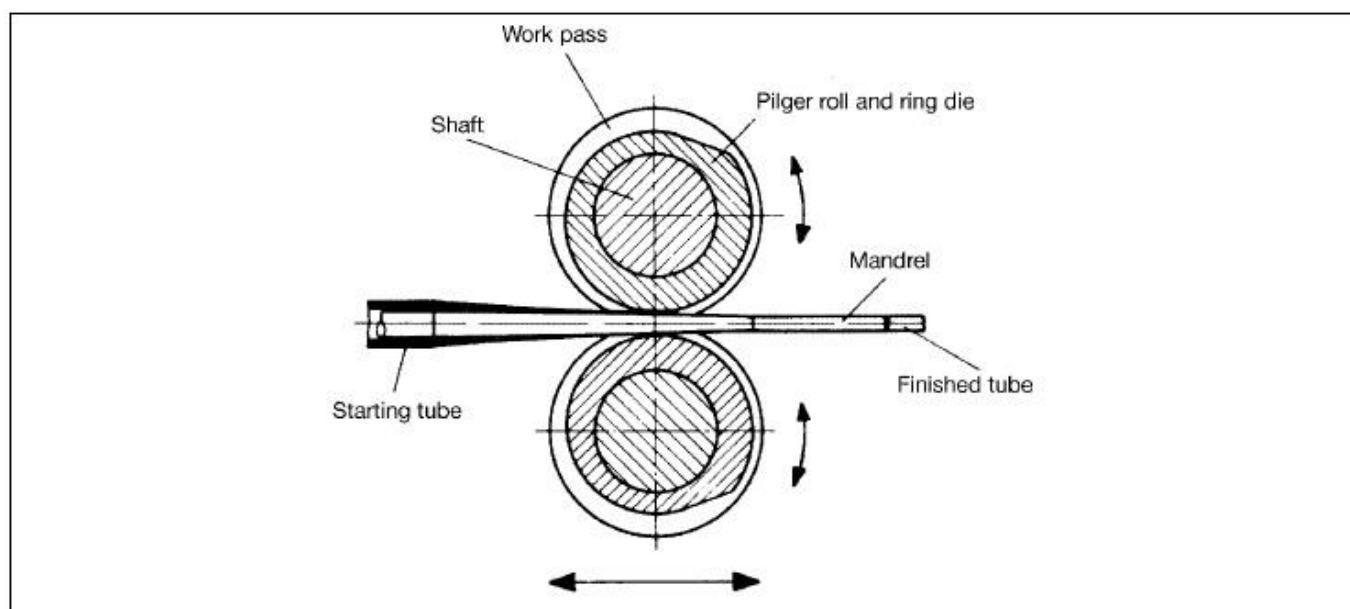
شکل ۳۴ - دستگاه کشش پیوسته خطی



شکل ۳۵ - فرآیند کشش با بلوک Bull (Bull Block Drawing Process)

فرآیند شکل‌دهی سرد باعث ایجاد سخت‌شدن ناشی از کرنش (Strain Hardening) در ماده می‌شود، یعنی مقدار تنش تسلیم و استحکام کششی ماده افزایش می‌یابد در حالی که مقادیر طول کشیدگی و مقاومت به ضربه کاهش می‌یابند. این ویژگی برای بسیاری از کاربردها مطلوب است. با این حال، به دلیل کاهش شکل‌پذیری همراه، پیش از هر عملیات شکل‌دهی بعدی باید عملیات حرارتی انجام شود. کشیدن لوله روی ماندریل یا پلاگ ثابت به‌عنوان ابزار داخلی نیازمند ماشین‌آلاتی است که برای حرکت خطی محدود (Finite Motion) پیکربندی شده‌اند. این ماشین‌ها عمدتاً به شکل میزهای کشش (Draw Benches) با زنجیر پیوسته هستند که در آن واگن کشش (Drawing Carriage) برای گرفتن ماده اولیه قرار می‌گیرد (شکل‌های ۳۲ و ۳۳)؛ یا میزهای کشش با زنجیرهای قابل برگشت و محدود که به واگن کشش متصل‌اند. طراحی‌های دیگر شامل میزهای کشش با طناب (Rope-Type)، میزهای کشش دنده و شانه (Rack and Pinion) و همچنین میزهای کشش با سیستم هیدرولیکی هستند.

لوله‌های بلند معمولاً با استفاده از پلاگ شناور روی ماشین‌های خطی پیوسته (Continuous-Type Straight-Line Machines) کشیده می‌شوند، که در آن دو واگن رفت‌وبرگشتی به‌صورت متناوب عملیات کشش را انجام می‌دهند (شکل ۳۴). لوله‌های با قطر کوچک معمولاً با فرآیند بول بلاک (bull block process) کشیده می‌شوند، در این روش ماده اولیه از کویل برداشته شده و نیروی کشش توسط Capstan اعمال می‌شود (شکل ۳۵).



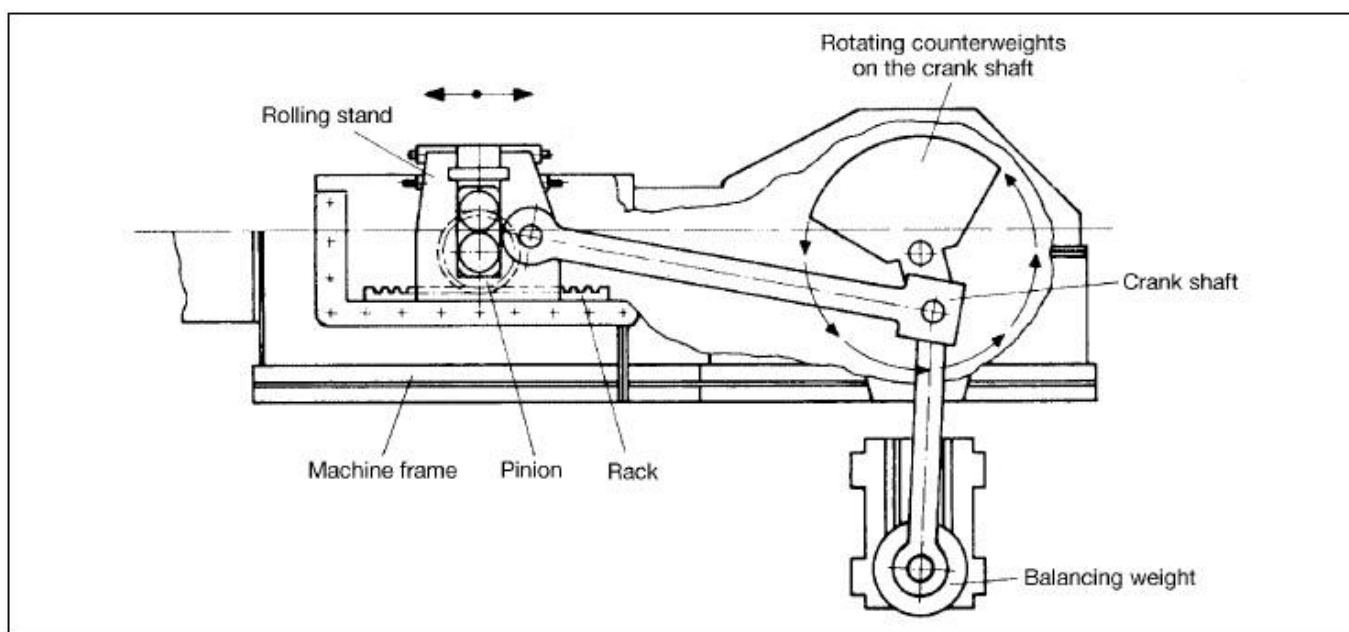
شکل ۳۶ - پیلگر سرد (شماتیک)

۳.۲ نورد پیلگر سرد

فرآیند پیلگر سرد برای کار روی نیمه‌سازه‌های توخالی گرم‌شده در تولید لوله‌هایی با قطر خارجی ۸ تا ۲۳۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۰٫۵ تا ۲۵ میلی‌متر به کار می‌رود. میزان کاهش سطحی که در این فرآیند به دست می‌آید چند برابر آن چیزی است که در کشش سرد امکان‌پذیر است. به دلیل کاهش همزمان و شدید قطر و ضخامت دیواره در فرآیند نورد-فورجینگ، ناهم‌محوری‌ها و اختلاف‌های ضخامت دیواره در نیمه‌سازه ورودی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابند. لوله‌های تولیدشده با پیلگر سرد محصولی هستند که دارای تغییرات ابعادی بسیار کم و کیفیت سطح بسیار بالا می‌باشند.

به دلیل الگوی تنشی مطلوبی که به ماده اولیه در ناحیه شکل دهی اعمال می‌شود، فرآیند پیلگر سرد همچنین گزینه‌ای ترجیحی برای تولید لوله و تیوب از مواد غیرشکل پذیر است.

فرآیند پیلگر سرد به این ویژگی شناخته می‌شود که نیمه‌سازه توخالی روی یک ماندریل ثابت و مخروطی توسط دو غلتک با قالب‌های حلقوی که طراحی گذرگاه آن‌ها مطابق است، فورج و کشیده می‌شود و این غلتک‌ها به صورت رفت و برگشتی روی ماده حرکت می‌کنند (شکل ۳۶). این حرکت نوردی توسط یک مکانیزم دنده و شانه (Rack and Pinion) ایجاد می‌شود که پینیون‌ها به طور ثابت به غلتک‌های پیلگر متصل‌اند و باعث چرخش آن‌ها هنگام حرکت رفت و برگشتی ایستگاه نورد می‌شوند. حرکت ایستگاه نورد و در نتیجه حرکت طولی و چرخش غلتک‌ها توسط یک مکانیزم میل‌لنگ (Crank Drive) تأمین می‌شود (شکل ۳۷).



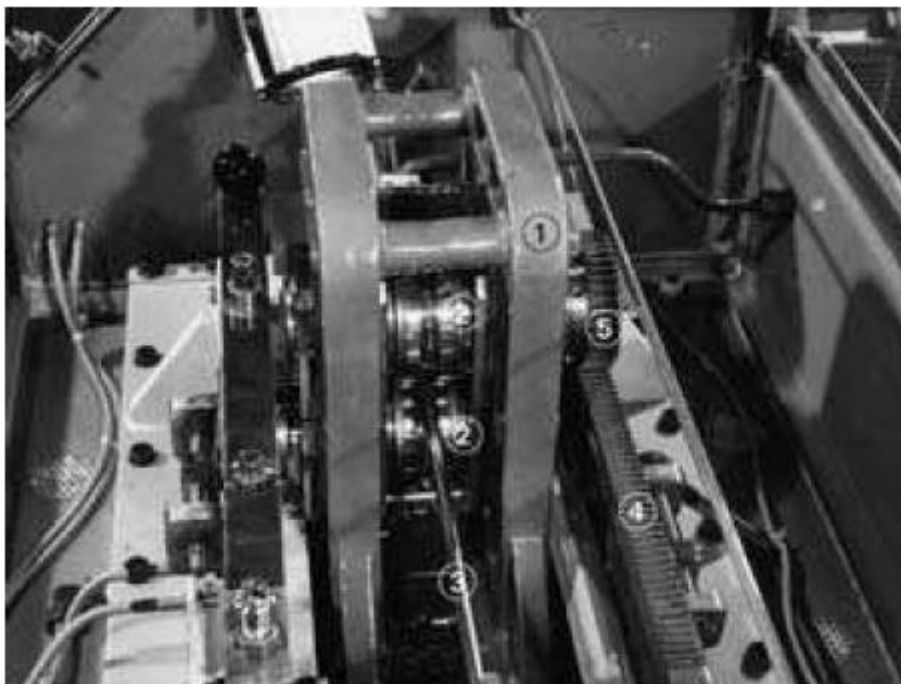
شکل ۳۷ - دستگاه پیلگر سرد (نقشه شماتیک سیستم محرکه)

طراحی گذرگاه دو غلتک شامل یک فرو رفتگی دایره‌ای است که با مقطع نیمه‌سازه توخالی مطابقت دارد و در بخشی از محیط غلتک مخروطی می‌شود تا انتقالی ایده‌آل و پیوسته به قطر نهایی لوله فراهم کند. بنابراین، هنگامی که غلتک‌ها به جلو و عقب حرکت می‌کنند، نیمه‌سازه توخالی به شکل دلخواه شکل می‌گیرد. یکی از جنبه‌های اساسی این فرآیند این است که کشش نیمه‌سازه برای تولید لوله نهایی با کاهش همزمان قطر و ضخامت دیواره انجام می‌شود. این امر توسط شکل ماندریل که از قطر داخلی نیمه‌سازه به قطر داخلی لوله نهایی مخروطی می‌شود، تسهیل می‌گردد. پس از یک چرخه نورد رفت و برگشت، غلتک‌ها نیمه‌سازه را رها می‌کنند و سپس با یک مقدار تغذیه متغیر به جلو حرکت می‌دهد. حجم متناظر ماده سپس با چرخه نورد رفت و برگشت بعدی که توسط ایستگاه اجرا می‌شود، کشیده می‌شود.

هنگامی که نیمه‌سازه توخالی به جلو حرکت می‌کند، به طور همزمان به زاویه‌ای مشخص چرخانده می‌شود تا هنگام فورج شدن ماده به ابعاد نهایی لوله، مقطع آن کاملاً دایره‌ای شود.

طول گذرگاه، طول نیمه‌سازه توخالی را که در هر حرکت رو به جلوی ایستگاه نورد می‌شود، تعیین می‌کند. بخش غلتک که شامل گذرگاه است می‌تواند به شکل قالب نیمه‌گرد یا قالب حلقوی باشد. قالب نیمه‌گرد با طراحی تقریباً نیمه‌استوانه‌ای و گذرگاه کوتاه خود (طول قوس تا ۱۸۰ درجه) ویژگی مشخص نوردهای با حرکت کوتاه است. با این حال، امروزه نوردهای با حرکت بلند غالب شده‌اند و این نوردها با قالب‌های حلقوی خود گذرگاه‌های کاری طولانی‌تر (طول قوس تا ۳۰۰ درجه) ارائه می‌دهند و در عین حال با سرعت‌های چرخش بالا عمل می‌کنند. در

نتیجه، آن‌ها به سطوح بالاتری از بهره‌وری، نتایج تغییر شکل مطلوب‌تر، کیفیت سطح بهبود یافته و دقت ابعادی بالاتر در لوله نهایی دست می‌یابند.



شکل ۳۸ - تولید لوله با دستگاه پیلگر سرد عکس از کارخانه (Mannesmannröhren-Werke AG)
۱- ایستگاه نورد ۲- غلتک های پیلگر ۳- لوله ۴- قفسه (Rack) ۵- چرخ‌دنده پینیون (Pinion)

۴ لوله و تیوب جوشکاری شده

از زمانی که تولید نوار و ورق فلزی امکان‌پذیر شد، انسان‌ها همواره تلاش کرده‌اند این مواد را خم کرده و لبه‌های آن را به یکدیگر متصل کنند تا لوله و تیوب بسازند.

این موضوع به توسعه قدیمی‌ترین فرآیند جوشکاری، یعنی جوش آهنگری (Forge-Welding) انجامید که قدمتی بیش از ۱۵۰ سال دارد. در سال ۱۸۲۵، تاجری انگلیسی در زمینه مصنوعات آهنی به نام جیمز وایت‌هاوس (James Whitehouse)، موفق به دریافت حق امتیاز (پتنت) برای تولید لوله‌های جوشی شد.

این فرآیند شامل آهنگری ورق‌های فلزی مجزا بر روی یک ماندریل برای تولید لوله‌ای با درز باز بود. سپس لبه‌های مقابل هم درز باز گرم می‌شدند و در نهایت با اعمال فشار مکانیکی در یک دستگاه کشش (Draw Bench) به یکدیگر جوش داده می‌شدند.

این فناوری به تدریج پیشرفت کرد تا جایی که نوار فلزی می‌توانست در یک مرحله، هم شکل داده شود و هم در کوره جوشکاری به هم متصل گردد. توسعه این مفهوم جوش سر به سر (Butt-welding) سرانجام در سال ۱۹۳۱ به ابداع فرآیند Fretz-Moon انجامید که توسط جی. مون (J. Moon)، مهندسی آمریکایی، و همکار آلمانی او فرتز (Fretz) طراحی شد.

خطوط جوشکاری که از این فرآیند استفاده می‌کنند، هنوز هم تا امروز با موفقیت در حال کار هستند و برای تولید لوله‌هایی با قطر خارجی حدود ۱۱۴ میلی‌متر به کار می‌روند.

علاوه بر تکنیک جوشکاری با فشار گرم که در آن نوار فلزی در یک کوره تا دمای جوش گرم می‌شود، چندین فرآیند دیگر نیز بین سال‌های ۱۸۸۶ تا ۱۸۹۰ توسط ای. تامسون (E. Thomson)، مهندس آمریکایی، ابداع شد که امکان جوشکاری فلزات به صورت الکتریکی را فراهم می‌کرد. پایه و اساس این روش بر خاصیتی استوار بود که توسط جیمز پی. جول (James P. Joule) کشف شده بود؛ بدین معنا که عبور جریان الکتریکی از یک رسانا، موجب گرم شدن آن به دلیل مقاومت الکتریکی‌اش می‌شود. در سال ۱۸۹۸، شرکت Standard Tool Company در ایالات متحده، حق امتیاز (پتنت) استفاده از جوشکاری مقاومتی الکتریکی (Electric Resistance Welding) برای تولید لوله و تیوب را دریافت کرد. تولید لوله و تیوب به روش جوشکاری مقاومتی الکتریکی، پس از راه‌اندازی کارخانه‌های نورد پیوسته نوار گرم (Continuous Hot Strip Rolling Mills) که مواد اولیه‌ی عمده‌ی مورد نیاز برای تولید انبوه را فراهم می‌کردند، در ایالات متحده و بعدها در آلمان رشد چشمگیری یافت. در طول جنگ جهانی دوم نیز، فرآیند جوشکاری با قوس آرگون (Argon Arc Welding) در ایالات متحده ابداع شد که امکان جوشکاری مؤثر منیزیم در صنایع هواپیماسازی را فراهم کرد.

در پی این پیشرفت، انواع مختلفی از فرآیندهای جوشکاری با محافظت گاز (Gas-Shielded Welding Processes) توسعه یافتند که عمدتاً برای تولید لوله‌های فولاد زنگ‌نزن (Stainless Steel Tube) مورد استفاده قرار گرفتند.

در پی تحولات گسترده‌ای که طی ۳۰ سال گذشته در بخش انرژی رخ داده و به دنبال آن ساخت خطوط لوله با ظرفیت بالا و مسافت‌های طولانی آغاز شد، فرآیند جوشکاری زیرپودری (Submerged Arc Welding – SAW) جایگاه برجسته‌ای در جوشکاری لوله‌های انتقال (Line Pipe) با قطرهای بیش از حدود ۵۰۰ میلی‌متر پیدا کرده است.

جدول ۱ - فرآیندهای تولید لوله و تیوب به صورت جوشی

فرآیند شکل‌دهی	فرآیند جوشکاری	واژه‌نامه / اصطلاحات	جوش	دامنه اندازه (OD)
پیوسته	جوشکاری فشاری داغ	Fretz-Moon	طولی	۱۳ تا ۱۱۴
	جوشکاری مقاومتی الکتریکی (ERW)	جریان مستقیم فرکانس پایین فرکانس بالا (مثلاً HFI)	طولی	۱۰ تا ۲۰ (۳۰) ۱۰ تا ۱۱۴ ۲۰ تا ۶۰۰
	جوشکاری قوسی الکتریکی (جوش ذوبی)	قوسی زیرپودری (SAW) قوس الکتریکی با سیم پرکننده و گاز محافظ (MAG) (فقط جوش موقت) قوس الکتریکی با گاز محافظ (ERW*, MIG, TIG)	مارپیچ مارپیچ / طولی	۱۶۸ تا ۲۵۰۰ ۴۰۶ تا ۲۰۳۲ ۱۰ تا ۴۲۰ / ۳۰ تا ۵۰۰
عملیات شکل‌دهی تک مرحله‌ای ماشین خم سه‌غلطک‌ای پرس C-ing		قوسی زیرپودری (SAW) قوس الکتریکی با گاز محافظ (ERW*, MIG, TIG)	طولی	≤۵۰۰ ۲۰۰ تا ۶۰۰
عملیات شکل‌دهی تک مرحله‌ای پرس U/O-ing		قوسی زیرپودری (SAW) قوس الکتریکی با سیم پرکننده و گاز محافظ (MAG) (فقط جوش موقت)	طولی	۴۵۷ تا ۱۶۲۶

*تیوب ضد زنگ

لوله‌ها و تیوب‌های فولادی جوشی با درز طولی (Longitudinal) یا درز مارپیچی (Spiral / Helical) تولید می‌شوند. قطر این محصولات حدود ۶ تا ۲۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره آن‌ها ۰.۵ تا حدود ۴۰ میلی‌متر است.

