www.jozveha.ir

دانشگاه آزاد اسلامی

گروه مکانیک

روش‌های تولید

خلاصه‌ای از فرایندهای ریخته‌گری، فورج، نورد، اکستروژن، کشش سیم، شکل‌دهی ورق و روش‌های ماشینکاری

www.jozveha.ir

ریخته‌گری

۱. مقدمه

یکی از روش‌های تولید، ریخته‌گری می‌باشد. تاریخچهٔ ریخته‌گری به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد برمی‌گردد یعنی هنگامی که بشر از این روش برای تولید زیورآلات، نوک پیکان تیر از جنس مس و دیگر وسایل استفاده می‌کرد.

اساسا فرایندهای ریخته‌گری مواد شامل ریختن فلز مذاب به داخل حفره‌های یک قالب می‌باشد که بعد از خنک‌شدن فلز مذاب و منجمدشدن به شکل حفره‌های قالب درمی‌آید. فرایندهای ریخته‌گری قابلیت تولید با اشکال پیچیده به صورت یکپارچه و با حفره‌های داخلی را دارد. تولید قطعات خیلی بزرگ، خیلی کوچک و قطعات حفره‌دار با این روش بسیار اقتصادی است. از قطعات معروف تولید شده با این روش می‌توان بدنهٔ موتور، سیلندر، سرسیلندر، پوستهٔ جعبه دنده و دیفرانسیل، پیستون، دیسک‌های توربین، چرخ‌های واگن قطار و وسایل مصنوعی تزیینی نام برد.

تقریبا تمامی فلزات را می‌توان ریخته‌گری کرد و به شکل نهایی مطلوب (یا در حد شکل نهایی) و تنها با عملیات پایانی اندکی تبدیل نمود. با کنترل مناسب ماده و پارامترهای فرایند می‌توان قطعاتی با خواص یکسان در تمامی نقاط آن تولید کرد. فاکتورهای مهم عملیات ریخته‌گری شامل موارد زیر است:

۱. جریان فلز مذاب به داخل حفره‌ها
۲. منجمدشدن[1] فلز از حالت فاز مذاب و تغییرات حجمی[2] مربوط
۳. انتقال حرارت در هنگام تبدیل شدن مذاب به جامد و خنک شدن فلز داخل قالب
۴. نوع مادهٔ قالب

۲. انواع فرایندهای ریخته‌گری

روش‌های ریخته‌گری را می‌توان از جهت نوع و جنس قالب به سه بخش کلی تقسیم نمود؛ ریخته‌گری در قالب‌های غیردائمی[3]، ریخته‌گری در قالب‌های دائمی[4] و ریخته‌گری در قالب‌های کامپوزیتی[5]. قالب‌های غیردائمی از ماسه، گچ، سرامیک و مواد مشابه دیگر ساخته می‌شوند. تمامی این مواد توانایی تحمل دماهای زیاد را دارند و در مقابل فلز مذاب دچار تغییر نمی‌شوند. بعد از ریخته‌گری و انجماد فلز مذاب، قالب در این فرایند از بین می‌رود و شکسته می‌شود تا قطعهٔ ریخته‌گری از درون آن بیرون آید. قالب‌های دائمی از جنس مواد مقاوم مانند فولادها ساخته می‌شوند و توانایی تولید و ریخته‌گری تعداد زیادی از یک قطعه را دارند. قالب‌های کامپوزیتی از دو یا چند مادهٔ مختلف نظیر ماسه، گرافیت و فلز تشکیل شده است. از این نوع قالب در فرایندهای ریخته‌گری مختلفی برای بهبود استحکام، کنترل نرخ خنک‌شدن و به منظور کاهش هزینه‌ها استفاده می‌شود.

۲-۱.ریخته‌گری ماسه‌ای

فرایند ریخته‌گری ماسه‌ای شامل قراردادن الگو (که دارای شکل قطعه ریخته‌گری مورد نظر می‌باشد) در ماسه، تعبیهٔ سیستم راهگاهی مناسب، پرکردن حفره‌ها با فلز مذاب، خنک کردن مذاب تا منجمد شدن، خرد کردن قالب ماسه‌ای و درآوردن قطعهٔ ریخته‌گری می‌باشد. هرچند که این روش یک روش باستانی تولید قطعه است ولی هنوز هم رایج‌ترین

---

[1] Solidification
[2] Shrinkage
[3] Expendable mold
[4] Permanent mold
[5] Composite mold

www.jozveha.ir

روش ریخته‌گری است. تنها در ایالات متحده سالانه ۱۵ میلیون تن قطعهٔ فلزی با این روش تولید می‌شود. از قطعات معروفی که با این روش تولید می‌شوند می‌توان بلوک موتور، سیلندر، سرسیلندر و پوستهٔ پمپ‌ها را نام برد.

ماسه: در بیشتر ریخته‌گری‌های ماسه‌ای از ماسه سیلیکا (SiO_2) استفاده می‌شود. ماسه در طبیعت به مقدار فراوان موجود است. بنابراین دسترسی به آن آسان و ارزان است. دو نوع کلی ماسه مورد استفاده در ریخته‌گری وجود دارد؛ ماسهٔ طبیعی[۱] و ماسهٔ ساختگی[۲]. ماسهٔ ساختگی به دلیل ترکیب کنترل شده و دقیق‌تر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماسهٔ مناسب، ماسه‌ای است که دارای دانه‌های گرد بوده و ذرات آن بتوانند به همدیگر چسبیده و یک سطح صاف را بوجود آورند. انتخاب جنس ماسه بسته به خواص مورد نیاز و دیدگاه اقتصادی بستگی دارد. برای مثال ماسهٔ ریزدانه استحکام قالب را بالا می‌برد ولی باعث کم شدن نفوذپذیری[۳] قالب می‌شود که این خود باعث می‌شود که گازهای تولیدی در هنگام ریختن مذاب داخل قالب نتوانند از لابلای ذرات ماسه به خوبی عبور کنند.

۲-۱-۱. انواع قالب‌های ماسه‌ای

قالب‌های ریخته‌گری از جهت نوع ماسه و روش تولید آنها مورد مقایسه قرار می‌گیرند. سه نوع اصلی قالب‌های ماسه‌ای عبارتند از: ماسه‌ای تر[۴]، خشک رویه[۵]، قالب‌گیری سرد[۶] و غیرپخته‌ای[۷].

ماسهٔ قالب‌گیری تر که متشکل از ماسهٔ نرم، خاک‌رس و آب است دارای بیشترین کاربرد در ریخته‌گری ماسه‌ای می‌باشد. از واژهٔ "تر" به این علت استفاده می‌شود که ماسهٔ مورد استفاده در هنگام ریختن مذاب، تر و یا دارای رطوبت می‌باشد. ارزان قیمت‌ترین قالب‌های ماسه‌ای از این نوع می‌باشند.

در قالب‌های خشک رویه سطوح قالب خشک توسط قراردادن در هوای آزاد یا مشعل خشک می‌شوند. از این نوع قالب برای ریخته‌گری قطعات بزرگ استفاده می‌شود، چراکه این قالب دارای استحکام بیشتر است. قالب‌های ماسه‌ای را نیز می‌توان پیش از ریختن مذاب در کوره خشک نمود. این قالب‌ها از قالب‌های تر محکم‌تر هستند و دارای دقت ابعادی و سطوح تمام‌شده بهتری می‌باشند. البته اعواج قالب در این روش بیشتر است و احتمال پارگی گرم[۸] (Hot tearing) در قطعات ریخته‌گری شده با این روش زیاد است. زمان تولید نیز در این روش افزایش می‌یابد.

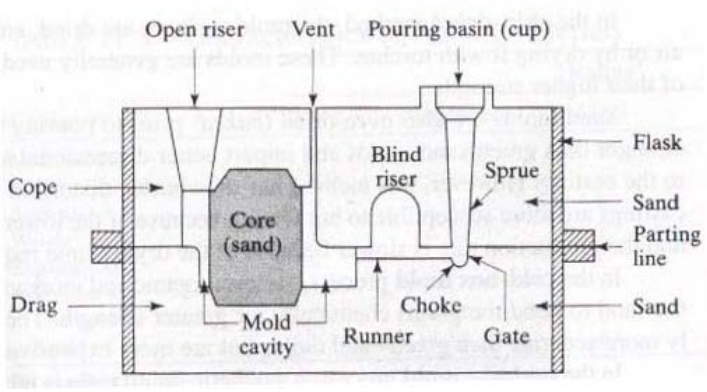
در فرایند قالب‌گیری سرد از چسب‌های آلی و غیرآلی مختلفی برای به‌هم چسباندن ذرات و به منظور رسیدن به استحکام بیشتر استفاده می‌شود. از نظر ابعادی این نوع قالب‌ها از قالب‌های مرطوب دقیق‌ترند و البته گرانتر. در قالب‌های غیرپخته از رزین مایع مخلوط شده با ماسه که در هوای اتاق خشک و سفت شده است، استفاده می‌شود.

---

[1] Naturally bonded (bank sand)
[2] Synthetic sand (lake sand)
[3] Permeability
[4] Green molding sand
[5] Skin-dried
[6] Cold-box mold
[7] No-bake mold
[۸] گسستگی‌هایی با شکل بی‌قاعده در نقاطی از قطعه است که احتمال تمرکز تنش‌های کششی در جریان سرد شدن قطعه وجود دارد. سطوح شکست اکسید شده و دارای ساختار دندریتی است.

www.jozveha.ir

۲-۱-۲. مطالعهٔ اجزا و نحوهٔ کارکرد یک قالب ماسه‌ای



شکل ۱- نمای شماتیک از یک قالب ریخته‌گری ماسه‌ای

مطابق شکل ۱ قسمت‌های اصلی یک قالب ماسه‌ای عبارتند از:

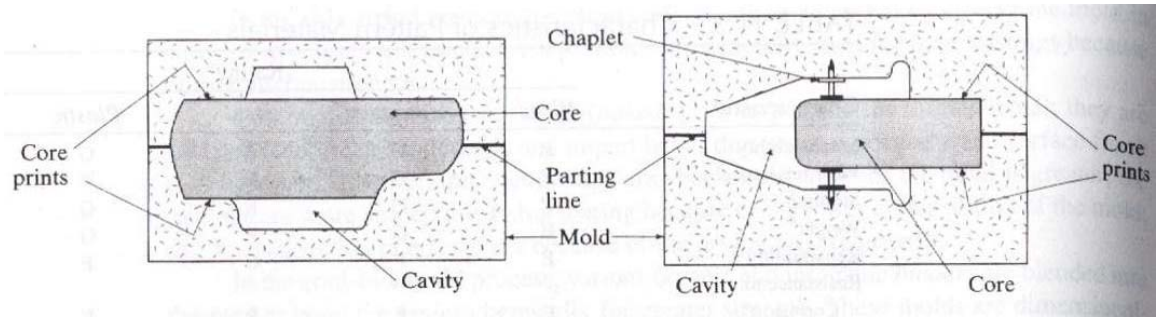
- درجه (Flask): که وظیفهٔ نگداری ماسه را دارد. در قالب‌های دوتکه‌ای درجه از لنگهٔ بالایی (Cope) و لنگهٔ پایینی (Drag) تشکیل شده که درز (Seam) بین آنها همان خط جدایش (Parting line) می‌باشد. اگر به بیش از دو تکه نیاز باشد، این تکهٔ اضافی را درجه میانی یا لنگهٔ وسطی (Cheek) می‌نامند.
- حوضچهٔ بالای راهگاه (Pouring basin) که فلز مذاب در آن ریخته می‌شود.
- راهگاه (Sprue) که فلزات مذاب از طریق آن پایین می‌رود.
- پای راهگاه (Gate) که در پایین راهگاه تعبیه شده است. معمولا قالب‌ها دارای چند پای‌راهگاه برای جلوگیری از مغشوش شدن فلز مذاب و کنترل جریان فلز می‌باشند. وجود پای راهگاه باعث می‌شود که مذاب به قسمت‌های بحرانی قطعهٔ ریخته‌گری برسد.
- تغذیه (Raiser) که فلز اضافی مورد نیاز به دلیل انقباض حجمی در هنگام انجماد را تامین می‌کند. تغذیه می‌تواند هم به صورت کور و هم به صورت باز باشد (به شکل توجه شود).
- ماهیچه (Core) که از جنس ماسه می‌باشد و به منظور ایجاد سوراخ و حفره در داخل ریخته‌گری استفاده می‌شود.
- هواکش (Vent) برای خروج گازهای تولیدی که در هنگام تماس مذاب با دیوارهٔ ماسه‌ای قالب ایجاد می‌شود، می‌باشد.
- مجرای مذاب‌رسانی (Runner) که فلز مذاب را به حفره‌های قالب می‌رساند.
- گلویی (Chock) که سد یا مانعی در سیستم راهگاهی برای جلوگیری از ورود تفاله و سرباره به داخل قالب است.
- تغذیهٔ کور (Blind riser) که یک مخزن بسته و احاطه شده توسط ماسه بوده و راهی به خارج قالب ندارد و برای آن است که در هنگام انقباض حجمی کمبود مادهٔ مذاب را تامین کند.

مدل[1] مدل (الگو) می‌تواند از جنس چوب، پلاستیک و یا فلز باشد. انتخاب نوع مادهٔ مدل به اندازه و شکل قطعهٔ ریخته‌گری، دقت ابعادی ، کیفیت سطح مورد نظر قطعه و نیز روش ریخته‌گری بستگی دارد. عموما از مدل‌های یک‌تکه‌ای برای اشکال ساده و با تیراژ کم استفاده می‌شود. جنس این مدل‌ها معمولا از چوب می‌باشد و ارزان قیمت هستند. مدل‌های چندتکه[2] از دو یا چند قطعه تشکیل شده و هنگامی بکار می‌رود که قطعهٔ ریخته‌گری دارای شکل پیچیده باشد.

[1] Pattern
[2] Split pattern

www.jozveha.ir

ماهیچه[1] برای ریخته‌گری قطعاتی که دارای حفره‌های داخلی می‌باشند مثل بلوک موتور خودروها و یا بدنهٔ شیرها از ماهیچه استفاده می‌شود. ماهیچه‌ها قبل از انجام عمل ریخته‌گری و به منظور شکل‌دهی سطوح داخلی قطعه در داخل کویته‌ها قرار داده می‌شوند. بعد از اتمام عملیات ریخته‌گری و خنک شدن قطعه، خرد شده و از داخل حفره‌ها بیرون آورده می‌شوند. جنس ماهیچه‌ها معمولا از ماسهٔ فشرده می‌باشد. یکی از مشکلات استفاده از ماهیچه نگه‌داشتن آن در داخل قالب است. برای این منظور از پل‌های فلزی[2] با شکل و ابعاد مختلف و یا با ایجاد چند تکیه‌گاه[3] روی ماهیچه برای نگه‌داشتن آن در داخل قالب استفاده می‌شود (شکل۲). این پل‌های فلزی در هنگام ریختن مذاب خود نیز ذوب شده و جزئی از قطعه می‌شوند.



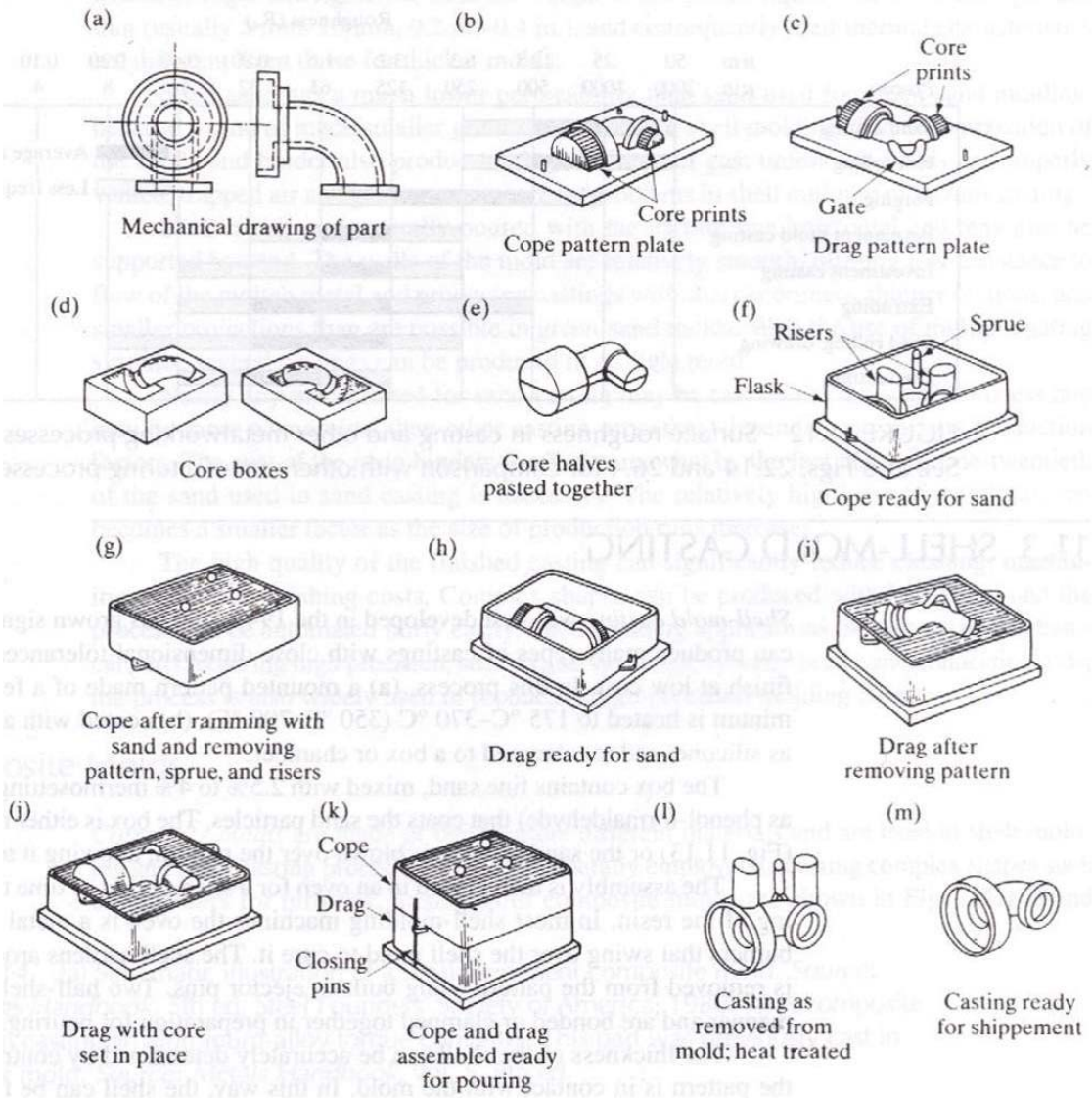
شکل ۲- مثال‌هایی از ماهیچه‌های ماسه‌ای به همراه تکیه‌گاه‌ها (Core prints) و پل‌های فلزی (Chaplet).