مواد اولیه در تمام موارد محصول تخت نورد شده (Rolled Flat Product) است که بسته به فرآیند تولید، ابعاد لوله یا تیوب و کاربرد آن می‌تواند به شکل نوار یا اسکالپ فولادی نورد گرم یا سرد، نوار پهن نورد گرم، یا ورق نورد گرم باشد.

خواص فیزیکی و سطح نهایی مورد نیاز لوله یا تیوب، در بسیاری از موارد، پیش‌تر در محصول تخت نورد شده تأمین شده‌اند. اگر این‌گونه نباشد، ممکن است یک عملیات حرارتی پس از تولید یا فرآیند سخت‌کاری کرنش/کار سرد (Strain Hardening / Cold Working) بر روی محصول لوله‌ای اعمال شود تا مقادیر مورد نیاز به دست آید.

مواد اولیه می‌تواند در حالت گرم یا سرد به شکل لوله‌ای شکل داده شود. در این زمینه، تفاوتی بین شکل‌دهی پیوسته لوله (Continuous Tube Forming) و فرآیند شکل‌دهی تک‌لوله‌ای (Single Tube Forming Process) قائل می‌شوند.

در شکل‌دهی پیوسته لوله (Continuous Tube Forming)، نوار فلزی باز شده از کویل‌ها از یک انباره (Accumulator) برداشته می‌شود و سر جلو و سر عقب کویل‌های متوالی به یکدیگر جوش داده می‌شوند.

در تولید تک‌لوله‌ای (Single Pipe Production)، فرآیند شکل‌دهی و جوشکاری لوله بر طول‌های بی‌پایان انجام نمی‌شود، بلکه همان‌طور که از نام آن پیداست، بر قطعات تک‌لوله‌ای اعمال می‌گردد.

فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- فرآیندهای جوشکاری با فشار (Pressure Welding Processes)
- فرآیندهای جوشکاری ذوبی (Fusion Welding Processes)

فرآیندهای جوشکاری با فشار که بیشتر شناخته شده‌اند شامل روش Fretz-Moon، جوشکاری مقاومتی با جریان مستقیم (DC Electric Resistance Welding)، جوشکاری مقاومتی با فرکانس پایین، جوشکاری القایی با فرکانس بالا (High-Frequency Induction - HFI) و جوشکاری هدایتی با فرکانس بالا هستند. فرآیندهای جوشکاری ذوبی نیز شامل جوشکاری زیرپودری (Submerged-Arc) و روش‌های با محافظ گازی (Gas-Shielded) می‌شوند.

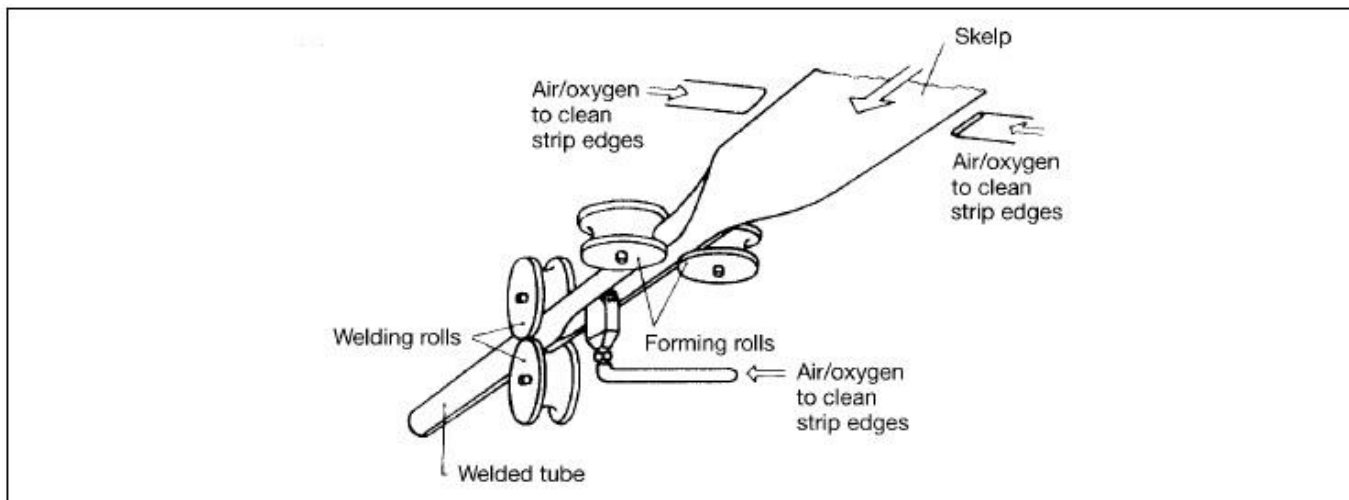
جدول ۱ یک نمای کلی از اصلی‌ترین فرآیندهای عمومی جوشکاری را نشان می‌دهد.

اصلی‌ترین روش‌های مورد استفاده برای تولید لوله و تیوب جوشی عبارت‌اند از Fretz-Moon، جوشکاری القایی با فرکانس بالا (High-Frequency Induction)، جوشکاری زیرپودری (Submerged-Arc)، فرآیند ترکیبی جوشکاری زیرپودری با محافظ گازی (Combination Gas-Shielded Submerged-Arc) و همچنین روش‌های مختلف جوشکاری با محافظ گازی برای تولید لوله و تیوب فولاد زنگ‌نزن (Stainless Steel).

۴.۱ فرآیندهای جوشکاری فشاری

۴.۱.۱ فرآیند فرتز-مون

در این فرآیند که به نام مخترعانش نام‌گذاری شده است، نوار فولادی به شکل یک اسکالپ پیوسته در خط شکل‌دهی و جوشکاری (شکل ۳۹) تا دمای جوشکاری گرم می‌شود. ماده اولیه به‌طور پیوسته توسط غلتک‌ها به صورت لوله با درز باز شکل داده می‌شود و سپس لبه‌های جفت شونده فشرده شده و با فرآیندی مشابه تکنیک جوشکاری آهن‌گری قدیمی، جوش داده می‌شوند. با این روش می‌توان لوله و لوله‌کشی با قطر خارجی ۴۰ تا ۱۱۴ میلی‌متر تولید کرد، به‌طوری که سرعت جوشکاری به ترتیب بین ۲۰۰ تا ۱۰۰ متر در دقیقه متغیر است.



شکل ۳۹ - خط جوشکاری فرتز-مون (Fretz-Moon) از نما زیرین

کوئل‌های نوار فولادی نورد گرم که به‌عنوان ماده اولیه استفاده می‌شوند، با سرعت بالا باز می‌شوند و در انباره‌های حلقه‌ای (Loop accumulators) ذخیره می‌گردند. این انباره‌ها به‌عنوان یک بافر در طول فرآیند تولید پیوسته عمل می‌کنند و امکان جوشکاری انتهای عقب نوار به انتهای جلوی نوار ارائه‌شده توسط کوئل بعدی را فراهم می‌سازند. این نوار پیوسته یا «اسکِلپ» از یک کوره تونلی عبور می‌کند و تا دمای بالایی گرم می‌شود. مشعل‌های جانبی دما در لبه‌های اسکِلپ را به دمای جوشکاری تقریباً ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای مرکز اسکِلپ افزایش می‌دهند. ایستگاه غلتک شکل‌دهنده، اسکِلپ ورودی پیوسته را به شکل لوله با درز باز درمی‌آورد، و محیط آن در ایستگاه بعدی جوشکاری با غلتک‌های فشاری، که ۹۰ درجه نسبت به ایستگاه قبلی جابجا شده‌اند، کمی کاهش می‌یابد (تقریباً ۳٪). فشاری که این ایستگاه جوشکاری ایجاد می‌کند باعث می‌شود لبه‌ها به هم فشرده شده و جوش داده شوند. ساختار جوش در ایستگاه‌های کاهش‌دهنده بعدی، که دوباره با زاویه ۹۰ درجه جابجا شده‌اند و برای تعیین ابعاد لوله عمل می‌کنند، بیشتر فشرده می‌شود. اره داغ پروازی (flying hot saw) که در پایین‌دست خط جوشکاری قرار دارد، لوله بی‌پایان را به طول‌های جداگانه برش می‌دهد و سپس این طول‌ها از طریق تخت‌های خنک‌کننده به بخش پایان‌دهی لوله منتقل می‌شوند.

در تأسیسات مدرن فرتز-مون، لوله بی‌پایان مستقیماً به یک نورد کشش-کاهنده منتقل می‌شود. این نورد در خط خروجی قرار دارد و امکان نورد ماده اولیه در همان حرارت را به قطرهای مختلف تا حدود ۱۳ میلی‌متر فراهم می‌کند. سپس رشته لوله‌ها به طول‌های جداگانه برش داده شده و روی تخت‌های خنک‌کننده قرار می‌گیرند. این ترکیب از تأسیسات این مزیت را دارد که کارخانه فرتز-مون می‌تواند برای تولید لوله با یک قطر ثابت مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه، هزینه‌های تعویض و تنظیم غلتک‌ها را حذف می‌کند.

۴.۱.۲ جوشکاری با مقاومت الکتریکی

۴.۱.۲.۱ فرآیندهای جریان مستقیم (DC)

فرآیندهایی که با جریان مستقیم کار می‌کنند (برای مثال سیستم جریان مستقیم شرکت Newcor) یا از اثر شبه‌جریان مستقیم استفاده می‌کنند (سیستم موج مربعی شرکت Yoder) برای جوش طولی لوله‌های کوچک تا قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و در موارد خاص تا ۳۰ میلی‌متر توسعه یافته‌اند، با ضخامت‌های دیواره کوچک از ۰/۵ تا حدود ۲/۰ میلی‌متر.

مزایای جوشکاری با جریان مستقیم نسبت به روش‌های کم‌فرکانس و پرفرکانس به‌ویژه ناشی از سطح نسبتاً صاف مسیر داخلی جوش و وجود حداقل برجستگی (تقویت) است. این مزیت در لوله‌هایی اهمیت دارد که نیاز به جوش داخلی صاف دارند و امکان حذف اضافات داخلی وجود ندارد، مانند لوله‌های مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی یا برای کشش‌های بعدی.

دامنه کاربردهای فرآیند جریان مستقیم محدود به توان الکتریکی است که می‌تواند توسط الکترودهای دیسکی مورد استفاده منتقل شود. سرعت‌های جوشکاری حاصل بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر در دقیقه است. لوله‌های تولیدشده بدون استثنا، سپس تحت فرآیند کاهش کششی سرد قرار می‌گیرند که در این فرآیند، ضخامت بدنه اصلی کمی بیشتر از ناحیه جوش افزایش می‌یابد، و در نتیجه این لوله‌ها عملاً هیچ برجستگی داخلی جوش نشان نمی‌دهند. به دلایل تلورانسی، برای ماده اولیه از ورق نورد سرد استفاده می‌شود.

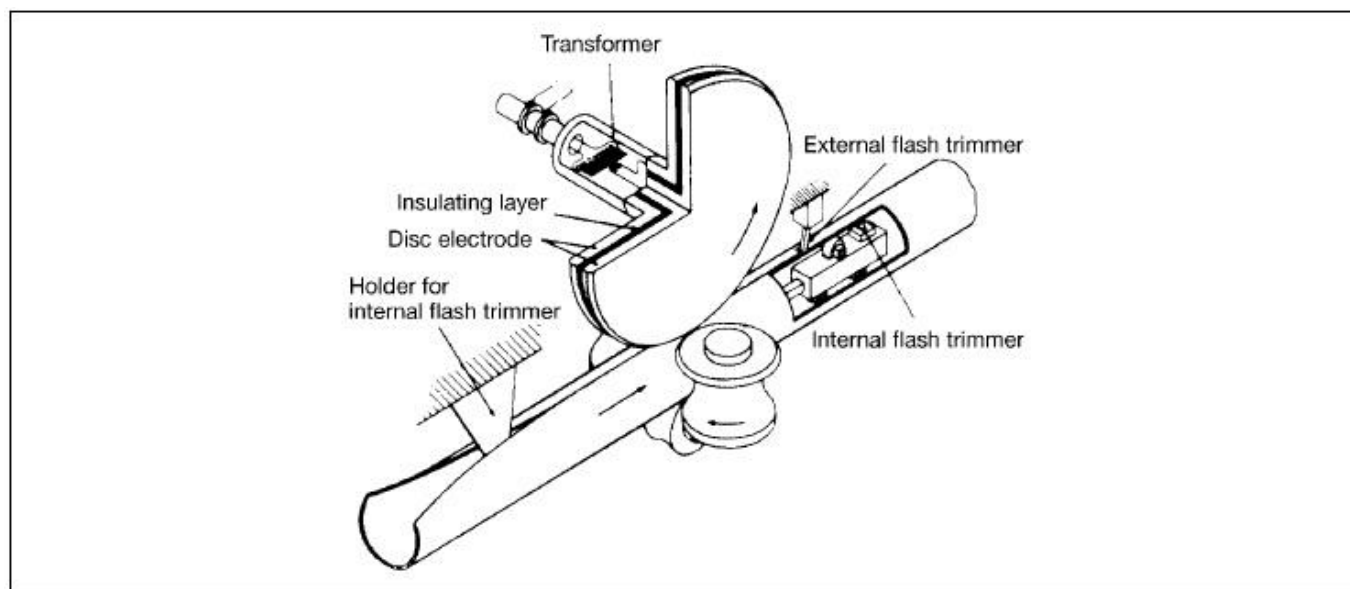
۴.۱.۲.۲ فرآیند کم‌فرکانس

در این فرآیند، جوشکاری با جریان متناوب با فرکانس‌های ۵۰ تا ۴۰۰ هرتز انجام می‌شود. یک الکتروود شامل دو دیسک عایق‌بندی‌شده از آلایژ مس نه تنها به‌عنوان منبع تغذیه عمل می‌کند، بلکه به‌عنوان ابزار شکل‌دهی و عنصری که فشار جوش لازم را ایجاد می‌کند نیز استفاده می‌شود. الکتروودها بخش‌های حیاتی کارخانه را تشکیل می‌دهند، زیرا نه تنها باید دارای شیار مطابق با قطر لوله تولیدی باشند، بلکه این شعاع نیز باید در طول عملیات تولید به‌طور مداوم از نظر سایش کنترل شود.

ماده‌ای که در طی فرآیند جوشکاری فشاری بیرون زده می‌شود، در طول ناحیه جوش، برجستگی داخلی و خارجی ایجاد می‌کند که باید بلافاصله پس از نقطه جوش توسط ابزارهای برش داخلی و خارجی حذف شود.

به شرطی که فرآیند با دقت و مطابق با این الزامات مختلف کنترل شود، روش جوشکاری کم‌فرکانس قادر است جوش‌هایی با درجه بالای کیفیت و بی‌نقصی تولید کند.

این فرآیند برای تولید لوله‌های جوشکاری طولی با قطر ۱۰ تا ۱۱۴ میلی‌متر استفاده می‌شود و سرعت‌های جوشکاری آن تا حدود ۹۰ متر در دقیقه است که بسته به ضخامت دیواره متغیر است.



شکل ۴۰ - جوشکاری مقاومتی فشاری با فرکانس پایین

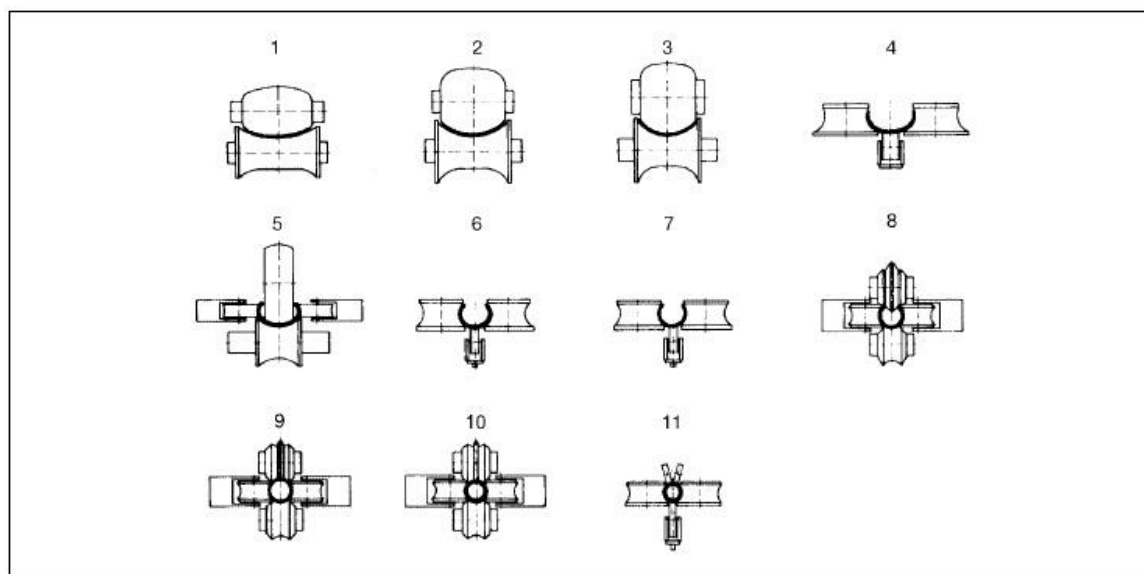
۴.۱.۲.۳ فرآیندهای پرفرکانس

پس از توسعه فرآیند جوشکاری مقاومتی کم‌فرکانس، در دهه ۱۹۶۰ جایگزینی پرفرکانس معرفی شد. از آن زمان، این فناوری جوشکاری به نفوذ گسترده‌ای در بازار دست یافته است. این فرآیند شامل اعمال جریان متناوب پرفرکانس در محدوده ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز است، و عملیات شکل‌دهی لوله و تأمین انرژی توسط واحدهای جداگانه انجام می‌شود.

این روش جوشکاری نیز همزمان از فشار و حرارت استفاده می‌کند تا لبه‌های نوار لوله با درز باز را بدون افزودن فلز پرکننده به هم متصل کند. غلتک‌های فشاری و فشار در ایستگاه جوشکاری، لبه‌های لوله با درز باز را به تدریج به هم نزدیک می‌کنند و فشار لازم برای جوشکاری را اعمال می‌نمایند. جریان متناوب پرفرکانس به‌عنوان منبع انرژی برای تولید حرارت مورد نیاز جوشکاری مزایای متعددی دارد. به‌عنوان مثال، در مقایسه با جریان متناوب معمولی، از چگالی جریان بسیار بالایی در سطح مقطع هادی برخوردار است. به دلیل فرکانس بالا، جریان HF باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی در هسته مرکزی هادی می‌شود. مقاومت اهمی هادی در این میدان بیشینه است، بنابراین الکترون‌ها مسیر کم‌ترین مقاومت را در ناحیه سطح خارجی هادی دنبال می‌کنند (اثر پوستی). جریان بدین ترتیب در طول لبه‌های نوار لوله با درز باز تا نقطه‌ای که لبه‌ها به هم می‌رسند (نقطه جوش) جریان می‌یابد و تمرکز انرژی حاصل، که توسط نزدیکی هادی منفی تقویت می‌شود، منجر به بهره‌وری بالای انرژی می‌گردد. زیر نقطه کوری (۷۶۸ درجه سانتی‌گراد)، عمق نفوذ جریان تنها به چند صدم میلی‌متر می‌رسد. هنگامی که فولاد بالاتر از این دما گرم می‌شود، غیرمغناطیسی شده و عمق نفوذ جریان در فرکانس‌های حدود ۴۵۰ کیلوهرتز به چند دهم میلی‌متر افزایش می‌یابد.