۲-۱-۳. فرایند ریخته‌گری ماسه‌ای

بعد از آنکه قالب شکل داده شد و ماهیچه‌ها در جای خود قرار گرفتند، دو لنگهٔ قالب بسته، چفت و محکم می‌شوند. این لنگه‌ها بایستی به اندازه کافی سنگین باشند تا از جدا شدن قالب به خاطر فشار ناشی از طرف فلز مذاب در هنگام ریخته شدن به داخل حفره‌ها جلوگیری شود. طراحی سیستم راهگاهی مناسب برای رساندن مناسب فلز مذاب به داخل حفره‌ها مهم است. اغتشاش سیال باید به حداقل برسد. هوا و گازها بایستی اجازهٔ خروج توسط هواکش و سایر وسایل را داشته باشند. تغییرات دما نسبت به زمان باید به گونه‌ای باشد که از انقباض حجمی و پوکی[4] جلوگیری شود. طراحی تغذیه‌ها به منظور رساندن فلز مذاب لازم برای انجماد در هنگام ریخته‌گری مهم است. در شکل ۳ یک فرایند کامل ریخته‌گری نشان داده شده است.

[1] Core
[2] Chaplet
[3] Core print
[4] Porosity

www.jozveha.ir



شکل ۳- مراحل ریخته‌گری توسط قالب‌های ماسه‌ای

بعد از انجماد، قطعه از داخل قالب بیرون آورده می‌شود و دانه‌های ماسه و لایه‌های اکسید شده روی قطعه با ویبراتور و یا توسط سند بلاست[1] کنده می‌شود. تغذیه‌ها و راهگاه‌ها توسط هوابرش، اره کاری، برشکاری یا چرخ‌کاری سایشی (سنگزنی) از قطعه جدا می‌شوند.

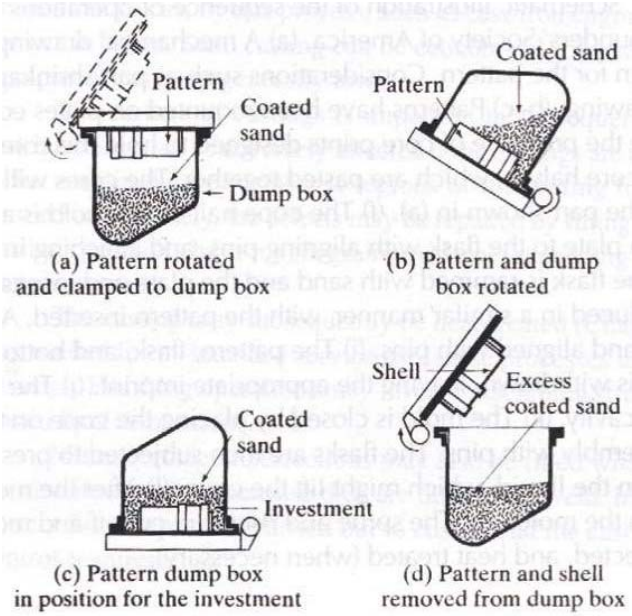
تقریبا تمامی آلیاژهای موجود در بازار را می‌توان ریخته‌گری نمود. سطح تمام شده قطعه به شدت به مادهٔ مورد استفاده برای ساخت قالب بستگی دارد. دقت ابعادی به اندازهٔ سایر روش‌های ریخته‌گری نیست. با این وجود اشکال پیچیده مثل بلوک موتور، پروانه‌های خیلی بزرگ کشتی‌ها و پره‌ها با این روش ریخته‌گری می‌شوند. این روش هم برای تولید انبوه و هم برای تولید تیراژ پایین اقتصادی است. معمولا قیمت ابزارآلات لازم برای این فرایند پایین است.

[1] Sand blast

www.jozveha.ir

۲-۲. ریخته‌گری در قالب‌های پوسته‌ای[1]

روش ریخته‌گری در قالب‌های پوسته‌ای برای اولین بار در دهۀ ۱۹٤۰ مطرح و به سبب توانایی ریخته‌گری انواع فلزات با دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح خوب و نیز ارزان بودن به طور زیادی گسترش پیدا کرد. در این روش الگوی ساخته‌شده از آلومینیوم یا فلزات آهنی تا دمای 175-370 ºC (350-700 ºF) حرارت داده می‌شود، سپس توسط موادی مانند سیلیکون پوشش داده می‌شود و درون یک محفظه یا جعبه قرار داده می‌شود. این محفظه یا جعبه حاوی ذرات ریز ماسه به همراه 2.5%-4% رزین ترموست (نظیر فنل فرمالدئید) که پوشش‌دهندۀ ماسه می‌باشد، است. این محفظه دوران می‌کند (شکل ٤) و مخلوط ماسه بر روی مدل ریخته می‌شود، سپس مجموعه برای مدت اندکی به منظور عمل آمدن رزین در داخل کوره قرار داده می‌شود. پوستۀ دور مدل سخت می‌شود و توسط میلۀ بیرون انداز از روی مدل برداشته می‌شود.



شکل ٤- روش معمول ساخت قالب پوسته‌ای

با کنترل زمان تماس قالب (پوسته) با مدل می‌توان ضخامت پوسته را به دقت محاسبه نمود. این پوسته‌ها سبک و نازک (معمولا 5 mm-10 mm, 0.2 in-0.4 in) بوده، خواص حرارتی آنها با قالب‌های ضخیم تفاوت دارد.

کیفیت بالای قطعۀ ریخته‌گری با این روش هزینه‌های مربوط به تمیزکاری، ماشینکاری و عملیات پایانی را کاهش می‌دهد. با این روش اشکال پیچیده را می‌توان بدون داشتن مهارت زیاد تولید کرد. این فرایند را می‌توان به آسانی به صورت اتوماتیک در آورد. با این روش می‌توان قطعات مکانیکی نظیر پوستۀ دنده‌ها، سرسیلندر، شاتون و ... که نیاز به دقت بالا دارند را تولید نمود. از این روش همچنین در تولید دقیق ماهیچه‌های قالب‌ها استفاده می‌شود.

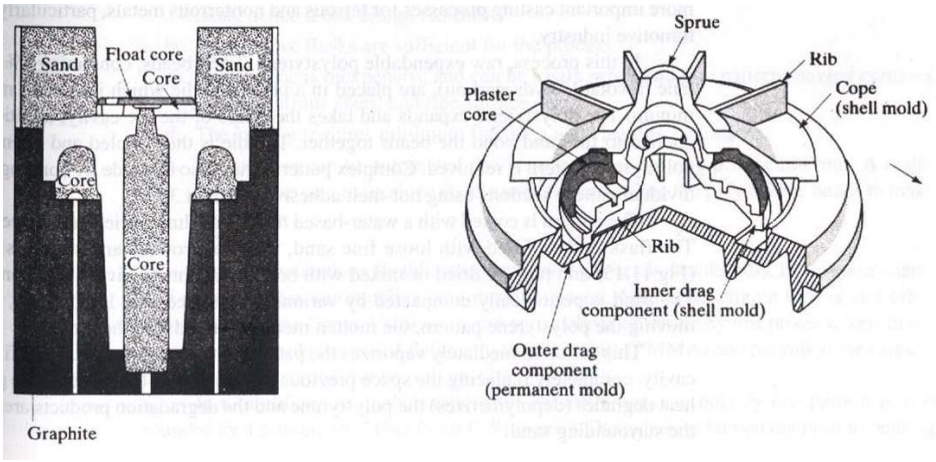
۲-۳. قالب‌های کامپوزیتی (ترکیبی)

همان طور که در قسمت‌های قبلی گفته شد قالب‌های کامپوزیتی از دو یا چند مادۀ مختلف ساخته شده است. معمولا برای شکل‌دهی اشکال پیچیده نظیر پره‌های توربین‌ها استفاده می‌شود. این قالب‌ها می‌توانند دارای ماهیچه، مبرد[2] (برای کنترل نرخ انجماد در سطوح بحرانی ریخته‌گری) باشند. در شکل ۵ چند مثال از این روش آمده است. مواد مورد

[1] Shell-mold casting
[2] Chill

www.jozveha.ir

استفاده معمولا پوسته (در قسمت قبلی توضیح داده شد)، گچ، ماسه به همراه چسب، فلز و گرافیت است. با استفاده از این روش استحکام قالب، دقت ابعادی و سطح پایانی قطعات ریخته‌گری بهبود می‌یابد و موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان می‌شوند.