جریان جوشکاری می‌تواند به لوله با درز باز هم به‌صورت هدایتی از طریق تماس‌های لغزشی و هم به‌صورت القایی با استفاده از سیم‌پیچ‌های تک‌پیچ یا چندپیچ وارد شود. بنابراین، در نام‌گذاری، تفاوتی بین جوشکاری القایی پرفرکانس (HFI) و جوشکاری هدایتی پرفرکانس قائل می‌شوند. نوار یا اسکالپ در یک دستگاه نورد شکل دهی غلتک یا در یک ایستگاه غلتک قابل تنظیم (شکل‌دهی عملکرد طبیعی) به شکل لوله با درز باز درآمد و برای تولید طیف وسیعی از محصولات استفاده می‌شود. این محصولات شامل لوله خط و لوله ساختمانی با محدوده اندازه تقریبی ۲۰ تا ۶۰۹ میلی‌متر قطر خارجی و ضخامت دیواره ۰.۵ تا حدود ۱۶ میلی‌متر، و همچنین بلوک‌های لوله به‌عنوان ماده اولیه برای نورد کاهش کششی بعدی است. ماده اولیه به شکل نوار فولادی کلاف‌شده یا نوار پهن نورد گرم تامین می‌شود. بسته به ابعاد لوله و کاربرد، و به‌ویژه در تولید لوله دقیق، ممکن است نوار فولادی پیش از ورود به خط، عملیات اسیدشویی را پشت سر بگذارد یا از نوار نورد سرد استفاده شود. کلاف‌های جداگانه به هم جوش داده می‌شوند و در سرعت‌های بازکردن بالا، نوار ابتدا از طریق یک انباره حلقه‌ای عبور می‌کند. دستگاه جوش لوله به‌صورت پیوسته با سرعت ۱۰ تا ۱۲۰ متر در دقیقه عمل می‌کند و نوار را از انباره حلقه‌ای می‌کشد.

شکل ۴۱ نمایی نموداری از فرآیند شکل‌دهی غلتک را نشان می‌دهد و شکل ۴۲ یک کارخانه یا تجهیز متناظر با آن را نمایش می‌دهد.



شکل ۴۱ - اصول فرآیند نورد شکل‌دهی



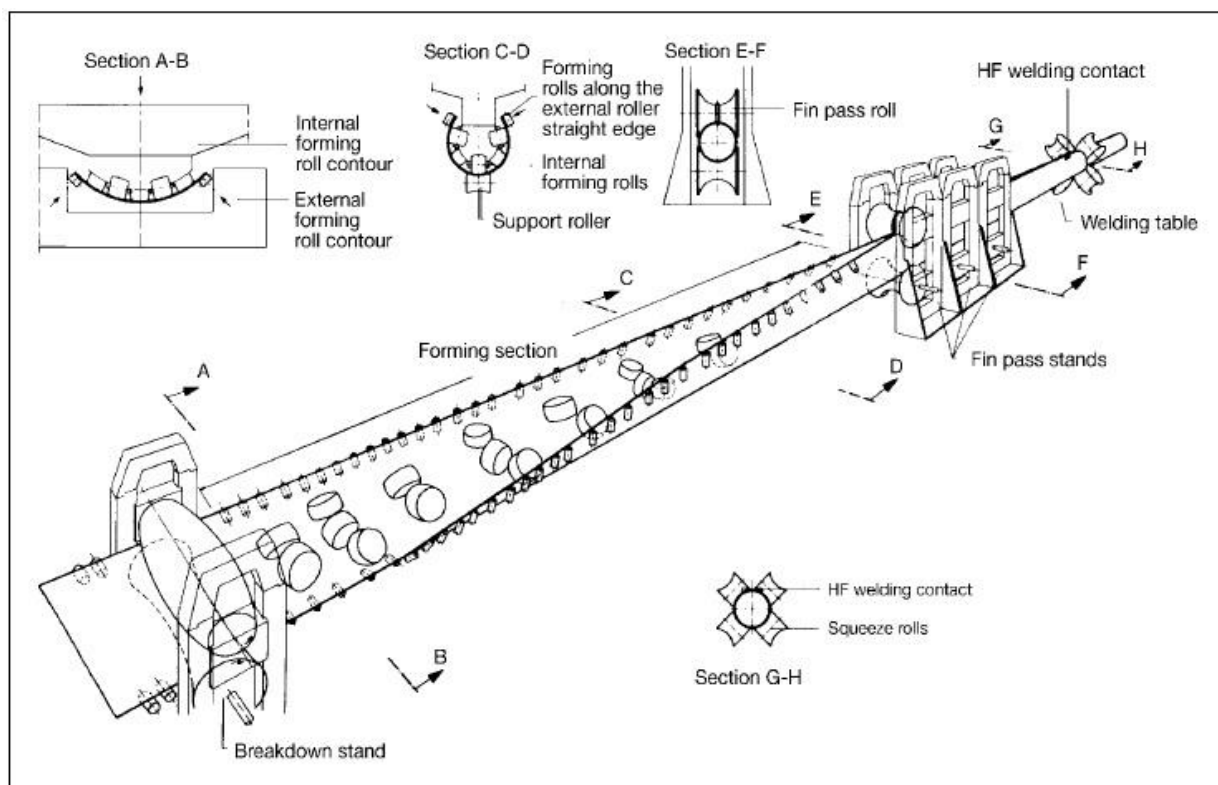
شکل ۴۲ - خط نورد شکل دهی (عکس از کارخانه MHP Mannesmann Präzisrohr GmbH)

کارخانه شکل دهی غلتک برای قطر لوله های حداکثر تا ۶۰۹ میلی متر استفاده می شود و معمولاً شامل ۸ تا ۱۰ ایستگاه شکل دهی غلتک عمدتاً محرک است که در آن نوار به تدریج به شکل لوله با درز باز در می آید - همان طور که در مراحل ۱ تا ۷ در شکل ۴۱ نشان داده شده است. سه ایستگاه عبور باله ای - شماره های ۸، ۹ و ۱۰ - لوله با درز باز را به سمت میز جوشکاری شماره ۱۱ هدایت می کنند. غلتک های شکل دهی باید به طور دقیق با قطر نهایی لوله مطابقت داشته باشند. برای تولید لوله های با قطر بزرگ، فرآیند شکل دهی با عملکرد طبیعی نیز می تواند به کار گرفته شود. شکل ۴۳ اصول این فرآیند شکل دهی، که شامل یک سری ایستگاه های غلتک (قفسه های غلتکی) است، را نشان می دهد. شکل ۴۴ نیز یک کارخانه متناظر را با ایستگاه شکست محرک در پیش زمینه نمایش می دهد.

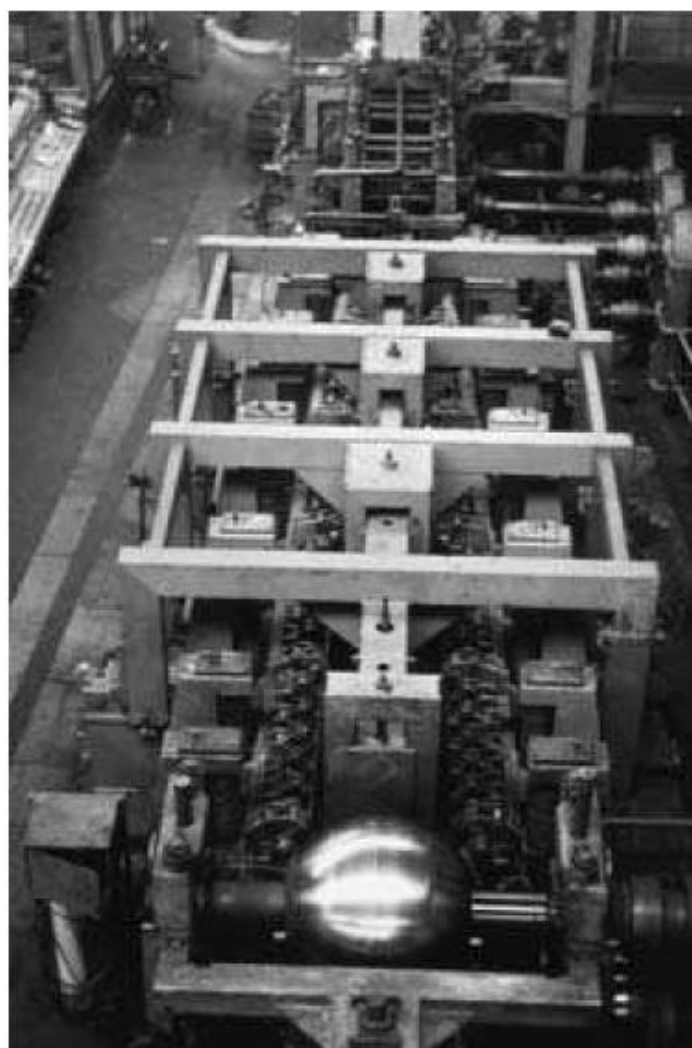
ویژگی اصلی قفسه غلتک ها این است که تعدادی غلتک شکل دهی داخلی و خارجی غیرمحرک، که در محدوده وسیعی از قطر محصول قابل تنظیم هستند، در یک خط شکل دهی کیفی شکل قرار گرفته اند و نوار را به تدریج به شکل لوله با درز باز خم می کنند. تنها ایستگاه شکست در ورودی و ایستگاه های عبور باله ای در خروجی واقعاً محرک هستند. جزئیات مقطع عرضی A-B، C-D و E-F در شکل ۴۳ میزان تغییر شکل و آرایش غلتک های شکل دهی را در بخش های مختلف طول خط نشان می دهد.

به دلیل افزایش تقاضا در بازار لوله و لوله سازی برای تولید دسته ای کوچک، گریدهای با آلیاژ کم و مقاومت بالا و نسبت های بسیار زیاد ضخامت دیواره به قطر، اخیراً یک سیستم شکل دهی با لبه صاف توسعه یافته است. در این روش، به جای غلتک های شکل دهی پایینی، از لبه های غلتکی استفاده می شود که منجر به کاهش قابل توجه طول خط شکل دهی می گردد. با توجه به ورودی نوار با لبه تقریباً صاف، چنین تأسیساتی قادر است لوله های با درز باز را با نسبت ضخامت دیواره به قطر بین ۱:۸ تا ۱:۱۰۰ شکل دهد.

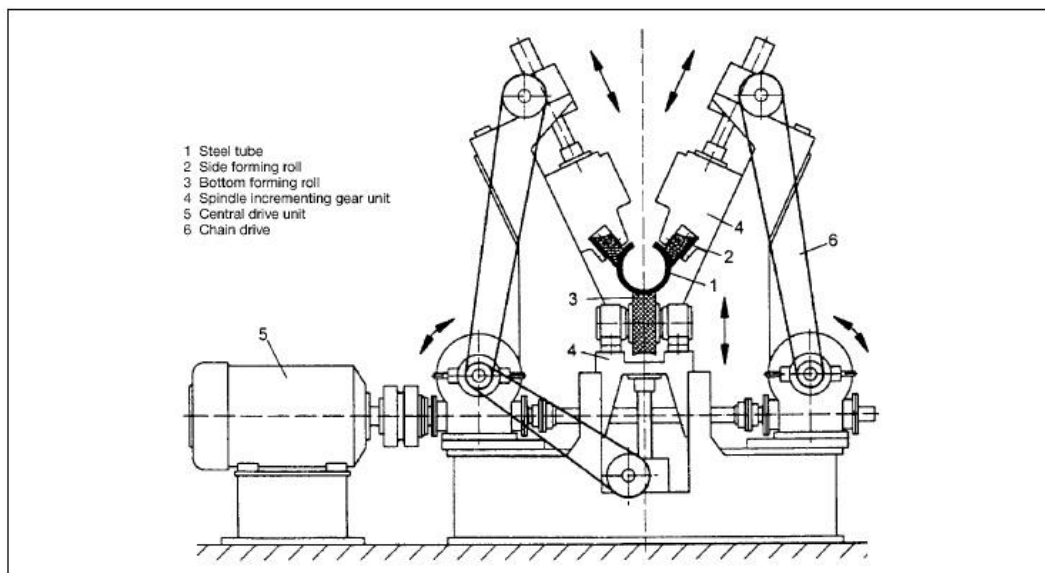
افزایش کارایی هزینه، به ویژه در تولید دسته های کوچک، با کاهش زمان های تغییر تنظیمات لازم برای تغییر از یک قطر لوله به قطر دیگر، از طریق معرفی فرآیند نوآورانه شکل دهی CTA (تنظیم ابزار متمرکز) به دست آمده است.



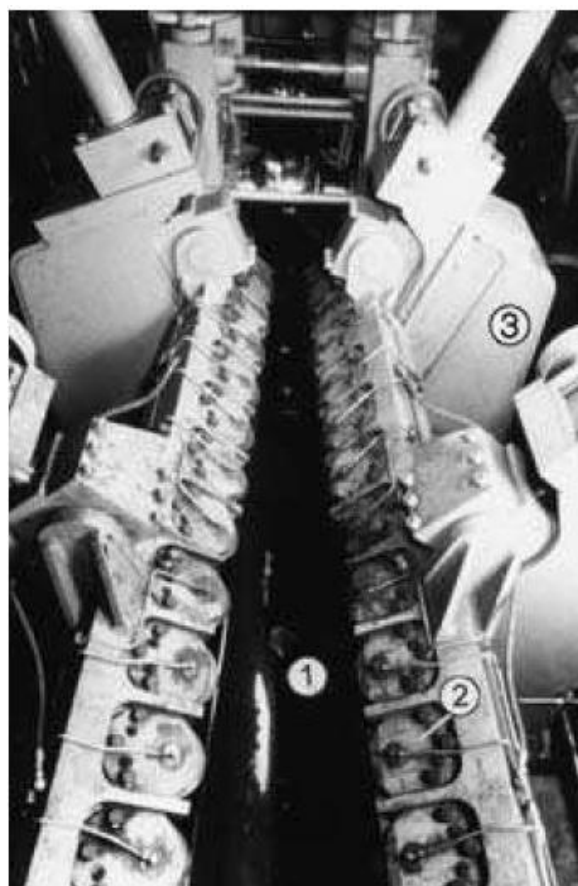
شکل ۴۳ - نمای شماتیک ایستگاه‌های نورد مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی (شکل‌دهی با عملکرد طبیعی)



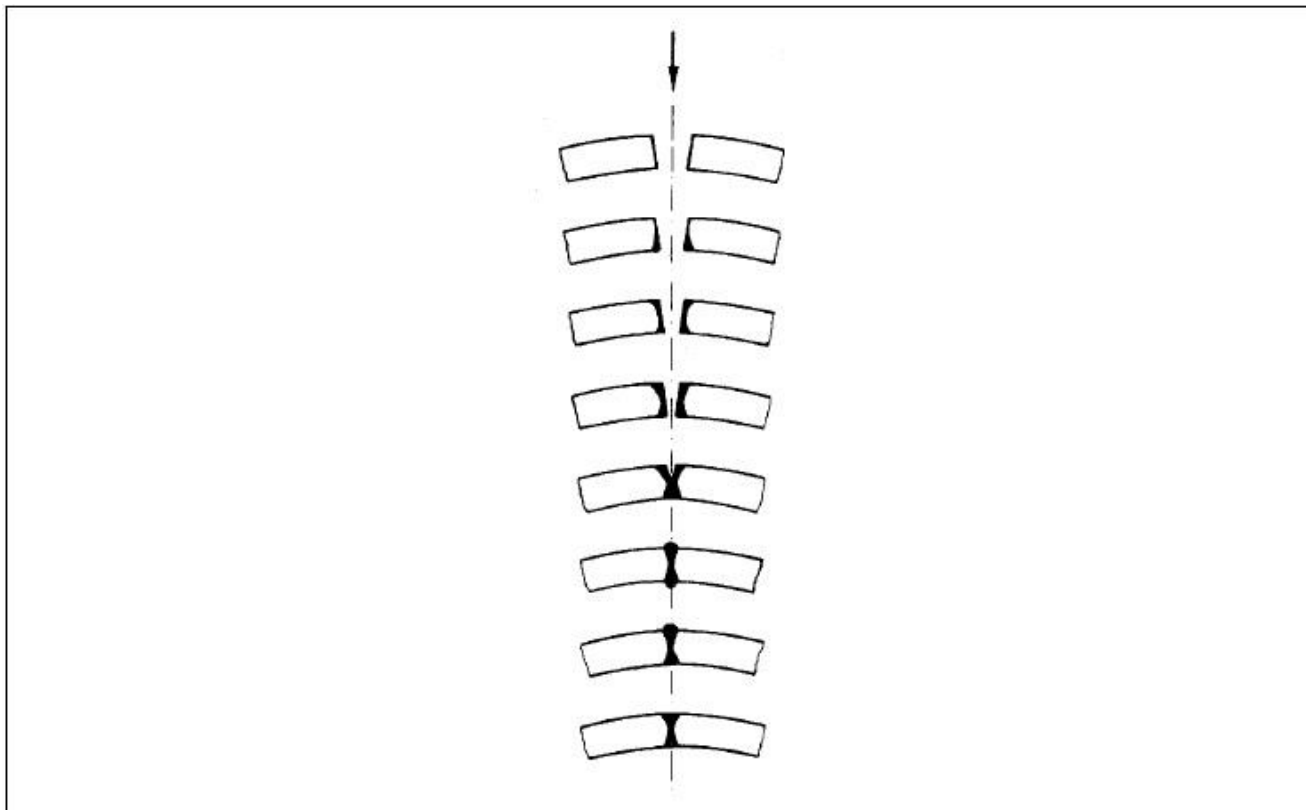
شکل ۴۴ - خط جوش لوله با ایستگاه نورد (عکس از کارخانه Mannesmann Line Pipe GmbH)



شکل ۴۵ - نمای شماتیک فرآیند شکل‌دهی CTA (ترسیم با احترام از VOEST-ALPINE Industrieanlagen GmbH)



شکل ۴۶ - خط جوش لوله با بخش شکل‌دهی CTA (عکس از کارخانه Röhrenwerke Gebr. Fuchs GmbH)
۱- لوله با درز باز ۲- غلتک شکل‌دهی جانبی ۳- واحد دنده افزایش‌دهنده محور دوار (Spindle Incrementing Gear Unit)



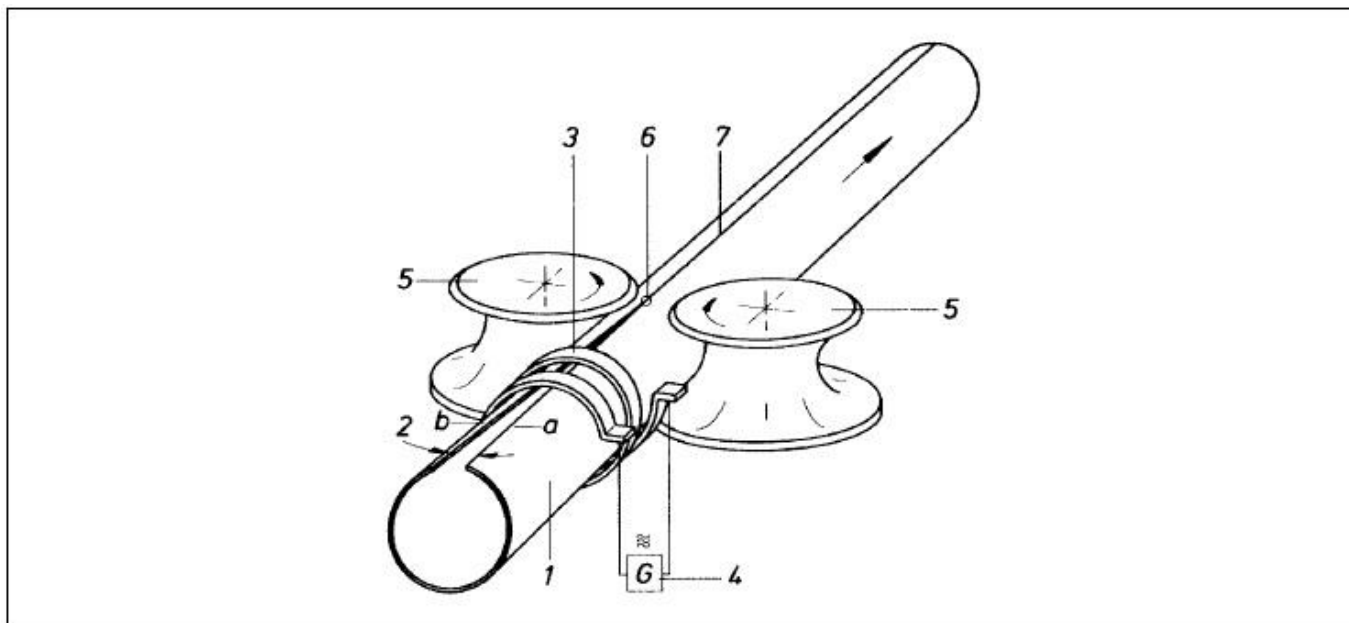
شکل ۴۷ - نمای شماتیک ادغام لبه‌های ورق و تشکیل جوش فرکانس بالا (HF)

تمام غلتک‌های خط شکل‌دهی بر روی یک تیر نصب شده و از طریق سیستم CTA توسط یک موتور تنظیم می‌شوند. این بدان معناست که در سراسر محدوده اندازه‌ها نیازی به تعویض هیچ غلتک شکل‌دهی (یعنی ابزار) نیست. این موضوع منجر به کاهش قابل توجه زمان‌های تغییر و آماده‌سازی می‌شود. از آنجایی که تمام تنظیمات انجام‌شده در خط شکل‌دهی CTA توسط مبدل‌های موقعیت کنترل می‌شوند، تبدیل سیستم به اندازه‌های مختلف لوله و لوله‌کشی می‌تواند به‌ویژه سریع و با بالاترین اطمینان انجام شود. شکل ۴۵ نمودار عملکرد شکل‌دهی CTA را نشان می‌دهد و شکل ۴۶ یک کارخانه متناظر را نمایش می‌دهد.