شکل ۵- (a) تصویری شماتیک از یک قالب کامپوزیتی (b) یک قالب کامپوزیتی مورد استفاده در ریخته‌گری یک مبدل گشتاور از جنس آلیاژهای آلومینیوم. این قطعه قبلا در یک قالب گچی ریخته‌گری شده است.

۲-٤. فرایند سیلیکات سدیم[1]

جنس مادهٔ قالب در فرایند سیلیکات سدیم ترکیبی از ماسه و 1.5%-6% سیلیکات سدیم (شیشه مایع) به عنوان چسب می‌باشد. این ترکیب حول مدل ریخته می‌شود و سپس در این حالت با دمیدن دی اکسید کربن به آن سخت می‌شود. این فرایند همچنین با نام‌های ماسه چسبیده توسط سیلیکات[2] یا فرایند دی اکسید کربن نامیده می‌شود. این فرایند برای اولین بار در دههٔ ۱۹۵۰ شناخته شد و بعدها با استفاده از مواد شیمیایی دیگر به عنوان چسب گسترش یافت. ماهیچه‌های ساخته شده با این روش احتمال پارگی در قطعه به سبب تغییرات دما را کاهش می‌دهد.

۲-۵. قالب‌های گرافیتی فشرده[3]

در این فرایند از گرافیت فشرده برای ساختن قالب ریخته‌گری مواد غیر فعال نظیر تیتانیم و زیرکونیم استفاده می‌شود. از ماسه به سبب میل ترکیبی شدید این فلزات با سیلیکا نمی‌توان استفاده کرد. در انجا روش ساخت قالب و ریخته‌گری همانند آنچه که در مورد قالب‌های ماسه‌ای می‌باشد، است. این قالب‌ها فشرده، با هوا خشک، در دمای 175 C پخته، در 870 C شعله‌ور و سپس در دما و رطوبت کنترل شده انبار می‌گردند.

۲-۶. قالب‌های ریخته‌گری گچی[4]

در فرایند ریخته‌گری با قالب‌های گچی، قالب از گچ با پودر تالک[5] و سیلیکافلور[6] اضافی برای بهبود استحکام و کنترل زمان لازم برای سفت شدن می‌باشد. این مواد با آب مخلوط شده و دوغاب در داخل یک مدل ریخته می‌شود. بعد از آنکه گچ خشک شد، معمولا ظرف مدت ۱۵ دقیقه، مدل برداشته می‌شود و قالب خشک و رطوبت زدایی می‌گردد. دو نیمهٔ قالب روی هم سوار می‌شوند تا کویتهٔ قالب را تشکیل دهند. این دو نیمه تا دمای حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۶ ساعت نگاه‌داری می‌شود. بعد از این مراحل می‌توان فلز مذاب را داخل آن ریخته‌گری نمود. به سبب اینکه قالب‌های

---

[1] Sodium silicate
[2] Silicate-bonded sand
[3] Rammed graphite molding
[4] Plaster mold
[5] Talc
[6] Silica flour

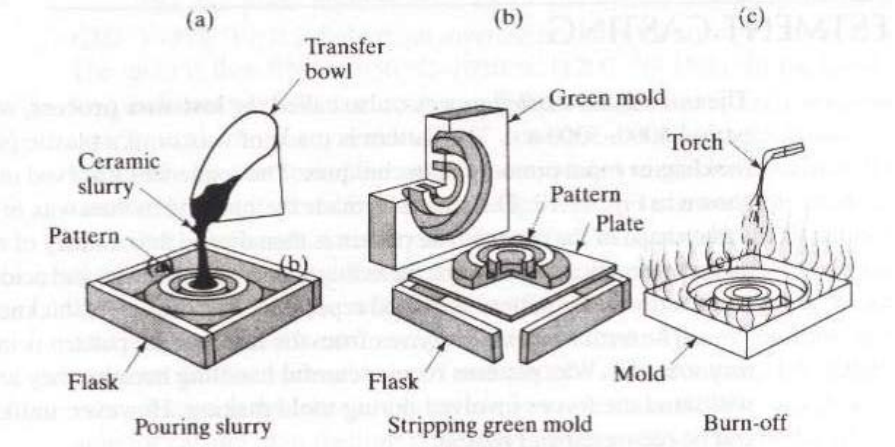
www.jozveha.ir

گچی دارای نفوذپذیری بسیار کمی هستند، گازهای ایجادشده در طی فرایند نمی‌توانند فرار کنند. بنابراین فلز مذاب در داخل خلا و یا تحت فشار ریخته می‌شود.

معمولا مدل‌های مورد استفاده در قالب‌های گچی از جنس آلیاژهای آلومینیوم، پلاستیک‌های ترموست، برنج و یا آلیاژهای روی می‌باشند. مدل‌های چوبی برای ساخت تعداد بالای این نوع قالب‌ها مناسب نیستند چراکه مدل این نوع قالب‌ها به طور مداوم در معرض گچ خیس (دوغاب) می‌باشند. از آنجاییکه گچ حداکثر دمای 1200°C (2200°F) را می‌تواند تحمل کند، از قالب‌های گچی فقط برای ریخته‌گری آلومینیوم، منیزیم، روی و بعضی آلیاژهای پایه مسی استفاده می‌شود. قطعات ریخته‌گری شده دارای دقت و کیفیت سطح خوب هستند. به سبب آنکه قالب‌های گچی دارای ضریب هدایت حرارتی پایین‌تری نسبت به سایر قالب‌ها می‌باشند، خنک شدن به آهستگی صورت می‌گیرد و بنابراین ساختار دانه‌ای یکنواخت‌تر، تاب برداشتن کمتر و خواص مکانیکی بهتری خواهیم داشت. این روش ریخته‌گری به همراه ریخته‌گری توسط قالب‌های مومی و سرامیکی به عنوان روش‌های ریخته‌گری دقیق شناخته می‌شوند چراکه دارای دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح خوب هستند. از قطعاتی که با این روش تولید می‌شوند می‌توان به قفل‌ها، دنده‌ها، شیرها، فیتینگ‌ها و ابزار و وسایل تزیینی اشاره کرد.

۲-۷. قالب‌های سرامیکی

شبیه به قالب‌های گچی می‌باشند با این تفاوت که مواد مورد استفاده از این نوع قالب‌ها تحمل حرارت‌های بالا را دارند و برای کارکرد در دماهای بالا مناسبند. دوغاب شامل ترکیبی از ریزدانهٔ زیرکون ($ZrSiO_2$)، اکسید آلومینیوم به همراه رزین می‌باشد. بعد از گرفتن دوغاب قالب‌ها (صفحات سرامیکی) خشک شده و سوزانده می‌شود تا مواد تبخیر شدنی خارج و قالب نیز پخته شود (شکل ۶).

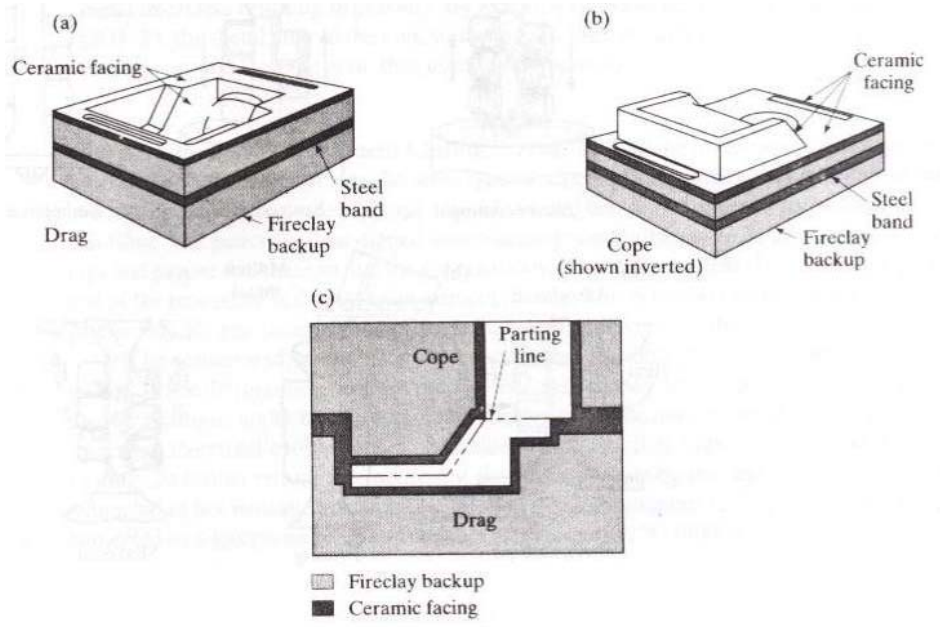


شکل ۶- مراحل عملیات ساخت قالب سرامیکی.

الگو می‌تواند از چوب یا فلز باشد. بعد از قرار دادن الگو و ریختن دوغاب، قالب برداشته، خشک و سوزانده می‌شود تا مواد بخارشدنی آن از بین برود، سپس قالب پخته می‌شود. قالب‌ها محکم بسته و به عنوان قالب تمام سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند شاو[1] وجوه سرامیک برای حصول به استحکام توسط خاک نسوز پخته می‌شود. سپس این وجوه سرامیکی رویهم سوار و آماده ریخته‌گری می‌شود (شکل ۷).

[1] Shaw process

www.jozveha.ir



شکل ۷- یک قالب سرامیکی برای ریخته‌گری قالب‌های فولادی فورج.

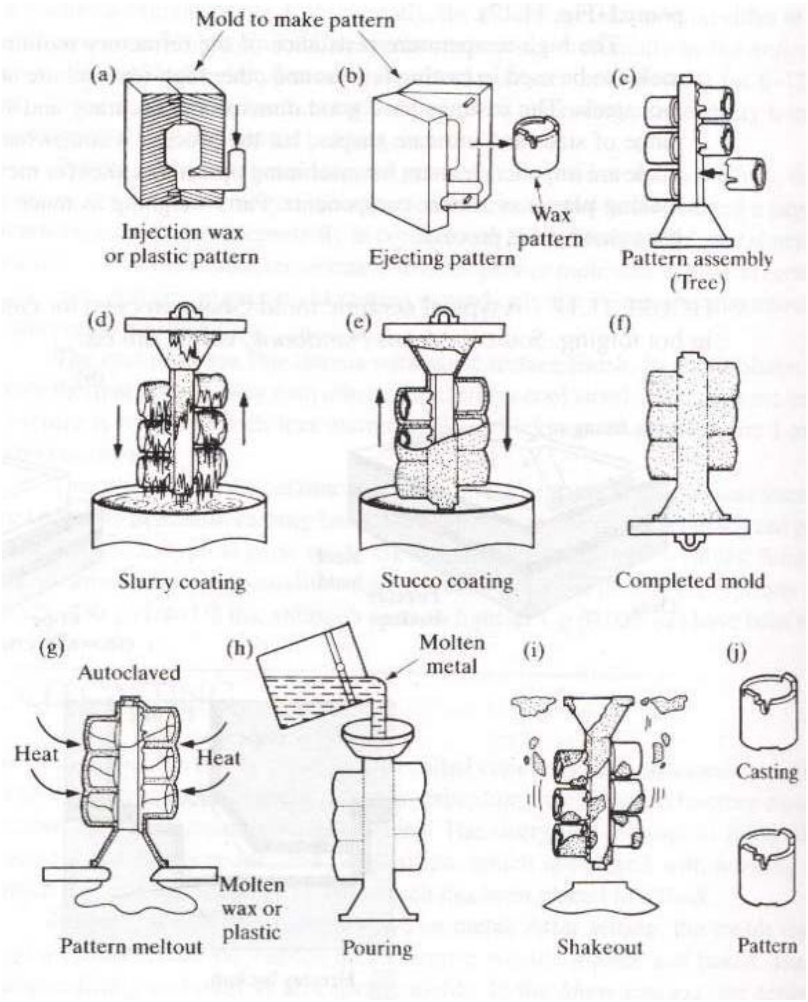
مقاومت این قالب در دماهای بالای این نوع قالب سبب شده است تا برای ریخته‌گری فلزات آهنی و آلیاژهای دما بالا، فولاد زنگ نزن و فولادهای ابزار استفاده شوند. قطعهٔ ریخته‌گری شده دارای دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح خوب می‌باشد. قطعات ریخته‌گری شده با این روش می‌توانند دارای اشکال پیچیده با ابعاد مختلف باشند. این فرایند یک روش تولید گران قیمت می‌باشد. قطعاتی که معمولا با این روش تولید می‌شوند، پره‌های توربین، ابزار برش ماشینکاری، قالب‌های مورد استفاده در شکل‌دهی فلزات و قالب‌های مورد استفاده برای قطعات پلاستیکی و یا لاستیکی می‌باشد. قطعاتی با وزن بیش از 700 kg با این فرایند تولید شده‌اند.

۲-۸. ریخته‌گری دقیق[1]

از فرایند ریخته‌گری دقیق یا ریخته‌گری مومی[2] برای اولین بار در ۴۰۰۰-۳۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح استفاده شده است. الگو از موم یا پلاستیک (نظیر پلی استایرن) با روش‌های مدل‌سازی (یا مدل‌سازی سریع) ساخته می‌شود. مراحل این فرایند در شکل ۸ آمده است.

[1] Investment casting
[2] Lost-wax process

www.jozveha.ir



شکل ۸- تصویر شماتیک از ریخته‌گری دقیق. با استفاده از این روش می‌توان قطعات مختلفی را با دقت ابعادی خوبی ریخته‌گری نمود.

۲-۹. قالب‌های دائمی

همانطور که از اسمش پیداست، قالب‌های دائمی به صورت مکرر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قالب‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قطعهٔ ریخته‌گری شده به آسانی بتواند از داخل آن برداشته شود تا بتوان دوباره از قالب برای ریخته‌گری قطعهٔ بعدی استفاده نمود. برای ساخت این قالب‌ها از فلزاتی که در دماهای بالا استحکام دارند استفاده می‌شود. از آنجاییکه قالب‌های فلزی دارای هدایت حرارتی بهتری نسبت به قالب‌های غیردائمی می‌باشند، انجماد قطعهٔ ریخته‌گری سریع انجام می‌شود که این موضوع بر روی میکروساختار و اندازهٔ دانهٔ ریختگی تاثیر می‌گذارد.

در قالب‌های دائمی دو نیمهٔ قالب از موادی نظیر فولاد، برنز و گرافیت ساخته می‌شوند. حفره‌های قالب و سیستم راهگاهی در داخل قالب ماشینکاری می‌شوند. معمولا از چدن خاکستری، فولاد کم‌کربن و فولاد گرم‌کار به عنوان ماهیچه استفاده می‌شود. استفاده از چدن خاکستری به عنوان ماده خام ماهیچه معمول‌تر است.برای افزایش عمر قالب‌های دائمی، سطوح حفره‌های قالب توسط دوغابی از مواد مقاوم پوشانده می‌شود و یا بعد از تولید چند قطعه با اسپری لایه‌ای از گرافیت روی کویته‌ها قرار می‌گیرد.

با این فرایند می‌توان قطعاتی یکنواخت با کیفیت سطح خوب، تلرانس‌های کم و خواص مکانیکی خوب در تیراژ بالا تولید نمود. قطعات معروف تولید شده با این روش پیستون‌های موتورهای احتراق داخلی، سرسیلندر و وسایل آشپزخانه می‌باشد.

www.jozveha.ir

۲-۹-۱. ریخته‌گری تحت فشار[1]

دایکست یا ریخته‌گری تحت فشار عبارت است از روش تولید قطعه از طریق تزریق فلز مذاب تحت فشار به درون قالب. روش دایکست از این نظر که در آن فلز مذاب به درون حفره‌ای به شکل قطعهٔ مورد نظر رفته و پس از سرد شدن قطعهٔ مورد نظر به دست می‌آید، بسیار شبیه ریخته‌گری ریژه می‌باشد. تنها اختلاف بین این دو روش در نحوهٔ پرکردن حفرهٔ قالب است. در قالب ریژه، فلز مذاب تحت فشار وزن خود سیلان پیدا کرده و به درون قالب می‌رود، حال آنکه در روش دایکست فلز مذاب تحت فشار و سرعت بیشتری به درون قالب می‌رود. به همین دلیل در دایکست قطعات با اشکال پیچیده‌تری را می‌توان تهیه کرد.

در ریخته‌گری تحت فشار مواد مذاب پس از بسته شدن قالب، به داخل یک نوع پمپ یا سیستم تزریق (بسته به طرح دستگاه) هدایت می‌شود، سپس در حالیکه پلانجر[2] مواد مذاب را با سرعت از طریق سیستم تغذیهٔ قالب به داخل حفره می‌فرستد، هوای داخل حفره‌ها از طریق سوراخ‌های هواکش[3] خارج می‌شود. این پمپ در بعضی از دستگاه‌ها دارای درجه حرارت محیط و در برخی دیگر دارای درجه حرارت مذاب می‌باشد.