قبل از ورود نوار به بخش شکل‌دهی، ابتدا صاف شده و توسط یک برش‌دهنده طولی لبه‌ها به عرض ثابت برش داده می‌شود. لبه‌های برش‌خورده می‌توانند برای آماده‌سازی جوش، به‌صورت مورب (شیب‌دار) نیز شکل داده شوند. سپس نوار همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد به شکل لوله با درز باز شکل داده می‌شود و با باقی ماندن شکاف نسبتاً باز، از طریق سه یا چهار ایستگاه عبور باله‌ای به میز جوش هدایت می‌گردد. غلتک‌های باله‌ای بالاسری، که عرض آن‌ها به سمت نقطه جوش باریک می‌شود، زاویه ورودی شکاف را تعیین کرده و موقعیت مرکزی آن را کنترل می‌کنند.

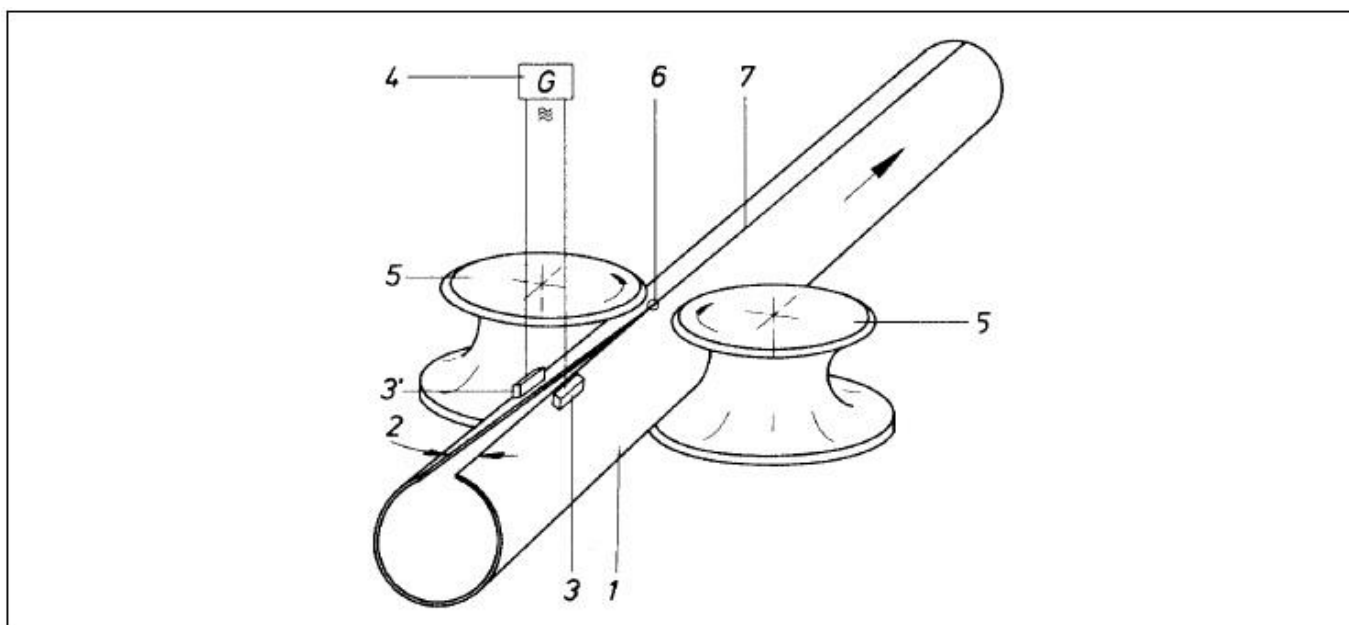
قبل از ورود نوار به بخش شکل‌دهی، ابتدا صاف شده و توسط یک برش‌دهنده طولی لبه‌ها به عرض ثابت برش داده می‌شود. لبه‌های برش‌خورده می‌توانند برای آماده‌سازی جوش، به‌صورت مورب (شیب‌دار) نیز شکل داده شوند. سپس نوار همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، به شکل لوله با درز باز شکل داده می‌شود و با باقی ماندن شکاف نسبتاً باز، از طریق سه یا چهار ایستگاه عبور باله‌ای به میز جوش هدایت می‌گردد. غلتک‌های باله‌ای بالاسری، که عرض آن‌ها به سمت نقطه جوش باریک می‌شود، زاویه ورودی شکاف را تعیین کرده و موقعیت مرکزی آن را در میز جوش کنترل می‌کنند. در آنجا، لبه‌های همگرا شده نوار توسط غلتک‌های فشاری شکل‌دار به یکدیگر فشار داده شده و سپس توسط فرآیند جوش مقاومتی پرفرکانس جوش داده می‌شوند (شکل ۴۷).

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، جریان می‌تواند یا به‌صورت القایی (شکل ۴۸) از طریق یک سیم‌پیچ که اطراف لوله با درز باز قرار گرفته، منتقل شود، یا به‌صورت هدایتی (شکل ۴۹) از طریق تماس‌های لغزشی که در طول لبه‌های درز باز حرکت می‌کنند.



شکل ۴۸ - جوشکاری القایی با فرکانس بالا (High-Frequency Induction Welding)

۱-لوله با درز باز ۲-زاویه ورود شکاف جوش ۳-کویل القایی ۴-ژنراتور جوش ۵-غلتک‌های فشاردهنده (Squeeze Rolls) ۶-نقطه جوش ۷-جوش



شکل ۴۹ - جوشکاری هدایتی با فرکانس بالا (High-Frequency Conduction Welding)

۱-لوله با درز باز ۲-زاویه ورود شکاف جوش ۳ و ۳' - تماس‌های لغزشی ۴-ژنراتور جوش ۵-غلتک‌های فشاردهنده (Squeeze Rolls) ۶ - نقطه جوش ۷-جوش

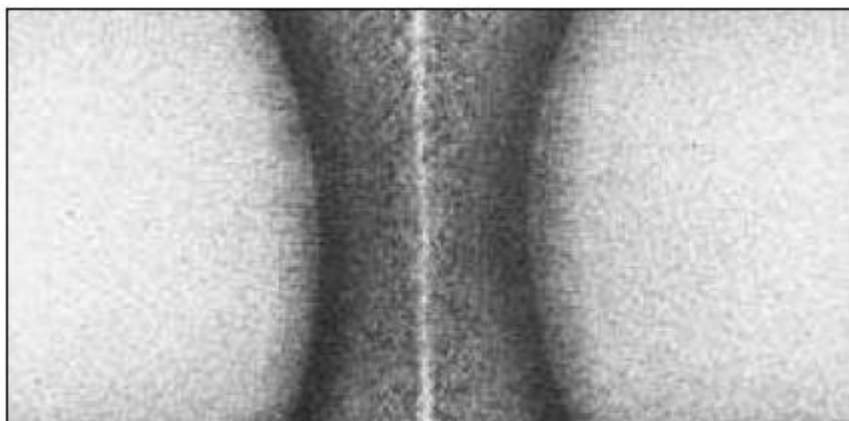
برآمدگی‌های داخلی و خارجی که در حین جوشکاری فشاری لوله‌ها با قطر داخلی حدود ۳۰ میلی‌متر و بالاتر ایجاد می‌شوند، معمولاً در حالی که ماده هنوز داغ است، توسط دستگاه‌های رنده‌کاری یا خراش‌دهی حذف می‌گردند. سپس لوله در بین دو تا شش قفسه کالیبراسیون که برای

کاهش محیطی طراحی شده‌اند، گرد و هم‌اندازه می‌شود. این فرآیند همچنین باعث ایجاد اثر صاف‌کنندگی نیز می‌گردد. اضافه کردن یک واحد شکل‌دهی چندقفسه‌ای در بخش خروجی لوله نیز می‌تواند امکان شکل‌دهی مستقیم لوله گرد به مقاطع خاص را فراهم کند.

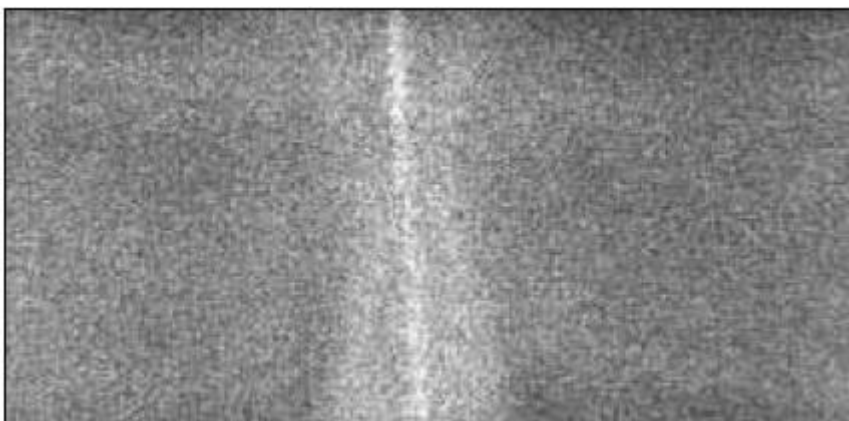
پس از انجام آزمون‌های غیرمخرب بر روی درز جوش پرداخت‌شده (این بازرسی به‌عنوان بخشی از کنترل تولید در حین فرآیند انجام می‌شود)، رشته لوله پیوسته توسط دستگاه برش پروازی به طول‌های مشخص بریده می‌شود. عملیات برش می‌تواند به روش‌های مختلف انجام گیرد، از جمله: شکستن لوله در ناحیه باریکی که به‌صورت القایی گرم شده است، برش چرخشی با استفاده از تیغه‌های دیسکی، یا برش سرد و برش اصطکاکی با اهرهای مخصوص.

جوش فشاری با فرکانس بالا (HF) بسته به نوع کاربرد، می‌تواند به همان حالت جوش خورده باقی بماند (شکل ۵۰) یا در محدوده نرماله‌سازی تحت عملیات حرارتی قرار گیرد (شکل ۵۱). همچنین می‌توان بازپخت جزئی القایی را بر روی درز جوش در لوله پیوسته انجام داد، یا لوله‌های جداشده پس از برش به طول مورد نظر را بسته به شرایط جریان مواد در داخل کارخانه، تحت عملیات حرارتی جداگانه قرار داد.

در بخش نهایی تکمیل لوله، لوله‌ها در دستگاه‌های تابگیری مورد فرآوری بیشتر قرار می‌گیرند. بسته به ابعاد و کاربرد لوله، ممکن است عملیات حرارتی پیش از تابگیری انجام شود. تجهیزات آزمون غیرمخرب و انجام بازرسی چشمی برای پایش فرآیند تولید به کار می‌روند. پس از تکمیل این مراحل، لوله‌ها بدون توجه به آزمون‌ها و بازرسی‌های انجام‌شده در حین فرآیند، تحت آزمون‌ها و مراحل پذیرش مشخص و مربوطه قرار می‌گیرند.



شکل ۵۰ – جوش فشاری فرکانس بالا (HF) در وضعیت "همان‌طور که جوش شده"



شکل ۵۱ – جوش فشاری فرکانس بالا (HF) پس از عملیات حرارتی

فرآیند جوشکاری القایی با فرکانس بالا (High-Frequency Induction Welding Process – HFIW)

در فرآیند جوشکاری القایی با فرکانس بالا HFI (یا فرآیند Induweld)، بسته به ضخامت دیواره و نوع کاربرد، می‌توان به سرعت‌های جوشکاری تا حدود ۱۲۰ متر در دقیقه دست یافت.

شکل ۴۸ نمایی شماتیک از این فرآیند را نشان می‌دهد. لوله با درز باز (۱) که قرار است جوش داده شود، در جهت فلش به سمت میز جوش هدایت می‌شود، جایی که توسط غلتک‌های فشاری (۵) گرفته می‌شود. این غلتک‌ها در ابتدا لبه‌های درز باز ورودی را که با زاویه (۲) به هم نزدیک می‌شوند، به هم می‌فشارند. جریان فرکانس بالایی که توسط ژنراتور جوش (۴) تأمین می‌شود، میدان الکترومغناطیسی‌ای در اطراف سیم‌پیچ القایی (۳) ایجاد می‌کند که ولتاژ متناوبی در لوله با درز باز القا کرده و جریانی را در پیرامون محیط لوله برقرار می‌سازد. این جریان در ناحیه لبه‌های درز باز متمرکز می‌شود و از لبه a از طریق نقطه (۶) به لبه b و سپس دوباره به صفحه محیطی سیم‌پیچ القایی بازمی‌گردد، به‌طوری که مدار در پشت لوله بسته می‌شود. لبه‌های گرم‌شده توسط غلتک‌های فشاری (۵) به هم فشرده شده و جوش داده می‌شوند. برآمدگی‌های داخلی و خارجی (پره‌های جوش) ایجادشده نیز از جوش نهایی (۷) تراشیده و حذف می‌گردند.

فرآیند جوشکاری هدایتی با فرکانس بالا (High-Frequency Conduction Welding Process)

فرآیند جوشکاری هدایتی با فرکانس بالا (که همچنین با نام فرآیند Thermatool شناخته می‌شود) با فرآیند جوشکاری القایی با فرکانس بالا (HFI) تفاوت دارد، از این جهت که در آن، جریان الکتریکی از طریق تماس‌های لغزنده مسی که در بالادست نقطه جوش و بر روی لبه‌های درز باز لوله قرار دارند، به قطعه وارد می‌شود.

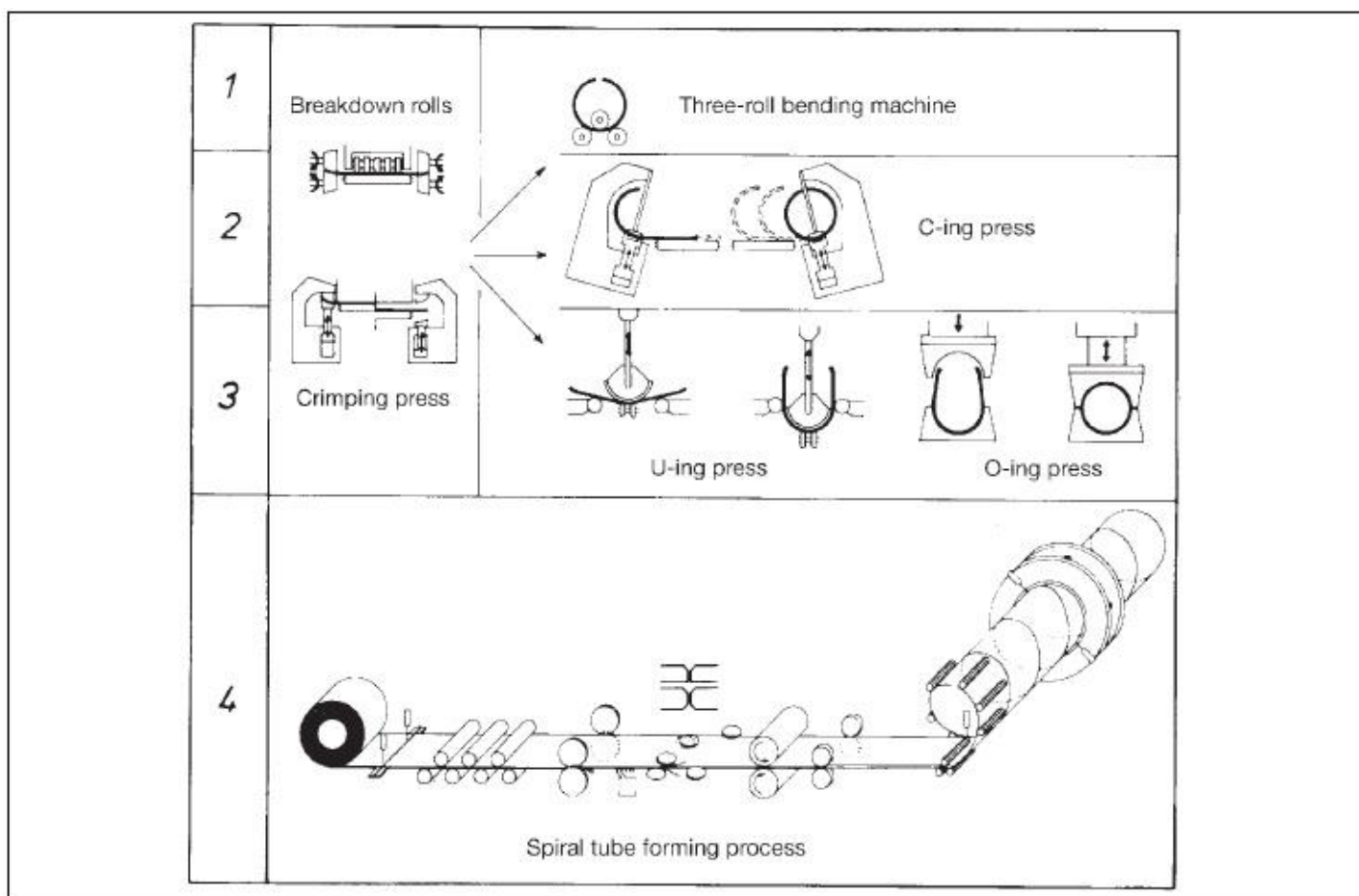
بسته به ضخامت دیواره و فرآیند شکل‌دهی، می‌توان به سرعت‌های جوشکاری تا ۱۰۰ متر در دقیقه دست یافت.

شکل ۴۹ نمایی شماتیک از فرآیند ورود جریان را نشان می‌دهد.

تماس‌های ۳ و ۳' در فاصله بسیار نزدیک به لبه‌های مقابل قرار دارند. جریان متناوب فرکانس بالا که توسط ژنراتور ۴ تأمین می‌شود، به‌طور مستقیم به لوله با درز باز هدایت شده و از تماس ۳ لبه تا نقطه ۴ و سپس به تماس ۳' بازمی‌گردد. در نقطه ۶، لبه‌ها توسط فشار غلتک‌های فشاری (۵) به هم فشرده شده و جوش داده می‌شوند. برآمدگی‌ها یا پره‌های داخلی و خارجی پس از آن با استفاده از رنده‌کاری یا روش‌های مشابه تراشیده و حذف می‌گردند.

۴.۲ فرآیندهای جوشکاری ذوبی (Fusion Welding Processes)

امروزه لوله‌های فولادی جوشکاری شده ذوبی عمدتاً در قطرهای بالاتر از ۴۵۷/۲ میلی‌متر (۱۸ اینچ) تولید می‌شوند و به‌طور گسترده به‌عنوان لوله‌های بزرگ‌قطر در ساخت خطوط لوله مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیندهای مورد استفاده برای شکل‌دهی این لوله‌ها اساساً به شرح زیر است (شکل ۵۲).



شکل ۵۲ - فرایندهای شکل‌دهی لوله

- فرآیند خم سه‌غلته برای شکل‌دهی ورق، که به‌عنوان فرآیند شکل‌دهی سرد یا گرم به کار می‌رود.
- فرآیند پرس C-ing برای شکل‌دهی سرد ورق.
- فرآیند پرس U-ing و O-ing برای شکل‌دهی سرد ورق.
- فرآیند شکل‌دهی لوله مارپیچی (Spiral Tube Forming) برای شکل‌دهی سرد نوار یا ورق پهن.

در تأسیسات تولید انبوه امروزی، عمدتاً دو فرآیند اخیر (U-ing و O-ing و شکل‌دهی لوله مارپیچی) بیشترین کاربرد را در سطح جهان دارند و بنابراین در ادامه، بیشتر بر روی این دو فرآیند به‌طور مفصل بررسی خواهد شد.