معمولا مقدار مواد مذاب تزریق شده بیش از اندازهٔ مورد نیاز جهت پرکردن حفره بوده تا سرباره‌گیرها[4] را پر کند و حتی پلیسه در اطراف قطعه بوجود بیاورد. سپس در مرحلهٔ دوم مادامی که مادهٔ مذاب در حال سرد و منجمد شدن در داخل حفره می‌باشد، پمپ همچنان فشار خود را اعمال شده نگه می‌دارد. در مرحلهٔ سوم قالب باز شده و قطعه به بیرون پران می‌شود. در آخرین مرحله همچنان که قالب باز است داخل حفره‌ها تمیز و در صورت نیاز روغنکاری شده و دوباره بسته و آمادهٔ تکرار عملیات قبل می‌گردد. مهمترین مزایای دایکاست عبارتند از:

- اشکال پیچیده‌تری را می‌توان تولید کرد.
- به دلیل آنکه قالب با سرعت و تحت فشار پر می‌شود، قطعات با دیواره‌های نازکتری را می‌توان تولید نمود و خلاصه آنکه در این روش نسبت طول قطعه به ضخامت قطعه به مراتب از سایر روش‌ها بیشتر است.
- نرخ تولید (سرعت) در این روش خیلی بالاست، خصوصا اگر قالب‌های چند حفره‌ای مورد استفاده قرار گیرند.
- معمولا قطعهٔ تولید شده به وسیلهٔ دایکاست از پرداخت سطح خوبی برخوردار است و احتیاج به عملیات ماشینکاری بعدی ندارد و به این دلیل عملیات فوق‌العاده اقتصادی می‌باشد.
- قالب‌های دایکست مثل قالب‌های ریژه معولا قبل از آنکه فرسوده شوند و در ابعاد قطعهٔ تولید شده اختلالی بوجود آید، هزاران قطعه تولید خواهند کرد، درنتیجه سرمایه‌گذاری برای تولید قطعه کمتر می‌باشد.
- نسبت به دیگر روش‌های تولید قطعه از فلز مذاب، با این روش می‌توان به مقاطع ظریف‌تر دست یافت.
- اغلب قطعات تولید شده با کمترین پرداخت‌کاری آمادهٔ آب فلزکاری می‌باشند.
- قطعات آلومینیومی تولید شده توسط دایکست معمولا نسبت به روش‌های دیگر مانند ریخته‌گری آلومینیم در ماسه مقاومت بیشتری دارند.

از طرف دیگر محدودیت‌های این روش به قرار زیر است:

- وزن قطعه محدود است. به ندرت وزن قطعه از ۲۵ کیلوگرم بیشتر است و معمولا کمتر از ۵ کیلوگرم می‌باشد.
- نسبت به شکل قطعه و سیستم تغذیهٔ قالب، مک دار بودن قطعه به دلیل وجود حباب هوا از مشکلات این روش است.

---

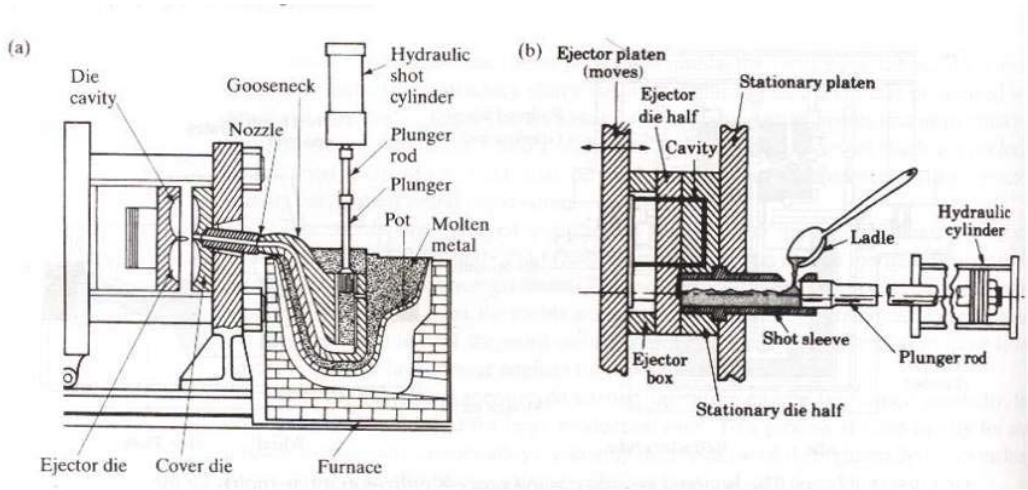
[1] Die cast
[2] Plunger
[3] Vent
[4] Overflow

www.jozveha.ir

- امکانات تولید از قبیل قالب، ماشین و لوازم جنبی نسبتا گران بوده، در نتیجه فقط تولید بـه مـیزان زیـاد ایـن روش را اقتصادی می‌کند.
- به غیر از موارد استثنایی فقط فلزاتی را می‌توان در دایکست مورد استفاده قرار داد که نقطهٔ ذوب آنها چیزی در حـد آلیاژهای مس باشد.

۲-۹-۱ انواع فرایندهای دایکست

انواع فرایندهای دایکست به طور کلی به دو نوع تقسیم می‌شوند: فرایند تزریق با محفظه (سیلندر) گرم[1]، فزایند تزریق با محفظهٔ سرد[2] (شکل ۹). در فرایند محفظه گرم یک پیستون حجم مشخصی از ماده و نیرو را از طریق یـک مجـرای گردن غازی[3]و نازل به طرف حفره‌های قالب می‌فرستد. در این حالت بازهٔ فشار تا 35 MPa (5000 psi) با متوسـط فشـار 15 MPa (2000 psi) می‌باشد. مذاب تا هنگام منجمد شدن زیر فشار قرار می‌گیرد. برای افزایش عمر قالب و برای کمک به زودتـر خنک‌شدن فلز و کاهش زمان تولید، معمولا در قالب از یک سیستم چرخهٔ آب یا روغن که از مسیرهای مختلف در بلـوک قالب می‌گذرد، استفاده می‌شود. زمان‌های این چرخه معمولا در رنج تا ۹۰۰ ضرب (تزریق انفرادی) در ساعت برای روی، می‌باشد. ناگفته نماند که قطعات کوچک را می‌توان تا ۱۸۰۰۰ ضرب در ساعت نیز با این فرایند تولید نمـود. در شـکل ۱۰ نماهای واقعی و شماتیک ماشین‌ها دایکست محفظه گرم و سرد آمده است.



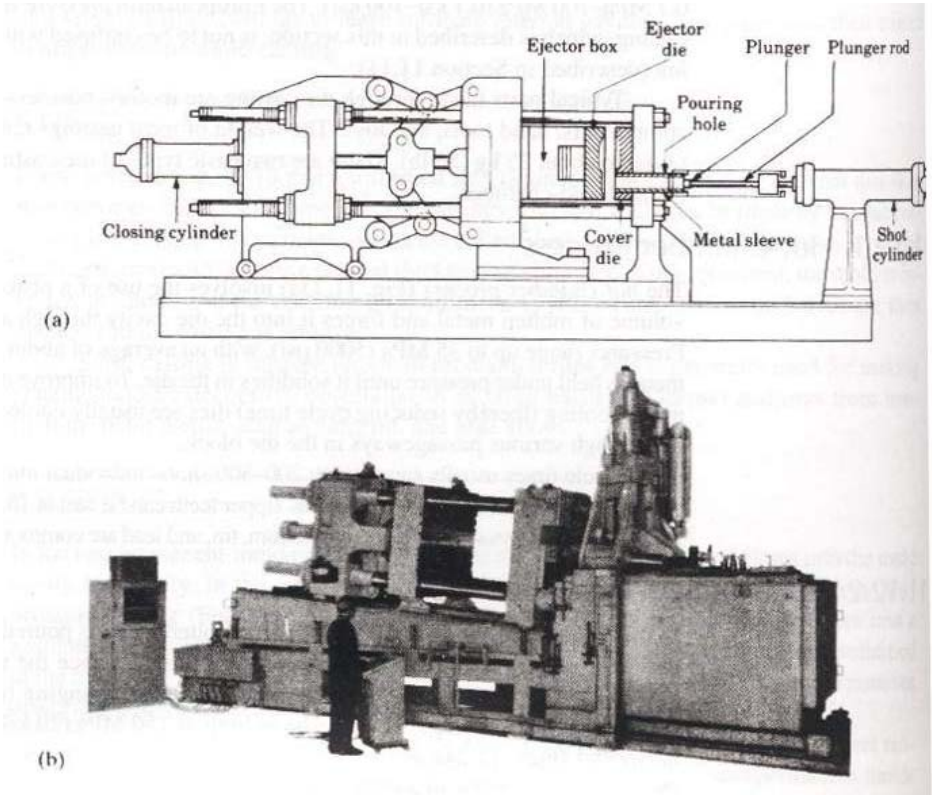
شکل ۹- (a) فرایند محفظه گرم (b) فرایند محفظه سرد.

روش محفظه سرد

در روش محفظه سرد مواد مذاب داخل یک سیلندر ریخته می‌شوند. در این روش محفظه گرم نمی‌شود. معمولا فلز در فشار 20 MPa تا 70 MPa (3 psi-10 psi) به داخل حفره‌های قالب ریخته می‌شود. ماشین می‌توانـد افقـی یـا عمـودی باشـد. آلیاژهایی با نقطهٔ ذوب بالا نظیر آلومینیوم، منیزیم و مس معمولا با این روش ریخته‌گری می‌شوند. بقیـهٔ فلـزات (شـامل فلزات آهنی) را نیز می‌توان با این روش ریخته‌گری کرد.

[1] Hot chamber
[2] Cold chamber
[3] Goose neck

www.jozveha.ir



شکل ۱۰- (a) نمای شماتیک ماشین دایکست محفظه سرد. این ماشین در مقایسه با اندازهٔ قطعهٔ مورد ریخته‌گری بزرگ است چراکه به نیروهای بزرگی برای بسته‌نگه‌داشتن دو نیمهٔ قالب در طی فرایند تزریق نیازاست. (b) یک ماشین دایکست محفظه گرم، DAM 8005 (ساخت آلمان، ۱۹۹۸). این دستگاه بزرگترین دستگاه دایکست محفظه گرم در دنیاست و قیمت آن در حدود ۱/۲۵ میلیون دلار می‌باشد.

۲-۱۰. ریخته‌گری گریز از مرکز[1]

همانطور که از نامش پیداست در فرایند ریخته‌گری گریز از مرکز مذاب توسط نیروی گریز از مرکز داخل حفره‌ها پخش می‌شود. این روش برای اولین بار در دههٔ ۱۸۰۰ پیشنهاد شد. سه نوع ریخته‌گری گریز از مرکز وجود دارد: ریخته‌گری گریز از مرکز خالص[2]، ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز[3] و ریخته‌گری گریز از مرکز[4].

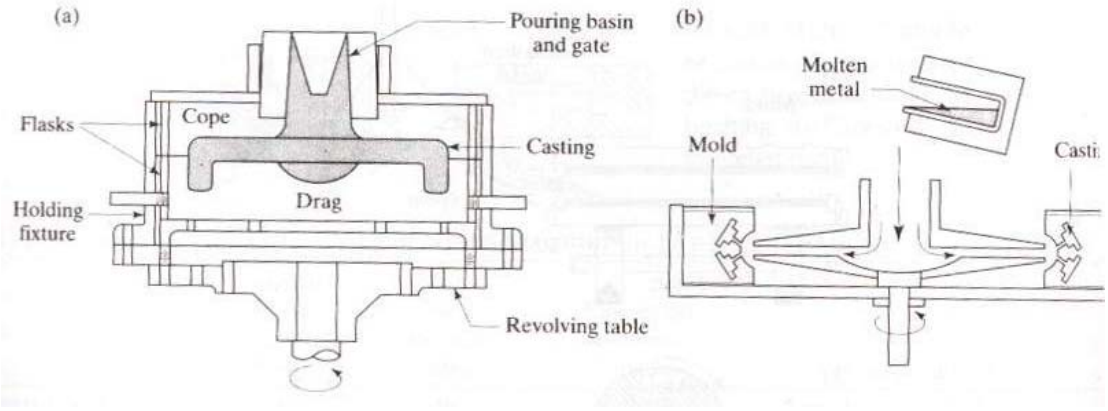
ریخته‌گری گریز از مرکز خالص: قطعات استوانه‌ای شکل نظیر لوله‌ها، لوله‌های تفنگ و ... توسط ریخته‌گری گریز از مرکز خالص تولید می‌شوند. در این روش فلز مذاب در داخل قالب در حال گردش ریخته می‌شود. محور چرخش معمولا افقی است ولی برای قطعات کوچک می‌تواند به صورت عمودی نیز باشد. قالب از فولاد، آهن و گرافیت ساخته می‌شود و با آلیاژهای مقاوم حرارتی پوشش داده می‌شود. سطوح قالب را می‌توان به اشکال مختلف ساخت، بنابراین می‌توان با این روش لوله‌هایی با سطوح خارجی مختلف نظیر مربع، چند ضلعی و ... تولید نمود. سطح داخل قطعه همچنان استوانه‌ای باقی‌می‌ماند چراکه فلز مذاب به خاطر نیروی گریز از مرکز به صورت یکنواخت پخش می‌شود. البته به دلیل اختلاف دانسیته المان‌های سبک‌تر نظیر تفاله[5]، ناخالصی‌ها[6] و قطعات آلیاژهای مقاوم حرارتی بر روی سطح داخلی ریخته می‌نشینند. سیلندرهایی از قطر 13 mm (0.5 in) و با طول 3 m (10 ft) با ضخامتی از 6 mm تا 125 mm (0.25 in) را می‌توان با

[1] Centrifugal casting
[2] True centrifugal casting
[3] Semi-centrifugal casting
[4] Centrifuging
[5] Dross
[6] Impurities

www.jozveha.ir

این روش تولید نمود. فشار تولیدی به دلیل نیروهای گریز از مرکز تا 150 g's می‌باشد. این فشار برای تولید قطعات با ضخامت کم لازم است. ریخته‌گری با کیفیت خوب، دقت ابعادی بالا و سطوح خارجی دقیق را می‌توان با این روش داشت. علاوه بر لوله‌ها، قطعاتی نظیر بوش‌ها، رینگ‌های آب‌بندی و بوش‌های سیلندر موتور با این روش تولید می‌شود.

ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز: در شکل ۱۱-b مثالی از استفاده از این روش آمده است. از این روش برای تولید قطعاتی با تقارن محوری استفاده می‌شود.



شکل ۱۱- (a) ریخته‌گری نیمه گریز از مرکز. (b) ریخته‌گری گریز از مرکز.

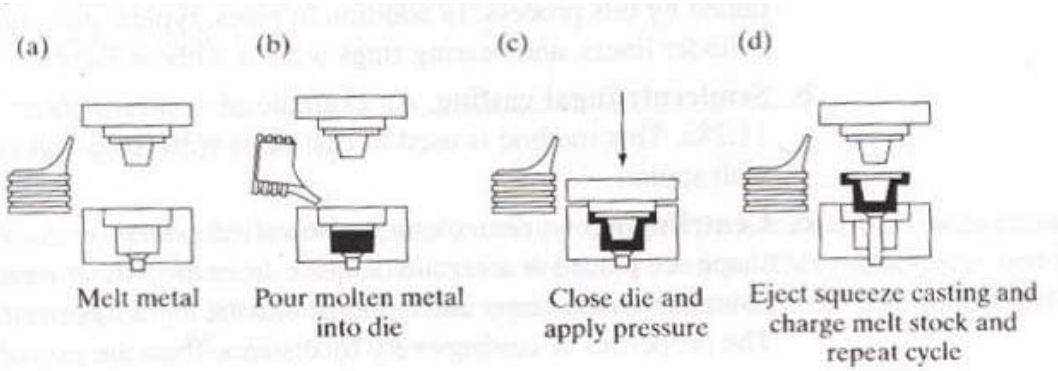
ریخته‌گری گریز از مرکز: در این روش کویته‌های قالب با هر شکلی در مکان مشخصی نسبت به محور دوران قرار می‌گیرند. فلز مذاب از مرکز ریخته می‌شود و به خاطر نیروی گریز از مرکز به داخل قالب فشرده می‌شود. خواص ریختگی با فاصله از دوران تغییر می‌کند.

۲-۱۱. ریخته‌گری فشاری[1]

فرایند ریخته‌گری فشاری در دهۀ ۱۹۶۰ گسترش پیدا کرد. این فرایند شامل انجماد فلز مذاب در زیر فشارهای بالا می‌باشد. بنابراین ترکیبی از ریخته‌گری و فورج خواهیم داشت (شکل ۱۲). لوازم این فرایند عبارتند از یک قالب، پانچ و پین پران[2]. فشار اعمالی به پانچ باعث نگه‌داشتن گازهای خروجی در محلول (خصوصا هیدروژن در آلیاژهای آلومینیوم) و فشار تماسی در سطوح فلز و قالب باعث انتقال حرارت می‌گردد که این موضوع باعث بهبود خواص ماشینکاری و ساختار مناسب می‌گردد. قطعات با اشکال پیچیده و با صافی سطح دقیق چه از جنس فلزات آهنی چه غیر آهنی را می‌توان با این روش تولید کرد. قطعات تولیدی معمول با این روش عبارتند از: قطعات خودرو و بدنۀ هاونگ.