فرآیند جوشکاری زیرپودری (Submerged-Arc Welding) یا ترکیبی از جوشکاری تثبیتی با گاز محافظ و جوشکاری زیرپودری در مراحل بعدی به‌طور گسترده به‌عنوان روش استاندارد برای جوشکاری لوله‌های بزرگ‌قطر پذیرفته شده است.

یکی دیگر از کاربردهای اصلی فرایندهای جوشکاری ذوبی، در تولید لوله و لوله‌های مارپیچی و طولی جوش‌خورده از فولادهای زنگ‌نزن آلیاژی بالا و فلزات غیرآهنی (مانند تیتانیوم، آلومینیوم، مس) دیده می‌شود. در این حالت، محصولات معمولاً به شکل لوله‌ها و لوله‌های نازک‌دیواره با قطر تقریباً ۱۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر تولید می‌شوند. علاوه بر فرآیند خالص TIG، روش‌های جوشکاری ترکیبی مختلفی نیز به کار گرفته می‌شوند، مانند:

• TP + TIG

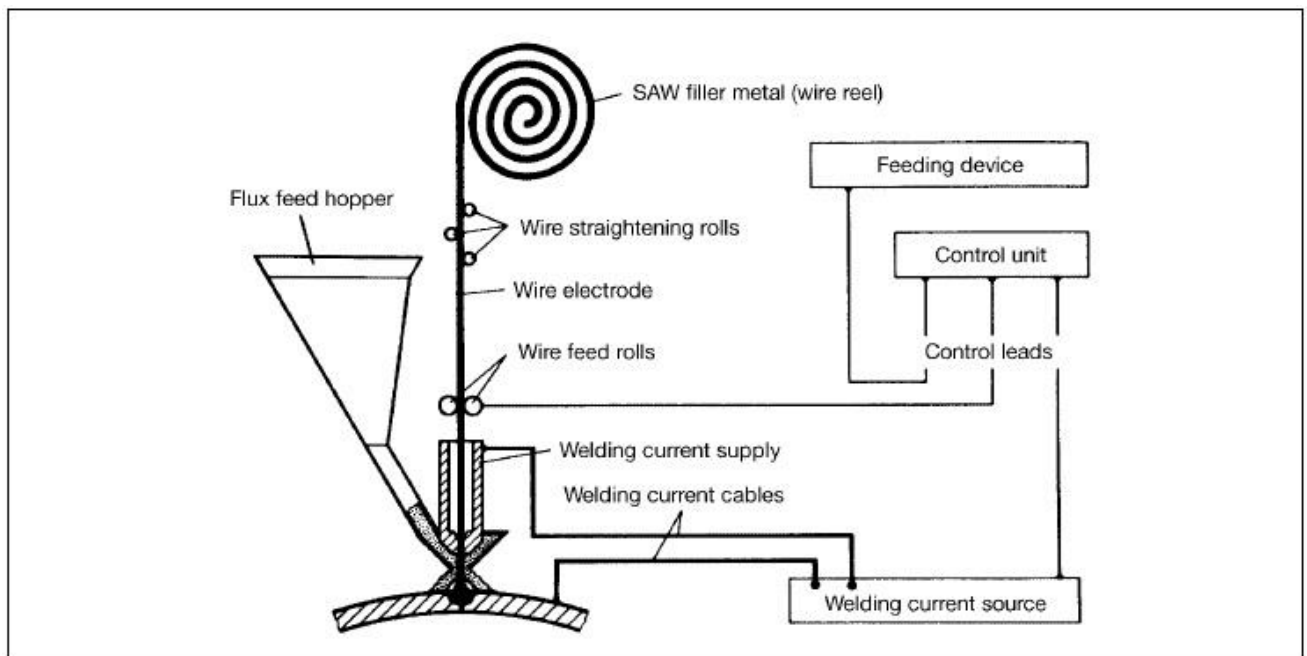
• TP + MIG

• TP + SAW

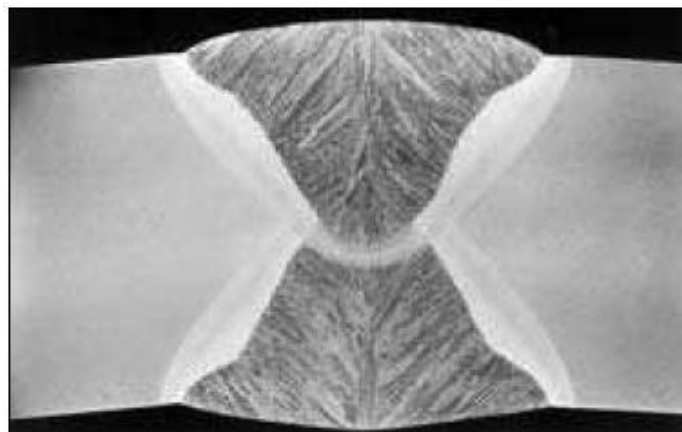
۴.۲.۱ فرآیند جوشکاری زیرپودری (Submerged-Arc Welding Process – SAW)

فرآیند جوشکاری زیرپودری (Submerged-Arc Welding – SAW) یک روش جوشکاری ذوبی الکتریکی است که با قوس پنهان انجام می‌شود. برخلاف جوشکاری قوسی با الکترودهای جوشکاری، در این روش قوس از دید مخفی بوده و زیر لایه‌ای از سرباره و flux می‌سوزد. یکی از ویژگی‌های شاخص جوشکاری زیرپودری، نرخ رسوب بالای فلز جوش آن است که اساساً ناشی از شدت جریان بالا به کار رفته همراه با تعادل حرارتی مطلوب می‌باشد.

فلز پرکننده مورد استفاده به شکل سیم جوش براق پیچیده شده است که به‌طور پیوسته توسط غلتک‌های تغذیه به داخل حوضچه فلز مذاب وارد می‌شود، سرعت تغذیه بر اساس نرخ رسوب فلز جوش تنظیم می‌گردد. درست بالای فلز پایه (لوله)، جریان جوشکاری از طریق تماس‌های لغزنده به الکترود سیمی منتقل شده و از طریق سیم اتصال به زمین که به فلز لوله وصل است، باز می‌گردد (شکل ۵۳).



شکل ۵۳ – فرآیند جوشکاری قوسی زیرپودری



شکل ۵۴ – جوش قوسی زیرپودری

قوس ایجاد شده باعث ذوب شدن سیم جوش ورودی و لبه‌های درز باز می‌شود. بخشی از فلکس جوشکاری که به‌طور پیوسته تغذیه می‌شود نیز توسط حرارت قوس ذوب شده و یک پوشش مایع از سرباره ایجاد می‌کند که حوضچه فلز جوش، الکترو سیمی ذوب‌شده و خود قوس را در برابر تأثیرات جوی محافظت می‌کند.

علاوه بر این، فلکس جوشکاری به تشکیل نخ جوش کمک می‌کند و به‌عنوان منبع عناصر آلیاژی عمل می‌کند تا کمبود ناشی از ذوب و اکسیداسیون جبران شود. در بسیاری از موارد، فلکس به‌طور ویژه برای آلیاژدهی فلز جوش به‌کار می‌رود تا خواص مکانیکی و شیمیایی خاصی به آن داده شود. با حرکت قوس، سرباره مایع باقی‌مانده جامد می‌شود.

فلکس جوشکاری که ذوب نشده است، توسط استخراج با خلأ جمع‌آوری شده و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرباره پس از سخت شدن به راحتی جدا می‌شود. ترکیب شیمیایی سیم جوش و فلکس جوشکاری باید با فلز پایه‌ای که جوش می‌شود هماهنگ باشد. جوشکاری زیرپودری لوله‌ها معمولاً به روش دو پاسه انجام می‌شود (یعنی پاس اول و سپس پاس پشتیبان یا مهر و موم‌کننده). معمولاً ابتدا پاس داخلی و سپس پاس خارجی اجرا می‌شود. این ترتیب باعث می‌شود که دو پاس به‌طور کافی هم‌پوشانی داشته باشند (شکل ۵۴).

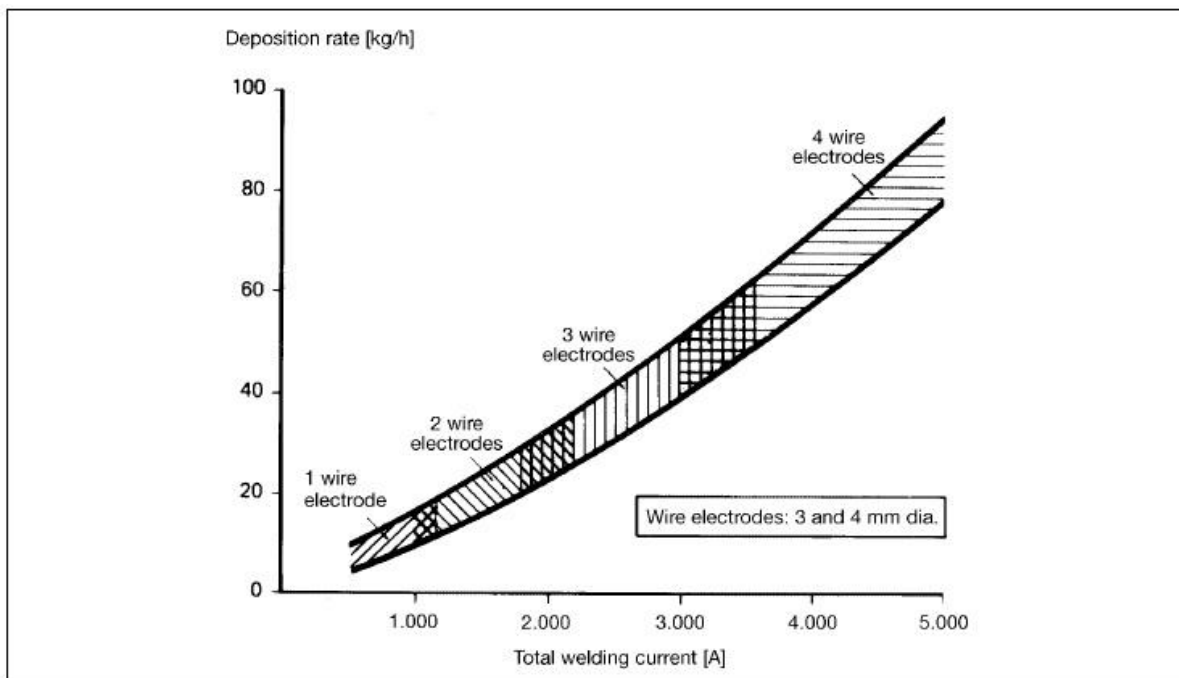
نتیجه این فرآیند جوش ذوبی است که معمولاً نیازی به عملیات حرارتی بیشتر ندارد. جوشکاری زیرپودری می‌تواند با جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) انجام شود و در سیستم‌های چندسیمی، ترکیبی از DC و AC نیز قابل استفاده است. کارایی این فرآیند جوشکاری با نرخ رسوب فلز پرکننده در واحد زمان (Rate of Deposition) و سرعت جوشکاری حاصل که همواره بالا است مشخص می‌شود.

نرخ رسوب فلز پرکننده را می‌توان با افزایش جریان جوشکاری افزایش داد. با این حال، به دلیل ظرفیت محدود عبور جریان فلکس جوشکاری، عملکرد در جوشکاری تک‌سیمی تنها تا حداکثر جریان ورودی حدود ۱۲۰۰ آمپر قابل افزایش است.

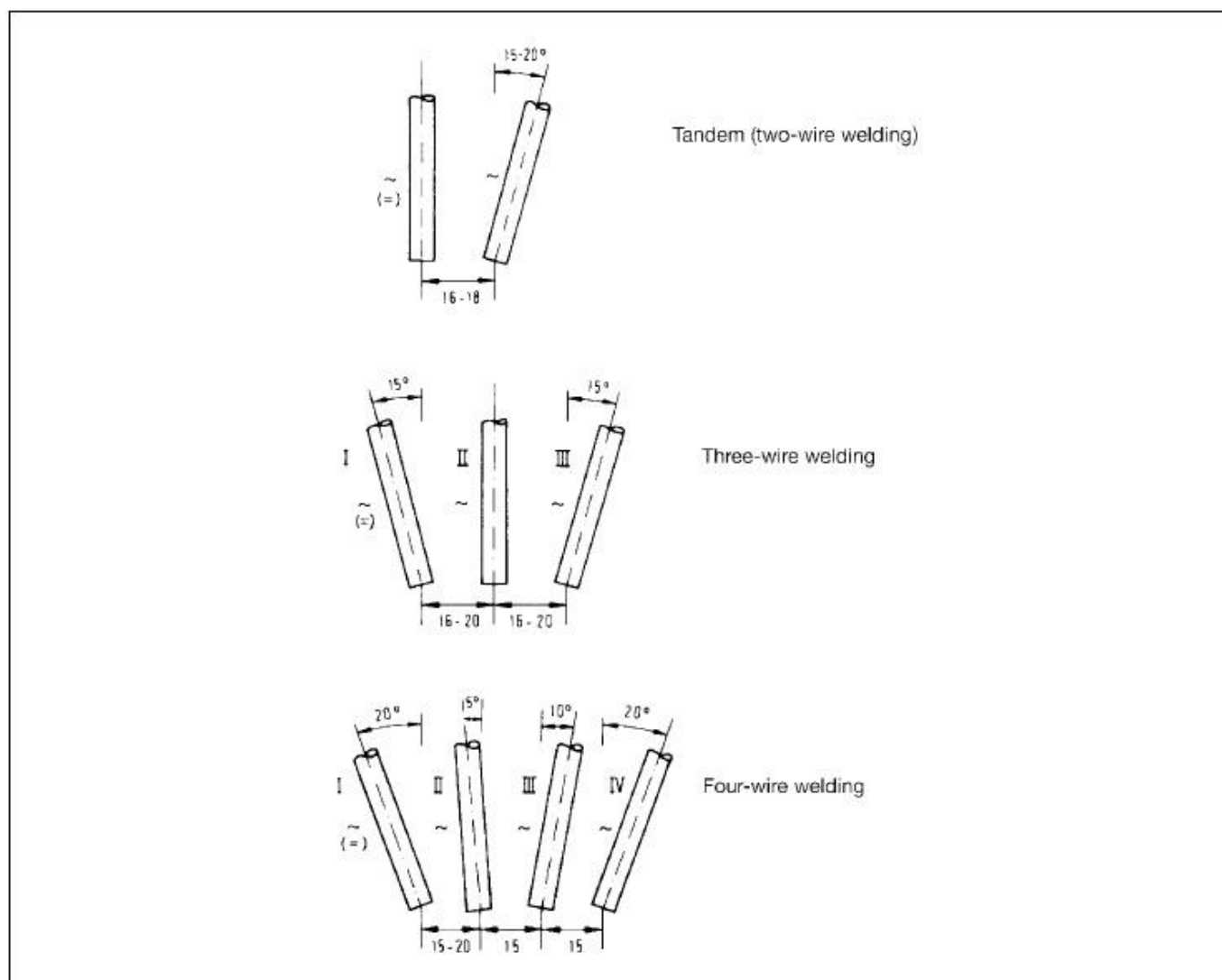
هر گونه افزایش در نرخ رسوب فلز پرکننده فراتر از این حد، مستلزم استفاده از چندین الکترو سیمی است. این کار امکان اعمال جریان کلی بالاتر برای جوشکاری را فراهم می‌کند، بدون آن‌که خطر عبور جریان بیش از ظرفیت فلکس در هر یک از الکترودهای سیمی منفرد وجود داشته باشد. در عملیات عملی، افزایش کارایی با به‌کارگیری پیکربندی چندسیمی جوشکاری با ۲، ۳ یا ۴ الکترودها به دست می‌آید.

شکل ۵۵ نرخ رسوب فلز پرکننده را بر حسب نوع فرآیند جوشکاری نشان می‌دهد.

پیکربندی‌های سیم مورد استفاده در جوشکاری چندالکتروده در شکل ۵۶ نشان داده شده است.



شکل ۵۵ - نرخ رسوب در جوشکاری قوسی زیرپودری



شکل ۵۶ - پیکربندی سیم‌ها در جوشکاری قوسی زیرپودری چندسیمی (فاصله‌های بین سیم‌ها بر حسب میلی‌متر)

نرخ رسوب بالاتر که در جوشکاری چن‌دسیمی حاصل می‌شود، به‌طور طبیعی در شرایط تولید عملی، به سرعت جوشکاری بالاتر منجر می‌گردد. با استفاده از فلکس‌های با عملکرد بالا امروزی، فرآیند جوشکاری سه‌سیمی معمولاً برای ضخامت دیواره تا ۲۰ میلی‌متر به‌طور کافی کارآمد است.

زمانی که ضخامت دیواره بیش از ۲۰ میلی‌متر باشد، از یک الکترو سیمی چهارم استفاده می‌شود تا سرعت جوشکاری حفظ شده و در نتیجه کارایی تولید افزایش یابد. یکی از پیش‌نیازهای استفاده اقتصادی از جوشکاری چن‌دسیمی این است که پارامترهای فرآیند بهینه‌سازی شوند تا دستیابی مطمئن به الزامات کیفیت مشخص‌شده برای جوش تضمین گردد.

در عمل، سرعت‌های جوشکاری به‌دست آمده معمولاً بین ۱ تا ۲/۵ متر در دقیقه قرار دارند و در برخی موارد بسته به فرآیند جوشکاری، ضخامت دیواره و نوع فلکس استفاده شده، تا ۳ متر در دقیقه نیز افزایش می‌یابند.

۴.۲.۲ فرآیندهای جوشکاری قوسی با محافظ گازی (Gas-Shielded Arc Welding Processes)

مشابه جوشکاری زیرپودری، جوشکاری قوسی با محافظ گازی نیز یک فرآیند جوشکاری ذوبی الکتریکی است.

حوضچه جوش توسط تأثیرات قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. قوس به‌وضوح قابل مشاهده است، زیرا بین الکترو و قطعه کار می‌سوزد. الکترو، قوس و حوضچه جوش توسط گاز محافظ خنثی یا فعال که به‌طور پیوسته به منطقه جوشکاری تزریق می‌شود، در برابر تأثیرات جوی محافظت می‌گردند.

فرآیندهای جوشکاری قوسی با محافظ گازی بر اساس نوع الکترو و گاز به‌کار رفته دسته‌بندی می‌شوند.

طبق استاندارد DIN 1910 (بخش ۴)، این فرآیندها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- جوشکاری قوسی با تنگستن و گاز

- جوشکاری تنگستن با گاز خنثی (TIG)

- جوشکاری قوسی پلاسما با تنگستن (TP)

- جوشکاری قوسی تنگستن-هیدروژن (THG)

- جوشکاری قوسی با فلز و گاز

- جوشکاری فلز با گاز خنثی (MIG)

- جوشکاری فلز با گاز فعال (MAG)

فرآیندهایی که عمدتاً برای تولید لوله و لوله‌های فولادی به‌کار می‌روند، روش‌های TIG، MIG و MAG هستند.

فرآیندهای جوشکاری TIG و MIG عمدتاً برای تولید لوله‌های استنلس استیل استفاده می‌شوند. در فرآیند TIG، قوس بین الکترو تنگستن غیرذوب‌شونده (الکترو غیرمصرفی) و قطعه کار ایجاد می‌شود. فلز پرکننده، عمدتاً بدون اعمال جریان مستقیم تغذیه می‌شود. گاز محافظ از طریق نازل گاز جریان می‌یابد و الکترو، فلز پرکننده و حوضچه مذاب را از تماس با هوا محافظت می‌کند.

گاز محافظ خنثی است و معمولاً به شکل آرگون، هلیوم یا مخلوطی از این دو به کار می‌رود.

در فرآیندهای MIG و MAG، برخلاف فرآیند TIG، قوس بین قطعه کار و یک الکترو ذوب‌شونده و مصرفی ایجاد می‌شود، یعنی همان منبع فلز پرکننده.

گاز محافظ مورد استفاده در MIG خنثی است و معمولاً به شکل آرگون، هلیوم یا مخلوطی از این دو به کار می‌رود. در MAG، گاز محافظ فعال است و می‌تواند CO₂ خالص یا مخلوط گازی شامل معمولاً CO₂، O₂ و آرگون باشد.

فرآیند MAG به‌طور فزاینده‌ای برای جوشکاری تثبیتی (Tack-Welding) در تولید لوله‌های مارپیچی و طولی بزرگ‌قطر به کار می‌رود. جوش تثبیتی همچنین به‌عنوان پشتیبان حوضچه جوش برای فرآیند جوشکاری زیرپودری بعدی عمل می‌کند. پیش‌نیازهای یک جوش بهینه شامل آماده‌سازی دقیق لبه‌ها (اتصال دو V با سطح ریشه گسترده) و جوش تثبیتی خوب و پیوسته است. در تولید لوله‌های بزرگ‌قطر، سرعت‌های جوشکاری برای جوش تثبیتی معمولاً بین حدود ۵ تا ۱۲ متر در دقیقه قرار دارد.



شکل ۵۷ - تسطیح دو لبه طولی شامل زبانه‌های ابتدای ورق و انتهای ورق (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)

۴.۲.۳ تولید لوله‌های جوش خورده طولی (فرآیند U-ing/O-ing)

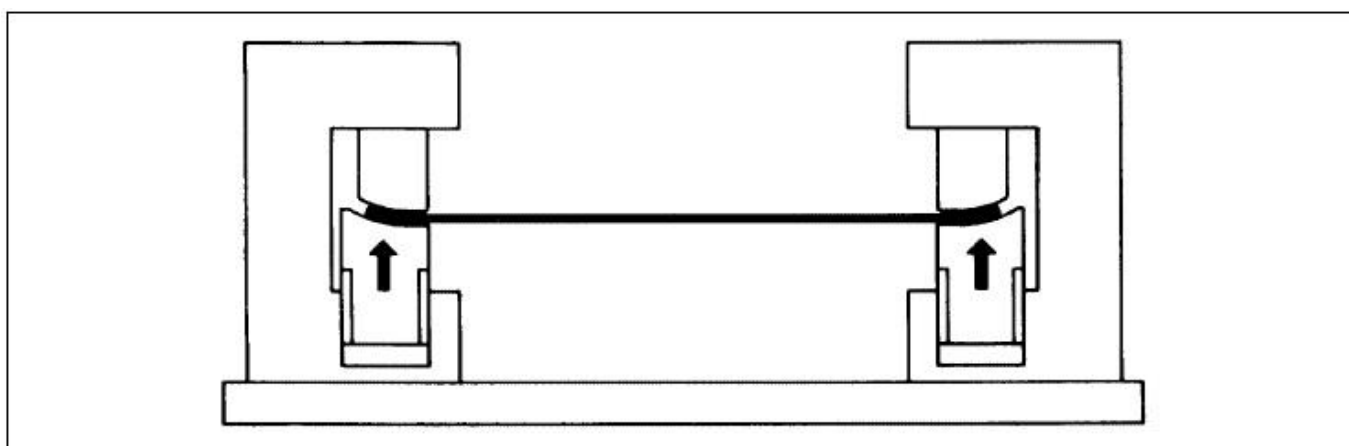
ورق‌های مورد استفاده برای تولید لوله‌های جوش خورده طولی روی پرس‌هایی با قالب‌های باز برای عملیات U-ing و قالب‌های بسته برای عملیات O-ing شکل داده می‌شوند. این فرآیند گاهی اوقات به‌عنوان فرآیند UOE (U-ing, O-ing, Expanding) نیز شناخته می‌شود و در تولید لوله‌های طولی بزرگ‌قطر با طول‌های فردی تا ۱۸ متر به کار می‌رود. کارخانه‌های مدرن که از این فرآیند استفاده می‌کنند، برای دامنه قطر لوله تقریباً از ۴۰۰ تا ۱۶۲۰ میلی‌متر طراحی شده‌اند. بسته به نوع ماده و قطر لوله، ضخامت دیواره‌ها بین ۶ تا ۴۰ میلی‌متر متغیر است. مواد اولیه معمولاً به شکل ورق فولادی است، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد.

در ابتدای فرآیند تولید، تب‌های شروع و پایان (run-in و run-off) به ورق‌های صاف جوش داده می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که پدیده‌های شروع و پایان قوس در جوشکاری زیرپودری خارج از فلز واقعی لوله رخ می‌دهند.

پیش از آنکه ورق توسط مراحل مختلف و پرس‌های شکل‌دهی به لوله با درز باز خم شود، دو لبه طولی آن در رنده‌کاری ماشین‌کاری می‌شوند تا موازی بودن لبه‌ها تضمین شود و شیب جوشکاری (Welding Bevel) مورد نیاز برای ضخامت ورق نیز ایجاد گردد (شکل ۵۷).

در مرحله اول شکل‌دهی (شکل ۵۸)، ورق در ناحیه لبه‌های طولی خود خمیده و چین‌خورده (Crimped) می‌شود. شعاع خم تقریباً معادل قطر لوله با درز باز است. عملیات چین‌خوردگی در پرس‌های شکل‌دهی ویژه انجام می‌شود.

در مرحله دوم (شکل ۵۹)، ورق در یک مرحله به شکل U خم می‌شود. در این عملیات، یک ابزار با شعاع دایره‌ای ورق را بین دو تکیه‌گاه به سمت پایین هدایت می‌کند. در پایان عملیات، فاصله بین تکیه‌گاه‌ها کاهش می‌یابد تا مقداری خم بیش از حد (Over Bend) اعمال شود و اثر بازگشت فنری (Spring-Back) جبران گردد.



شکل ۵۸ - لبه‌های طولی ورق را کریمپ کردن (خم‌کاری و قفل کردن لبه‌ها)



شکل ۵۹ - شکل‌دهی در پرس U-ing (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)

در مرحله سوم شکل‌دهی، شکل U در پرس O-ing قرار می‌گیرد تا در یک عملیات، لوله گرد با درز باز تولید شود.

فرآیندهای تغییر شکل انجام‌شده در پرس‌های U-ing و O-ing به‌گونه‌ای هماهنگ می‌شوند که اثر بازگشت فنری (spring-back) به‌طور مؤثر جبران شود و لوله با درز باز تا حد امکان گرد و لبه‌های طولی هم‌سطح باشد. این عملیات نیازمند نیروهای بالای پرس است.

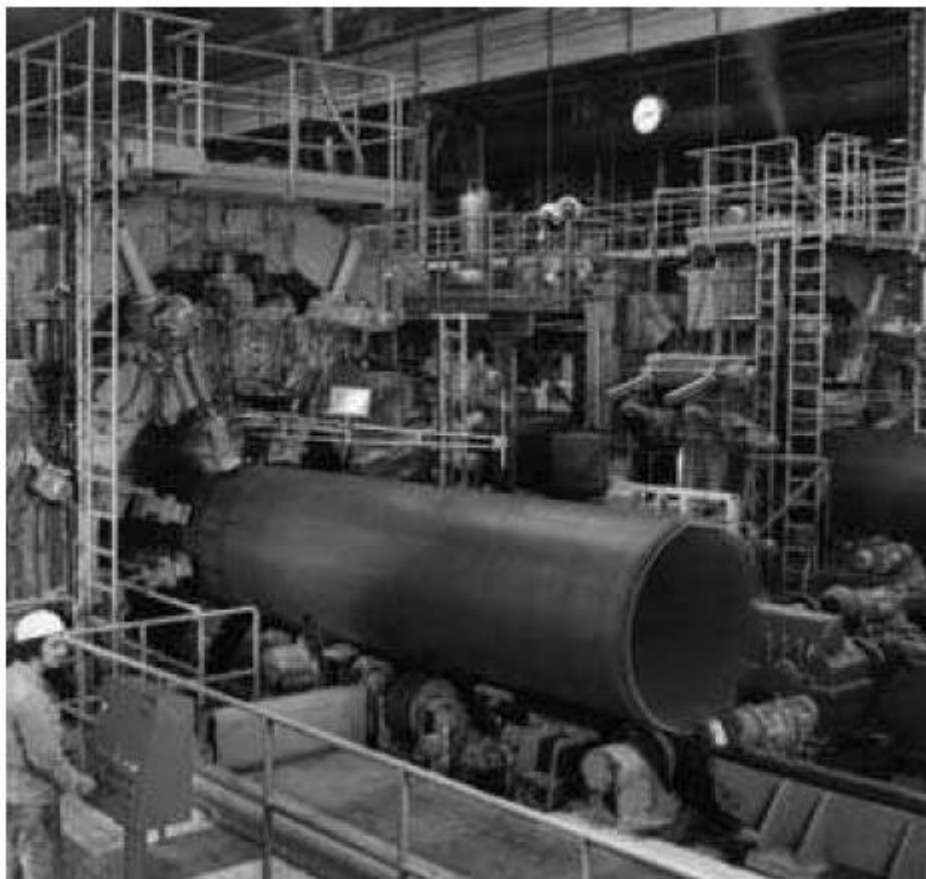
شکل ۶۰ یک پرس O-ing با ظرفیت ۶۰۰ مگا نیوتن (MN) را نشان می‌دهد (در حال حاضر بزرگ‌ترین پرس O-ing در جهان).



شکل ۶۰ - تکمیل لوله با درز باز در پرس O-ing (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)

سپس لبه‌های لوله با درز باز در ایستگاه‌های جوش تثبیتی (Tack-welding) به هم فشرده می‌شوند (تا هرگونه جابجایی حذف شود) که ممکن است به شکل قفسه‌های غلتکی طراحی شده باشند، و سپس توسط جوشکاری MAG خودکار، یک درز پیوسته ایجاد می‌گردد (شکل ۶۱). بسته به ضخامت لوله، سرعت جوشکاری اعمالی معمولاً بین ۵ تا ۱۲ متر در دقیقه است.

لوله‌های تثبیت‌شده با جوش tack سپس توسط میز غلتکی و سیستم توزیع به ایستگاه‌های جوشکاری زیرپودری منتقل می‌شوند، جایی که در خطوط جداگانه ابتدا پاس داخلی و سپس پاس خارجی اعمال می‌شود. این پاس‌ها با حرکت لوله روی یک واگن زیر یک سر جوشکاری ثابت ایجاد می‌شوند. برای پاس داخلی، سر جوشکاری روی یک بازوی قابل حرکت نصب می‌شود که وارد داخل لوله می‌گردد. برای جلوگیری از هرگونه جابجایی درز جوش (Weld Offset)، هر دو سر جوشکاری پاس داخلی و خارجی به‌طور پیوسته پایش و کنترل می‌شوند تا هماهنگی کامل با خط مرکزی جوش حفظ شود. هر یک از فرآیندهای چندسیمی جوش زیرپودری (SAW) که پیش‌تر شرح داده شد، بسته به ابعاد لوله (قطر و ضخامت دیواره) قابل استفاده است (بخش ۴.۲.۱ را ببینید). شکل ۶۲ خطوط جوشکاری پاس داخلی را نشان می‌دهد.



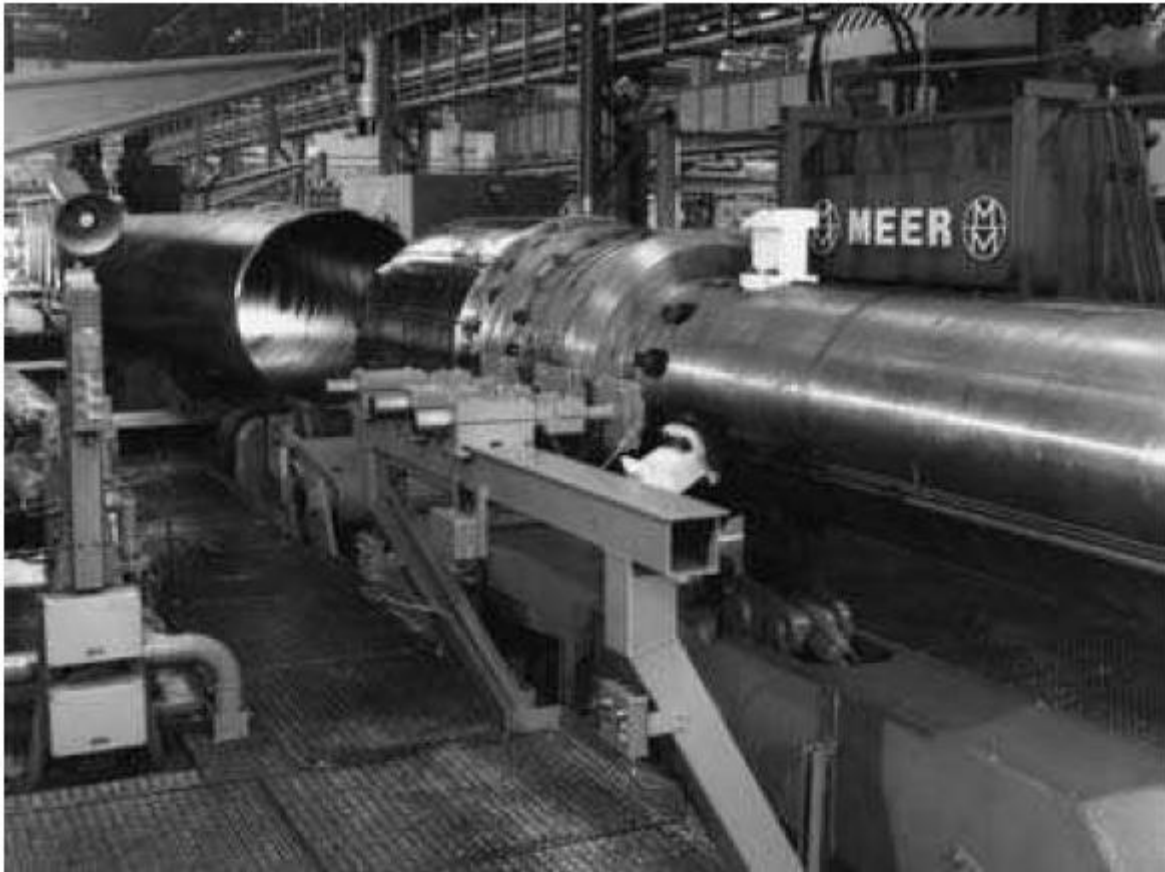
شکل ۶۱ - جوش موقت طولی پیوسته لوله خطی با قطر بزرگ (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)



شکل ۶۲ - جوش قوسی زیرپودری پاس داخلی طولی لوله خطی با قطر بزرگ (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)

پس از جوشکاری، لوله‌ها به بخش تکمیل (finishing department) منتقل می‌شوند.

لوله‌های جوش خورده به صورت اولیه هنوز قادر به رعایت مشخصات تolerانس قطر و گردی نیستند. بنابراین، در بخش تکمیل، ابتدا بازرسی کامل انجام می‌شود و سپس توسط بازکننده‌های هیدرولیکی یا مکانیکی تحت فرآیند انبساط سرد (Cold Expansion) قرار می‌گیرند (شکل ۶۳). میزان انبساط اعمالی تقریباً ۱٪ است و این مقدار هنگام تعیین محیط اولیه لوله با درز باز در نظر گرفته می‌شود.

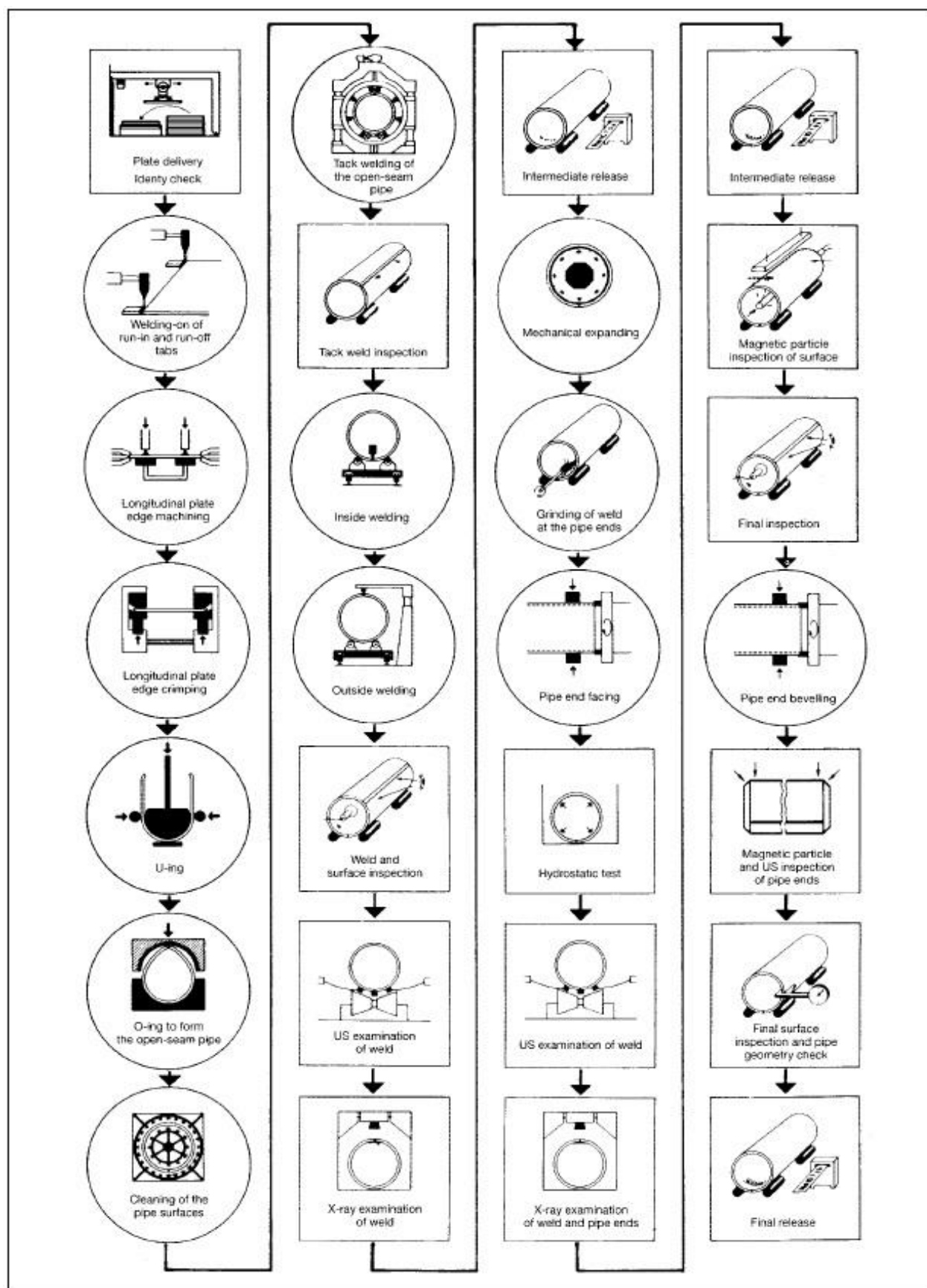


شکل ۶۳ - گسترش مکانیکی (عکس از کارخانه EUROPIPE GmbH)

فرآیند تولید در بخش تکمیل با ماشین‌کاری انتهای لوله و انجام هرگونه اصلاحات لازم (Rework) به اتمام می‌رسد.

پیش از عملیات ماشین‌کاری نهایی انتهای لوله، لوله‌ها تحت آزمون هیدرواستاتیک قرار می‌گیرند. سپس بازرسی نهایی التراسونیک در طول کامل ناحیه جوش انجام می‌شود. نشانه‌های آشکار شده توسط این بازرسی خودکار و همچنین ناحیه‌های جوش در انتهای لوله‌ها، به طور اضافی توسط بازرسی پرتو ایکس (X-ray) بررسی می‌شوند. تمامی انتهای لوله‌ها نیز برای لایه‌لایه شدن (Laminations و Laps) با روش التراسونیک بازرسی می‌شوند. به عنوان بخشی از رژیم تضمین کیفیت (Quality Assurance)، هم بازرسی‌های غیرمخرب در حین فرآیند و هم آزمون‌های مکانیکی خارج از خط تولید در طول پیشرفت تولید انجام می‌شوند. پس از اینکه لوله‌ها با موفقیت از تمام مراحل آزمون و بازرسی، از جمله کنترل ابعاد عبور کردند، برای بازرسی نهایی و تأیید کیفیت ارائه می‌شوند.

مهم‌ترین مراحل ساخت و بازرسی که در یک کارخانه مدرن برای تولید لوله‌های بزرگ قطر به کار می‌روند، به صورت شماتیک در شکل ۶۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶۴ -جدول زمان‌بندی عملیات تولید و آزمون در یک کارخانه مدرن برای جوش طولی لوله‌های خطی با قطر بزرگ
 دایره = مرحله تولید؛ مربع = مرحله آزمون

۴.۲.۴ تولید لوله مارپیچی (Spiral Pipe Production)

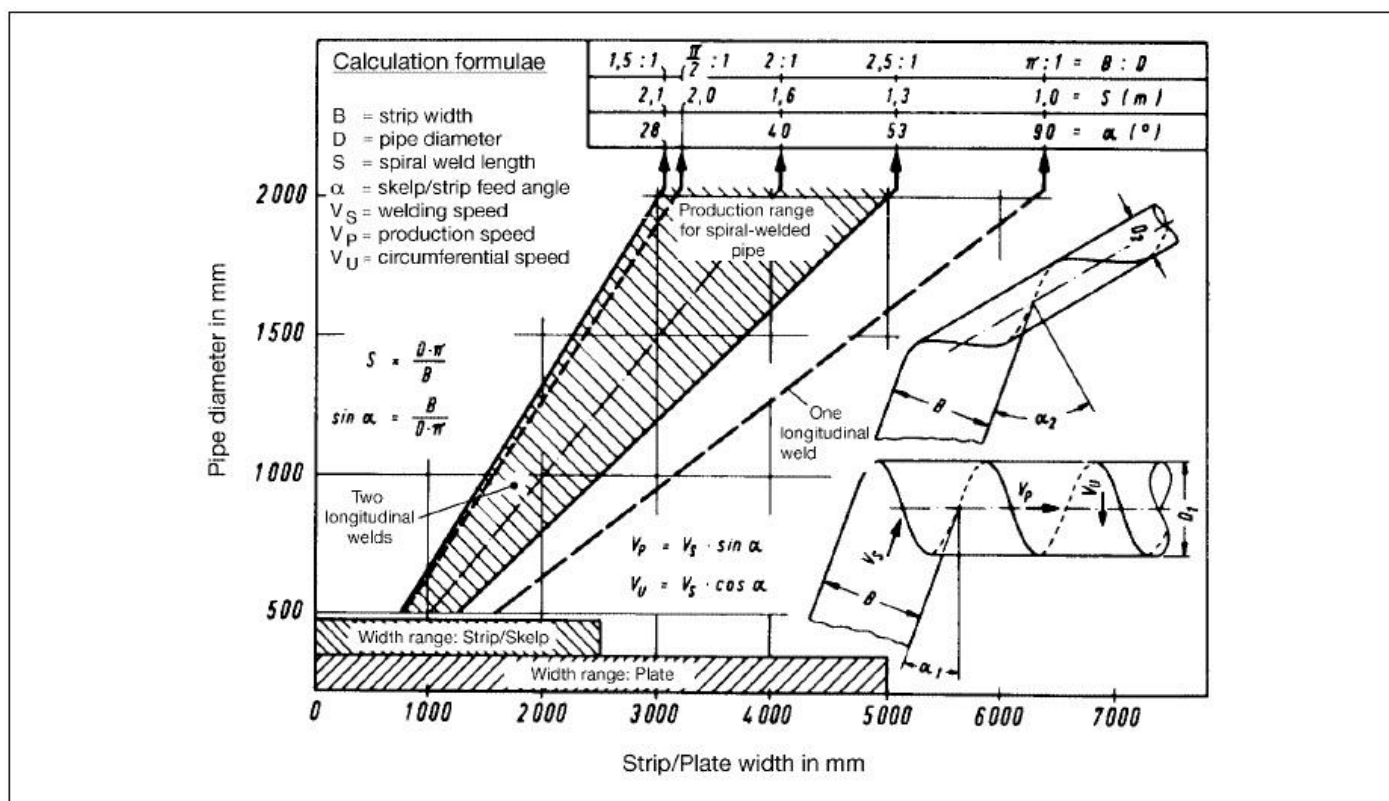
در تولید لوله مارپیچی (که به آن لوله با درز حلزونی یا هلیکال نیز گفته می‌شود)، نوار یا ورق گرم به صورت پیوسته توسط یک تجهیزات شکل‌دهی مارپیچی به شکل لوله درآمده و لبه‌های مجاور نوار نیز به‌طور پیوسته در خط جوش داده می‌شوند.

برخلاف تولید لوله‌های طولی جوش خورده که هر قطر لوله نیازمند عرض ورق مشخصی است، تولید لوله مارپیچی با این ویژگی متمایز می‌شود که قطرهای مختلف لوله می‌توانند از یک نوار (Skelp) یا عرض ورق واحد تولید شوند.

این امر به این دلیل است که زاویه ورودی نوار به واحد شکل‌دهی قابل تنظیم است. هرچه این زاویه ورودی کوچک‌تر باشد، قطر لوله بزرگ‌تر خواهد بود (برای یک عرض نوار مشخص).

بهینه فنی و اقتصادی در تولید لوله مارپیچی زمانی حاصل می‌شود که نسبت قطر لوله به عرض ماده اولیه بین ۱:۲ تا ۱:۲/۲ باشد.

شکل ۶۵ نسبت قطر لوله به عرض ماده اولیه را در مقایسه بین تولید لوله‌های طولی جوش خورده و لوله مارپیچی نشان می‌دهد، و همچنین وابستگی‌های ریاضی که در تولید لوله مارپیچی بین زاویه تغذیه، عرض نوار Skelp و قطر لوله برقرار است را نمایش می‌دهد.



شکل ۶۵ - عرض ورق نسبت به قطر لوله (مقایسه بین تولید لوله‌های جوش طولی و لوله‌های مارپیچ)

در وضعیت فعلی فناوری تولید لوله‌های بزرگ‌قطر، دامنه قطر لوله‌هایی که با فرآیند جوشکاری مارپیچی تولید می‌شوند تقریباً بین ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ میلی‌متر قرار دارد. برای ضخامت دیواره‌های لوله تا حدود ۲۰ میلی‌متر، مواد اولیه به شکل نوار پهن نورد گرم به کار می‌روند. برای ضخامت دیواره‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر، معمولاً از ورق‌هایی با طول‌های فردی تا ۳۰ متر استفاده می‌شود.

روش‌های تولید لوله مارپیچی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- تأسیسات با خطوط یکپارچه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW)

- تأسیسات با خطوط جداگانه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW)

۴.۲.۴.۱ تولید لوله مارپیچی در خطوط یکپارچه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (Integrated Forming and SAW Welding Lines)

خط تولید یکپارچه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW) را می‌توان به‌عنوان تأسیسات تولید لوله مارپیچی سنتی‌تر در نظر گرفت. در این پیکربندی، فرآیند تولید شامل مراحل زیر می‌باشد:

• مرحله آماده‌سازی نوار، و

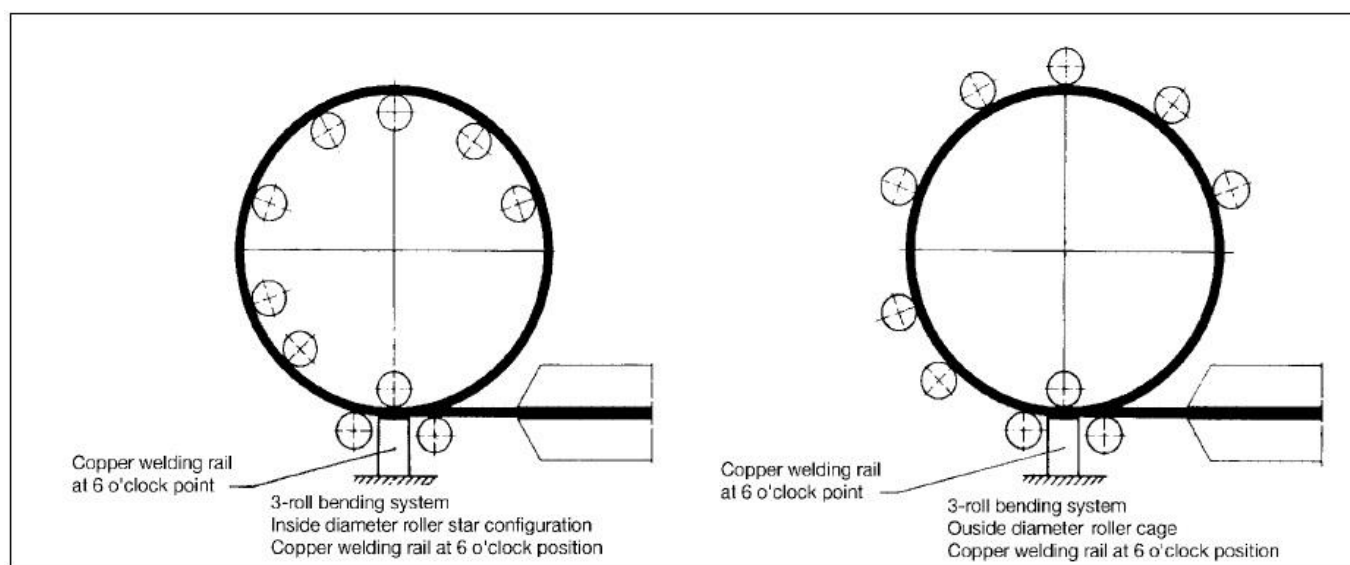
• عملیات شکل‌دهی لوله با جوشکاری زیرپودری پاس داخلی و خارجی به‌صورت همزمان.

علاوه بر جوش دادن نوارها یا ورق‌ها به یکدیگر (که skelp را تشکیل می‌دهد)، مرحله آماده‌سازی نوار همچنین برای صاف کردن skelp و برش دقیق به عرض مشخص نیز انجام می‌شود. لبه‌های skelp باید با دقت بالا و در تolerانس‌های دقیق ماشین‌کاری شوند، و همچنین باید عملیات چین‌خوردگی لبه‌ها به‌طور تعریف‌شده انجام شود تا از تشکیل غیرمجاز برآمدگی‌ها یا قله‌ها جلوگیری شود، زیرا این امر برای موفقیت عملیات شکل‌دهی لوله ضروری است. شکل ۶۸ (همچنین به بخش ۴.۲.۴.۲ مراجعه کنید) یک نمایش شماتیک از فرآیندهای آماده‌سازی نوار و شکل‌دهی لوله را در پیکربندی تولید لوله مارپیچی دو مرحله‌ای ارائه می‌دهد.

نوار که از دستگاه بازکن (Uncoiler) تغذیه می‌شود، به انتهای عقب کلاف قبلی با جوشکاری زیرپودری (SAW) از بالا متصل می‌شود. جوش در سطحی که بعداً بخش از سطح داخلی لوله را تشکیل خواهد داد، deposit می‌شود. سپس پاس SAW خارجی در یک خط جداگانه روی لوله تکمیل شده اجرا می‌شود. بعد از آن، نوار skelp/ از مجموعه صاف‌کننده عبور کرده و توسط ماشین برش لبه‌ها (Edge Trimmer) به عرض ثابت بریده می‌شود. ابزار اضافی نیز لبه‌ها را شیب‌دار می‌کنند تا برای عملیات اصلی جوشکاری زیرپودری آماده شوند. قبل از ورود به بخش شکل‌دهی، لبه‌های نوار چین‌خورده می‌شوند تا از تشکیل برآمدگی یا قله در محل جوش جلوگیری شود.

در یک تأسیسات یکپارچه، مرحله آماده‌سازی نوار بلافاصله پس از آن به فرآیند شکل‌دهی با جوشکاری زیرپودری داخلی و خارجی همزمان می‌رسد. یک واحد غلتک فشاری (Pinch-Roll) نوار را با زاویه ورودی از پیش تعیین‌شده به بخش شکل‌دهی ماشین تغذیه می‌کند.

هدف از بخش شکل‌دهی این است که نوار با عرض B را با زاویه تغذیه مشخص به یک سیلندر لوله‌ای با قطر D خم کند، به‌گونه‌ای که با وابستگی‌های ریاضی نشان داده شده در شکل ۶۵ هماهنگ باشد.



شکل ۶۶ - فرآیندهای شکل‌دهی لوله مارپیچ

برای تولید لوله‌های مارپیچی از تکنیک‌های مختلف شکل‌دهی استفاده می‌شود. علاوه بر فرآیند شکل‌دهی کفش مستقیم (direct forming shoe) که محدودیت‌هایی دارد، دو روش اصلی وجود دارد که معمولاً به کار گرفته می‌شوند (شکل ۶۶):

. خم‌کاری با ۳ غلتک و قفس غلتکی قطر داخلی

. خم‌کاری با ۳ غلتک و قفس غلتکی قطر خارجی

در سیستم خم‌کاری با ۳ غلتک، به جای استفاده از یک غلتک شکل‌دهی واحد، از چندین غلتک راه‌دهنده و شکل‌دهنده فردی استفاده می‌شود. قفس غلتکی برای ثابت نگه‌داشتن محور لوله و حداکثر کردن گردی لوله به کار می‌رود تا از نزدیک شدن بدون جابجایی لبه‌های نوار در نقطه جوش اطمینان حاصل شود. این کار به دستیابی به ابعاد دقیق لوله کمک می‌کند، به طوری که لوله خروجی از دستگاه از پیش به تolerانس‌های استاندارد قطر، گردی و راستای مورد نظر تولید می‌شود.

بنابراین، انبساط/اندازه‌گیری لوله‌ها پس از جوشکاری ضروری نخواهد بود.

در دستگاه شکل‌دهی لوله مارپیچی و جوشکاری زیرپودری (SAW)، لبه‌های نوار هم‌راستا ابتدا در موقعیت حدود ۶ ساعت جوشکاری داخلی می‌شوند و سپس، پس از یک نیم‌چرخ لوله، در موقعیت ۱۲ ساعت جوشکاری خارجی انجام می‌شود. تنظیم سر جوشکاری به مرکز جوش و کنترل شکاف (gap control) به طور خودکار انجام می‌شود.

سپس رشته لوله تولید شده توسط یک دستگاه برش پروازی (flying parting-off device) به طول مورد نظر بریده می‌شود.

سپس لوله‌های مشخص شده به بخش تکمیل منتقل می‌شوند، جایی که فرآیند تولید با ماشین‌کاری انتهای لوله و انجام هرگونه اصلاحات لازم به اتمام می‌رسد. پیش از ماشین‌کاری لبه‌های لوله، لوله‌ها تحت آزمون هیدرواستاتیک قرار می‌گیرند (شکل ۶۷). سپس تمام ناحیه جوش با الترسونیک بازرسی می‌شود و ناحیه‌های جوش در انتهای لوله‌ها نیز با پرتو ایکس بازرسی می‌شوند.



شکل ۶۷- خط آزمون هیدرواستاتیک همراه با بخش ماشین کاری انتهای لوله در پایین دست (عکس از کارخانه Salzgitter Großrohre GmbH):

علاوه بر این، هر انتهای لوله نیز به‌طور الترسونیک در تمام محیط برای لایه‌لایه شدن (Laps) و لایه‌های داخلی (Laminations) بازرسی می‌شود. در صورت نیاز، ناحیه جوش و همچنین فلز پایه (Parent Metal) پس از آزمون هیدرواستاتیک ممکن است الترسونیک بازرسی شوند.

به‌عنوان بخشی از رژیم تضمین کیفیت (Quality Assurance)، هم بازرسی‌های غیرمخرب در حین فرآیند و هم آزمون‌های مکانیکی خارج از خط تولید در طول پیشرفت تولید انجام می‌شوند. پس از اینکه لوله‌ها با موفقیت از تمام مراحل آزمون و بازرسی، از جمله کنترل ابعاد عبور کردند، برای بازرسی نهایی و تأیید کیفیت (Acceptance) ارائه می‌شوند.

بهره‌وری این فرآیند به سرعت عملیات جوشکاری زیرپودری (SAW) بستگی دارد. فرآیند شکل‌دهی لوله قادر است به سرعت‌های تولید بسیار بالاتری دست یابد.

به منظور بهره‌برداری بهتر از کارایی بخش شکل‌دهی لوله مارپیچی، تأسیسات جدیدتر بر اساس خطوط جداگانه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW) طراحی می‌شوند.

در این حالت، دستگاه شکل‌دهی لوله مارپیچی دارای تأسیسات جوشکاری تکی (tack-welding) است که قادر به دستیابی به سرعت‌های تولید مشابه با بخش شکل‌دهی می‌باشد.

سپس جوشکاری زیرپودری (SAW) درزها به‌طور آفلاین در چندین دستگاه جوشکاری جداگانه انجام می‌شود.

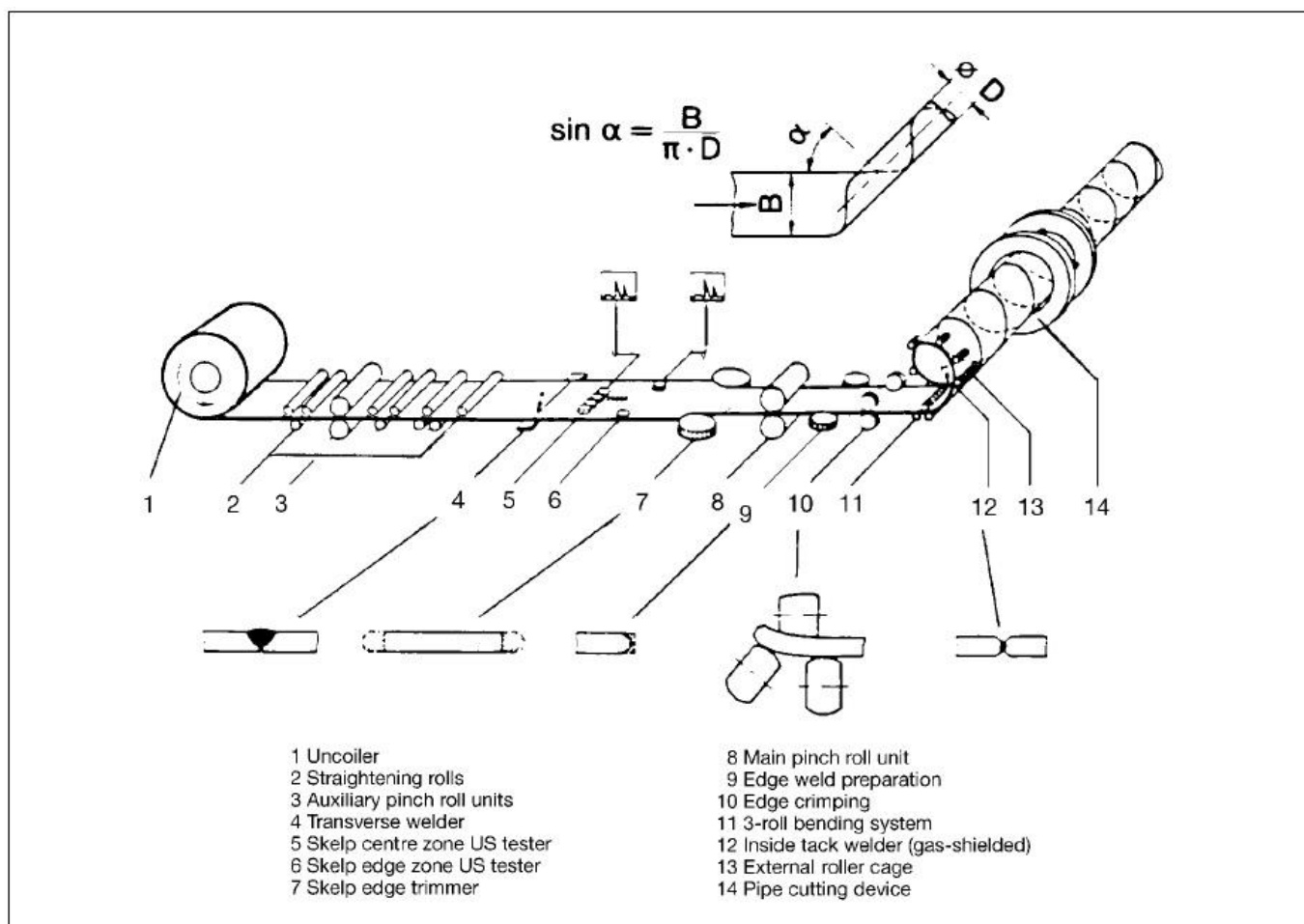
۴.۲.۴.۲ تولید لوله مارپیچی با خطوط جداگانه شکل‌دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW)

ویژگی اصلی این فناوری جدید این است که دو فرآیند تولید جداگانه وجود دارد:

مرحله ۱ - شکل‌دهی لوله با جوشکاری تکی یکپارچه

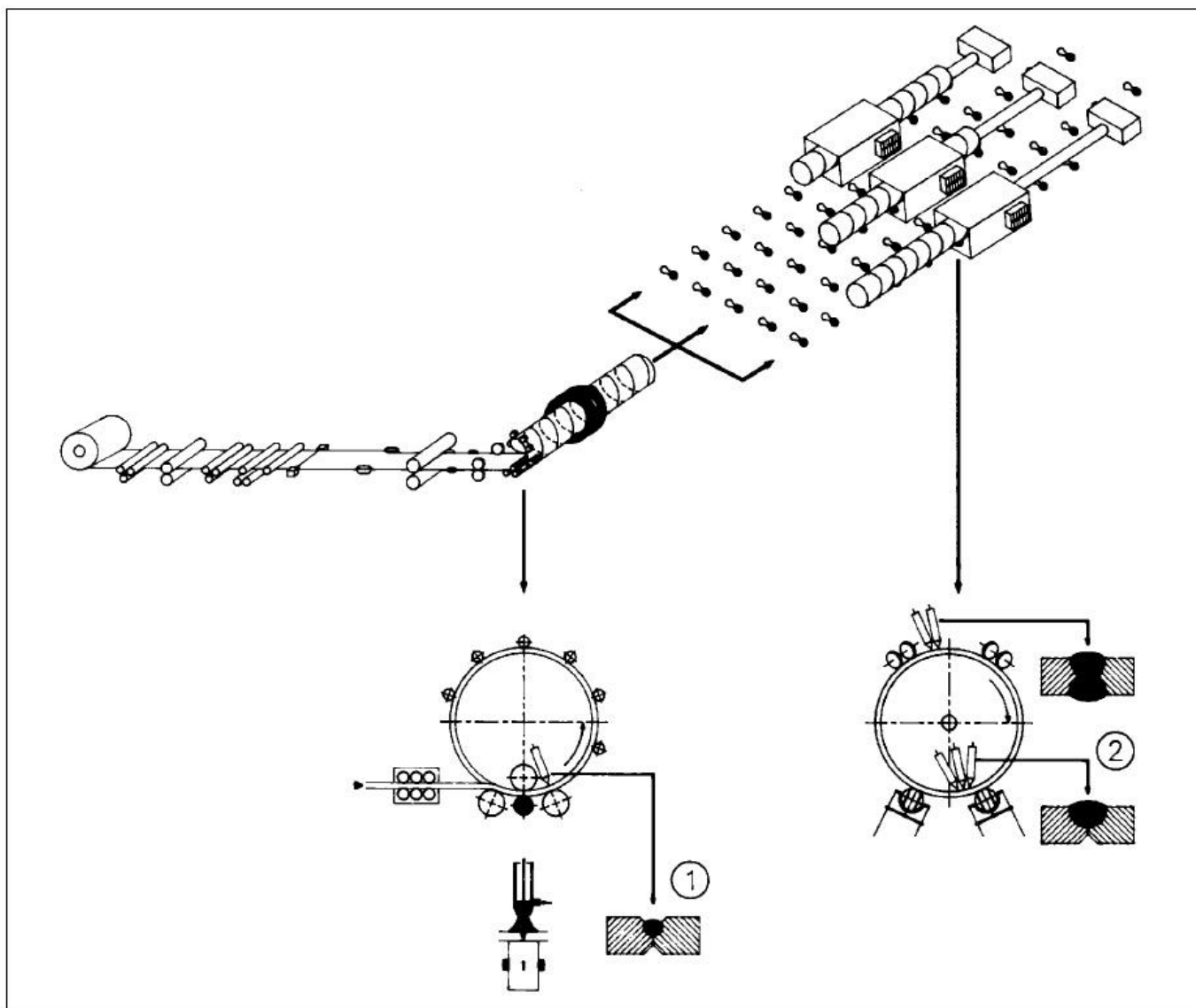
مرحله ۲ - جوشکاری زیرپودری داخلی و خارجی در دستگاه‌های جوشکاری جداگانه

شکل ۶۸ یک نمایش شماتیک از تأسیسات شکل‌دهی لوله و جوشکاری تکی (tack welding) را نشان می‌دهد.



شکل ۶۸ - نمای شماتیک خط تولید لوله مارپیچ (واحد شکل‌دهی لوله و جوش موقت)

شکل ۶۹ نمایش شماتیک از مفهوم تولید لوله مارپیچی توزیع شده با تأسیسات جداگانه شکل دهی و جوشکاری زیرپودری (SAW) را نشان می دهد.



شکل ۶۹ - نمای شماتیک فرآیند تولید لوله مارپیچ با خطوط جداگانه شکل دهی و جوشکاری:

۱- شکل دهی و جوش موقت (Tack Welding) ۲- ایستگاه های جوشکاری قوسی زیرپودری دوگذره ترکیبی (انجام هم زمان پاس های داخلی و خارجی)

علاوه بر بهره‌وری بالاتر هزینه این فرآیند (که به واسطه سرعت بالاتر عملیات شکل دهی و جوشکاری تکی (tacking) حاصل می شود)، مزایای فنی دیگری نیز از جداسازی مرحله شکل دهی لوله از مرحله اصلی جوشکاری به دست می آید، زیرا هر دو عملیات می توانند به طور مستقل بهینه سازی شوند.

در بخش شکل دهی لوله مارپیچی، لبه های نوار پیوسته (یکی در بخش لوله تشکیل شده قبلی و دیگری در skelp ورودی) به طور پیوسته توسط جوشکاری تکی داخلی به هم متصل می شوند.

فرآیند جوشکاری تکی با روش MAG (برای جزئیات بیشتر به بخش ۴.۲.۲ مراجعه کنید) در سرعت ۱۲ متر در دقیقه در منطقه موقعیت ۶ ساعت انجام می شود. گاز محافظ استفاده شده دی اکسید کربن است. لبه های جوش زیر محل جوشکاری با کمترین فاصله بر روی غلتک راهدنده ثابت حرکت می کنند.

یک دستگاه برش پروازی رشته لوله‌های جوشکاری شده را به طول‌های فردی مورد نیاز می‌برد. این فرآیند برش لوله آخرین عملیات انجام شده در دستگاه شکل‌دهی مارپیچی است. به دلیل سرعت‌های بالای جوشکاری تکی که به دست آمده، لازم شده است که برش‌زن سنتی با مشعل اکسی‌استیلن با مشعل‌های پلاسما با سرعت بالا که با تزریق آب کار می‌کنند، جایگزین شود.

لوله‌های بریده شده به طول سپس به دستگاه‌های جوشکاری زیرپودری (SAW) دوپاس ترکیبی برای جوشکاری نهایی هدایت می‌شوند.

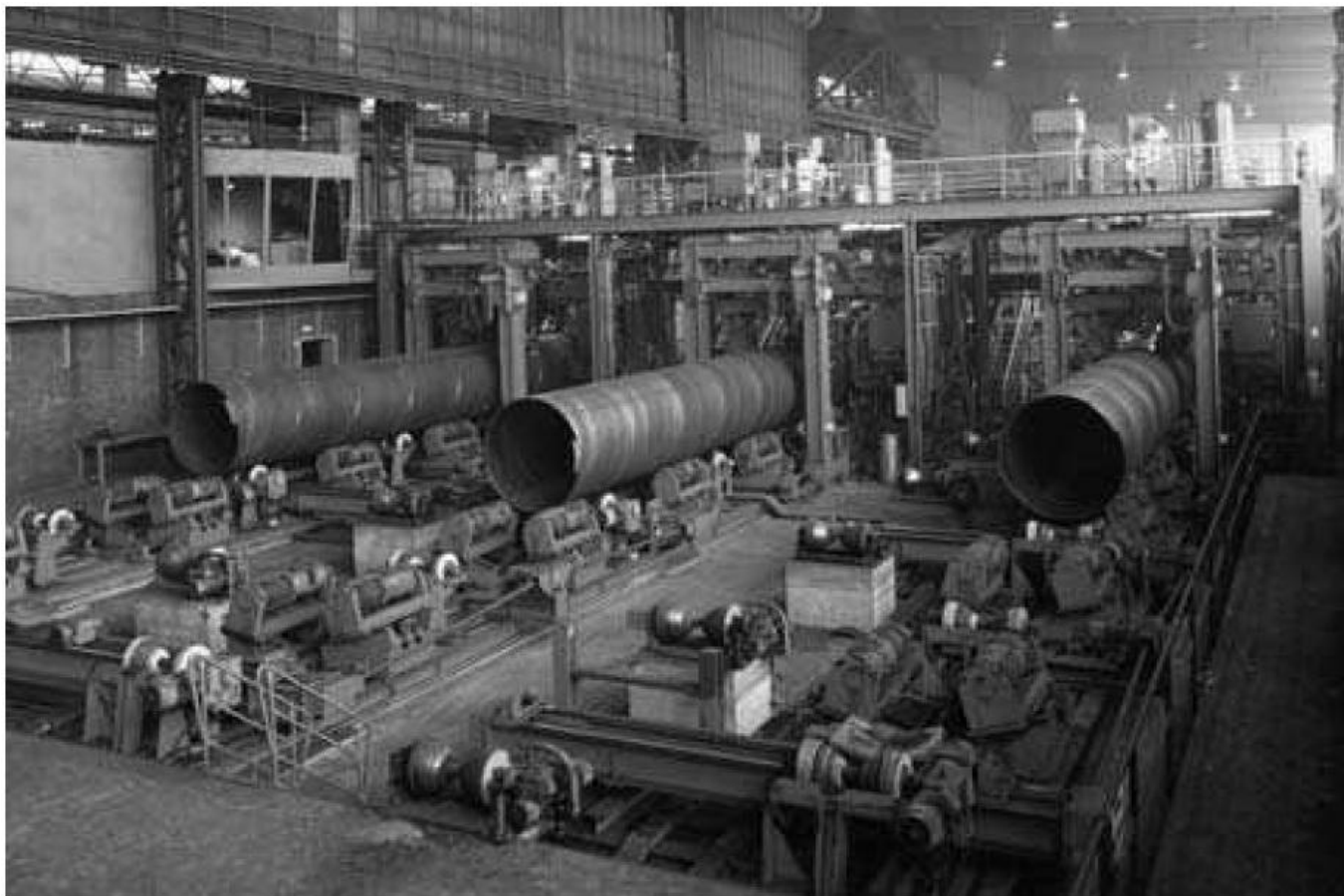
یک میز غلتکی ویژه لوله را به طور دقیق مطابق با درز مارپیچی آن می‌چرخاند، به طوری که سرهای جوشکاری SAW ابتدا مرحله داخلی و سپس مرحله خارجی را انجام دهند. در این عملیات، نیاز است که کنترل دقیق هم‌راستایی مرکز جوش برای سرهای جوشکاری داخلی و خارجی انجام شود تا از جابجایی جوش جلوگیری و حداقل شود.

شکل ۷۰ یک دستگاه جوشکاری لوله مارپیچی با کنترل کامپیوتری را نشان می‌دهد که برای جوشکاری زیرپودری (SAW) با مرحله‌های داخلی و خارجی همزمان طراحی شده است.



شکل ۷۰ - ایستگاه جوشکاری قوسی زیرپودری دوگذره ترکیبی با کنترل رایانه‌ای، برای اجرای هم‌زمان جوش داخلی و خارجی (عکس از کارخانه Salzgitter: Großbrohre GmbH)

شکل ۷۱ یک تأسیسات یکپارچه را نشان می‌دهد که دارای سه دستگاه جوشکاری لوله مارپیچی SAW ترکیبی برای جوشکاری همزمان پاس‌های داخلی و خارجی است.



شکل ۷۱ - کارخانه یکپارچه با سه خط ترکیبی جوشکاری مارپیچ قوسی زیرپودری، برای اجرای همزمان جوش داخلی و خارجی (عکس از کارخانه (Salzgitter GroBrohre GmbH))

برای عملیات جوشکاری پاس‌های داخلی و خارجی از روش دو یا سه‌سیمی استفاده می‌شود (برای جزئیات بیشتر به بخش ۴.۲.۱ مراجعه کنید).

علاوه بر چند تغییر جزئی، مراحل تولید بعدی مانند ماشین‌کاری انتهای لوله، آزمون هیدرواستاتیک و همچنین بازرسی‌های غیرمخرب و آزمون‌های مکانیکی به‌طور اصولی مشابه با فرآیند تولید لوله مارپیچی سنتی هستند.

در اینجا نیز، استاندارد بالای کیفیت از طریق فعالیت‌های کنترل کیفیت در حین فرآیند که پس از هر مرحله تولید انجام می‌شود، تأمین می‌شود. نتایج این آزمون‌ها و بازرسی‌ها بلافاصله به مرحله تولید مربوطه بازخورد داده می‌شود تا از بهینه‌سازی مستمر کیفیت محصول اطمینان حاصل شود.

شکل ۷۲ جریان تولید با تمام مراحل ساخت، آزمون و بازرسی که در یک تأسیسات تولید لوله مارپیچی با خطوط جداگانه شکل‌دهی و جوشکاری به‌کار گرفته می‌شود، را نشان می‌دهد.

- Handb. d. Eisenhüttenw. Walzwerkswesen: Vol. 3, Publisher J. Puppe. Düsseldorf 1939, Verlag Stahleisen, Berlin 1939.
- Verlag Julius Springer Tube Mill Practice. Association of Iron & Steel Engineers, Pittsburgh 1953
- Neumann, H.: Stahlrohrherstellung. VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, 3rd edition, Leipzig 1970
- Müller, H. G. and M. Opperer: Das Stahlrohr, Düsseldorf 1974, Verlag Stahleisen
- Herstellung von Rohren. Publisher Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Düsseldorf 1975, Verlag Stahleisen
- Hütte: Taschenbuch für Eisenhüttenleute. 5th edition, Berlin 1961, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn
- Vogt, J.: Herstellung nahtloser Rohre auf einer modernen Rohr-Stoßbankanlage. Special reprint from DEMAGNachrichten, Vol. 180
- Freckmann, S.: Abmessungsbereiche nahtloser Rohre bei den heute gebräuchlichen Herstellverfahren. Special reprint: Blech, Rohre, Profile, 12/1970
- Asselwalzwerke zur Herstellung dickwandiger Rohre. Meer-Bericht 1192
- Groß, H.: Das Umformen von Stahl auf hydraulischen Strangpressen. Special reprint from Klepzig Fachberichte 75 (1967) 11
- Mechanische Strangpressen zur Herstellung von Stahlrohren. Meer-Bericht 142/I
- Schrinner, W. D.: Werkzeuge zum Stangpressen von Stahl. Bänder Bleche Rohre 12 (1972) 9, pp. 407/10
- Rohrwalzwerke zum Maßwalzen. Reduzieren, Streckreduzieren. Meer-Bericht 143/1
- Bohnen, I. K.: Stahlrohrziehereien (II). Bänder Bleche Rohre, June 1963, pp. 305/14
- Sander, W.: Tendenzen bei der Entwicklung von Rohrzieh- und Rohrwalzmaschinen. Special reprint: Blech, Rohre, Profile, Sept. 1977
- Schmoll, S.: Das nahtlose Präzisionsstahlrohr in neuer Dimension. Special reprint: Der Konstrukteur, Vol. 4/1980
- Das Kaltwalzen von Rohren. Meer-Bericht 151/4
- Maschinen und Anlagen zur Herstellung nahtloser Rohre. DEMAG-MEER Bericht 1549
- Herstellung und Prüfung von Stahlrohren. Mannesmannröhren-Werke
- Zur Entwicklung des Rohrschweißens. Meer-Bericht 1152
- Rohrschweißwalzwerke. Meer-Bericht 1520
- Groß, H.: Kontinuierliche Rohrumformung. Presented at Haus der Technik, Essen
- Oppermann, W.: Vollkontinuierlich arbeitende Rohrschweißanlage für Rohre kleinster Abmessungen. Bänder Bleche Rohre 10 (1969) 8, pp. 495/99
- Schmitz, H.: Einzelrohrfertigung längsnahtgeschweißter Rohre. Presented at Haus der Technik, Essen
- Groß, H.: Fertigung und Gebrauchseigenschaften von spiralgeschweißten Großrohren für Hochdruckfernleitungen. Haus der Technik Conference Proceedings, Vol. 303, pp. 16/29
- Schmidt, W.: Herstellung und Verwendung längs- und schraubenliniennahtgeschweißter Stahlrohre. Bänder Bleche Rohre (1964) 2, pp. 66/75
- Flick, K.: Das Umstellen vorhandener Rohrschweißanlagen auf induktive Hochfrequenzerwärmung. Special reprint: Bänder Bleche Rohre (1967) 2, pp. 70/76
- Paton, E. O.: Automatische Lichtbogenschweißung. VEB Marhold-Verlag, Halle (1958)
- Uttrachi, G. D.; Messina, J. E.: Three-Wire Submerged-Arc Welding of Line Pipe. Welding Journal 6/1968, pp. 475/81
- Groß, H.: Fertigung und Einsatz von spiralgeschweißten Rohren mit hohen Festigkeiten. Presented at the "8th World Petroleum Congress" in Moscow, USSR, 1971
- Groß, H.: Fertigung und Gebrauchseigenschaften von UP-geschweißten Spiralrohren. Special reprint from "3R international", Vol. 10-11/76 and 2/77, Essen
- Jahn, E.: Die Verwendung längsnahtgeschweißter Rohre im Kesselbau. Special reprint from "VGB-Werkstofftagung", 1969, pp. 118/27
- Messer Griesheim GmbH (Publisher): UP-Handbuch. Handbuch für das Unterpulverschweißen, Frankfurt/Main
- Schiller, A.: Stahlsorten und Herstellungsverfahren für Rohre und Rohrleitungsteile für Pipelines. Pipeline-Seminar-Wilgersdorf, Paper No. 11/1977
- Schmidt, W.: Stahlsorten und Herstellungsverfahren für Rohre und Rohrleitungsteile. Pipeline-Seminar-Wilgersdorf, Paper No. 11/1975
- Wiedenhoff, W. and Peters, P.: Fertigung und Qualitätssicherung von UP-längsnahtgeschweißten Großrohren. 3R international, Vol. 3/4-1978
- Groß, H. and Wennemann, W.: Moderne Verfahren zur Herstellung von UP-spiralgeschweißten Rohren. 3R international, Edition 10, October 1978

Hartmann, K. and Berner, K.: Gütesicherung, neue Prüfmethode und Erkenntnisse für die Qualitätskontrolle von schraubenliniennahtgeschweißten Großrohren. 3R international, Edition 8/9, August/September 1978.

Zobl, R.: Herstellung und Qualitätsprüfung von spiralgeschweißten Großrohren für hochbeanspruchte Leitungen in Salzgitter. Peine + Salzgitter Berichte 1/81

Düren, C.; Felleisen, R. and Hieber, G.: Beitrag zur Technologie des Unterpulver-Vierdrahtschweißens. DVS-Berichte, Vol. 65, S. 8-14

Mannesmann-Großrohre, Technische Information, December 1980 edition, No. 6042/1, Mannesmannröhren-Werke

HFI-geschweißte Stahlleitungsrohre, Hochfrequenz-induktiv-längsnahtgeschweißt, Technische Information. December 1980 edition, No. 6102/1, Mannesmannröhren-Werke

Oberem, K.: Herstellung nahtloser Rohre. Stahl u. Eisen 104 (1984), No. 25-26, 1339/43

Billr, H.: Verfahren zur Herstellung nahtloser Stahlrohre. Stahl u. Eisen 99 (1979), Vol. 22, pp. 1228/32

Mannesmann Demag Hüttentechnik. Technische Information über Längsnaht-Rohrschweißanlagen mit Linealeinförmung, February 1985 edition, No. 3416

Mihara, Y. et al.: Evaluation of Seamless Tube Rolling Process. NKK Technical Report No. 41 (1984), pp. 41/51

Schifferings, B.: Herstellverfahren für nahtlose Rohre mit kleiner und mittlerer Kapazität. Neue Hütte, Year 32, Vol. 1 (1987), pp. 12/17

Oberem, K.: Das Schrägwalzwerk als Lochaggregat beim Rohrwalzen. Stahl u. Eisen 107 (1987), No. 16, pp. 733/36

Kümmerling, R.: Das Schrägwalzen von Rohren. Stahl u. Eisen 109 (1989), No. 9, 10, pp. 503/11

Bellmann, M. and Kümmerling, R.: Optimierung des Spreizwinkels von Lochschrägwalzwerken für die Herstellung nahtloser Rohre. Stahl u. Eisen 113 (1993) No. 9, pp. 111/17

Niederhoff, K. A.: Schweißen von Großrohren aus TM-Stählen. DVS proceedings of special conference "Schweißen im Anlagen- und Behälterbau", 17 to 19.02.1993, Munich

Gräf, M. K.; Hillenbrandt, H. G. and Niederhoff, K. A.: Production of large diameter line pipe and bends for the world's

first long range pipeline in grade X80 (GRS 550). Proceedings of the 8th Symposium on Line Pipe Research, Sept. 26-29, 1993, Houston, Texas