[1] Squeeze casting
[2] Ejector pin

www.jozveha.ir



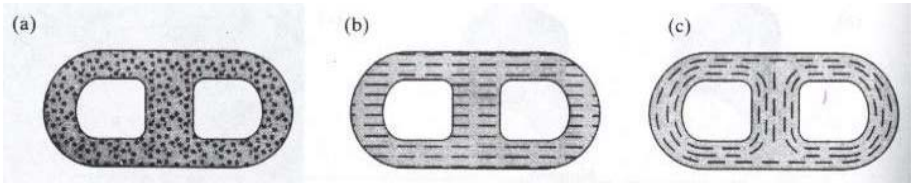
شکل ۱۲– مراحل فرایند ریخته‌گری فشاری. این فرایند مزایای ریخته‌گری و فورج را توامان دارد.

www.jozveha.ir

فورج[1] (آهنگری، پتک‌کاری)

۱. مقدمه

فورج (آهنگری) به فرایندی گفته می‌شود که قطعه با تغییر شکل پلاستیک به خاطر اعمال نیروهای فشاری تولید می‌شود. فورج یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای فلزکاری شناخته‌شده می‌باشد (با قدمتی در حدود ٤٠٠٠ سال قبل از میلاد مسیح). از این روش برای ساختن قطعات با اشکال، اندازه و جنس‌های مختلف استفاده می‌شود. با این روش می‌توان جریان فلز و ساختار دانه‌ای آن را کنترل نمود و در نتیجه به استحکام و چقرمگی خوبی دست یافت. از این روش برای تولید قطعاتی که شرایط کاری تنش بالا و بحرانی کارمی‌کنند استفاده می‌شود (شکل ۱). از قطعات معروفی که امروزه با استفاده از این روش تولید می‌شوند می‌توان به میل‌لنگ، شاتون، دیسک‌های توربین‌ها، چرخ‌دنده‌ها، چرخ‌ها و ابزارالات اشاره نمود. فورج را می‌توان در دمای اتاق (فورج سرد) یا در دماهای بالاتر (فورج گرم و فورج داغ بسته به دما) انجام داد.



شکل ۱- قطعهٔ ساخته شده با سه روش (a) ریخته‌گری، (b) ماشینکاری، (c) فورج.

در فورج سرد به نیروهای فوق‌العاده بزرگی برای شکل‌دادن قطعه نیاز است و مادهٔ خام بایستی به اندازهٔ کافی قابلیت چکش‌خواری داشته باشد، در عوض قطعهٔ تولیدی با این روش دارای سطح پایانی و دقت ابعادی خوبی است. در فورج داغ به نیروی کمتری نیاز است ولی قطعات تولیدی با این روش دارای سطح پایانی و دقت ابعادی چندان خوبی نیستند.

معمولا قطعات تولیدی توسط فورج به عملیات اضافی (پایانی) جهت تبدیل شدن به قطعه مناسب کار و حصول دقت مطلوب نیاز دارند. با استفاده از روش فورج دقیق[2] می‌توان این عملیات را به حداقل رساند. قطعه‌ای که با استفاده از فورج تولید می‌شود را نیز می‌توان با سایر روش‌ها نظیر ریخته‌گری، متالورژی پودر و ماشینکاری تولید نمود ولی همانطور که انتظار می‌رود هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های مربوط به خود از نظر استحکام، چقرمگی، دقت ابعادی، سطح پایانی و نقص‌های ساختاری هستند.

۲. فورج با قالب باز

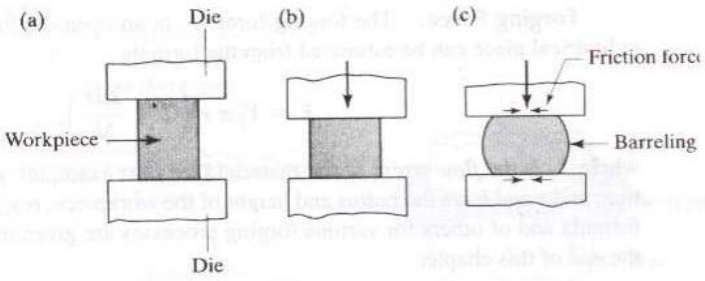
آسان‌ترین روش فورج، فورج با قالب باز می‌باشد. در این روش قطعه کار بین قالب‌های تختی که فلز را به طور کامل محدود نمی‌کنند کوبیده می‌شود. در این روش قطعه به شکل قالب درنمی‌آید، بلکه به کمک حرکت‌های دست، پرس و پتک شکل می‌یابد. با استفاده از این روش قطعاتی با وزن 15 kg-500 kg تا حتی 300 ton ساخته شده است. اندازهٔ این قطعات ممکن است از قطعات کوچک تا شفت‌هایی با طول 23 m (مورد استفاده در پروانه کشتی‌ها) متغیر باشد.

فرایند فورج با قالب باز را می‌توان به صورت قرار دادن قطعه مابین دو کفهٔ قالب و کاهش ارتفاع قالب به سبب نیروهای فشاری (شکل ۲) تعریف نمود. به این روش چاق کردن (Upsetting) و یا فورج با قالب تخت[3] نیز گفته می‌شود. اگر شرایط کاملا ایده‌ال (اصطکاک وجود نداشته باشد) قطعه به صورت شکل 2-b درمی‌آید و در حالت واقعی به سبب نیروهای

[1] Forging
[2] Precision forging
[3] Flat-die forging

www.jozveha.ir

اصطکاکی قطعه بشکه‌ای شکل می‌شود. این فرایند همچنین کلوچه‌ای شدن[1] یا بشکه‌ای شدن[2] نیز نامیده می‌شود. بعضی از این نوع قالب‌ها ممکن است Vشکل یا نیم‌دایره‌ای باشند.



شکل ۲- (a) یک قطعهٔ مکعبی که بین دو قالب تخت در حال چاق شدن است. (b) تغییر شکل یکنواخت در نبود اصطکاک. (c) تغییر شکل باوجود اصطکاک. توجه شود که بشکه‌ای شدن مکعب به سبب نیروهای اصطکاک بین قطعه و سطح قالب می‌باشد.

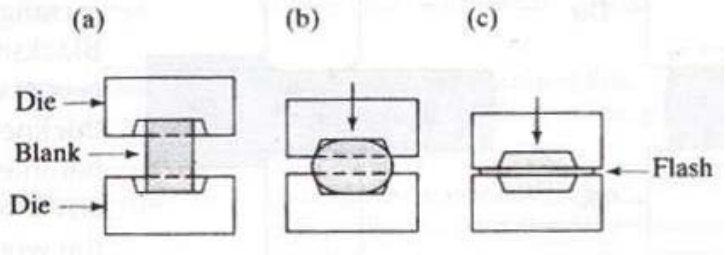
نیروی فورج. نیروی فورج، F، در یک فرایند فورج قالب باز برای یک قطعهٔ استوانه‌ای شکل از رابطهٔ زیر تخمین زده می‌شود:

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3h}\right)$$

که Y_f تنش سیلان ماده، μ ضریب اصطکاک و r و h به ترتیب شعاع و ارتفاع قطعه می‌باشند.

۳. فورج با قالب حفره‌دار[3] و قالب بسته

در فورج با قالب حفره‌دار قطعه خام توسط نیروهای فشاری پرس به شکل حفره‌های قالب در می‌آید (شکل ۳). توجه شود که مقداری از ماده بین دو نیمه قالب به صورت زائده[4] باقی می‌ماند. زائده نقش بسیار مهمی در جریان ماده در قالب‌های حفره‌دار ایفا می‌کند. این زائده کوچک سریعا خنک می‌شود و به سبب مقاومت اصطکاکی، مادهٔ داخل حفره‌های قالب را تحت فشار بالا قرار می‌دهد و باعث پر شدن کامل حفره‌های قالب می‌شود.

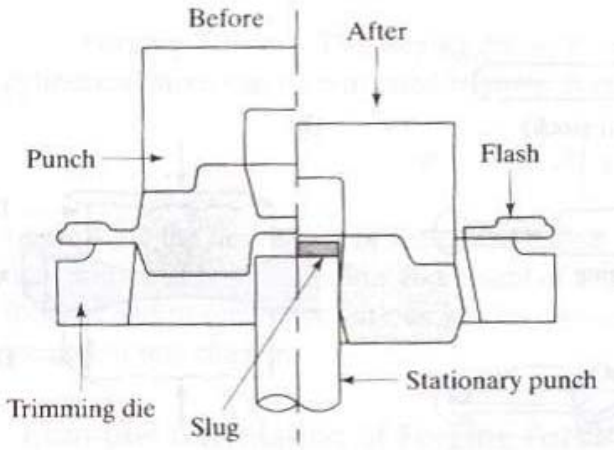


شکل ۳- مراحل شکل دهی بیلت در قالب حفره‌دار. نوجه شود که مقداری از مادهٔ اضافی به صورت زائده در بین دو نیمهٔ قالب باقی می‌ماند که بعدا بایستی بریده شود.

ماده خام (بلانک) ممکن است از فرایندهایی نظیر ریخته‌گری، متالورژی پودر، برشکاری و یا فورج بدست آمده بیاید. این بلانک روی نیمهٔ پایینی قالب قرارمی‌گیرد و با پایین آمدن نیمهٔ بالایی قالب به تدریج شکل می‌گیرد، همانطور که در شکل ٤ شکل‌دهی یک شاتون نشان داده شده است.

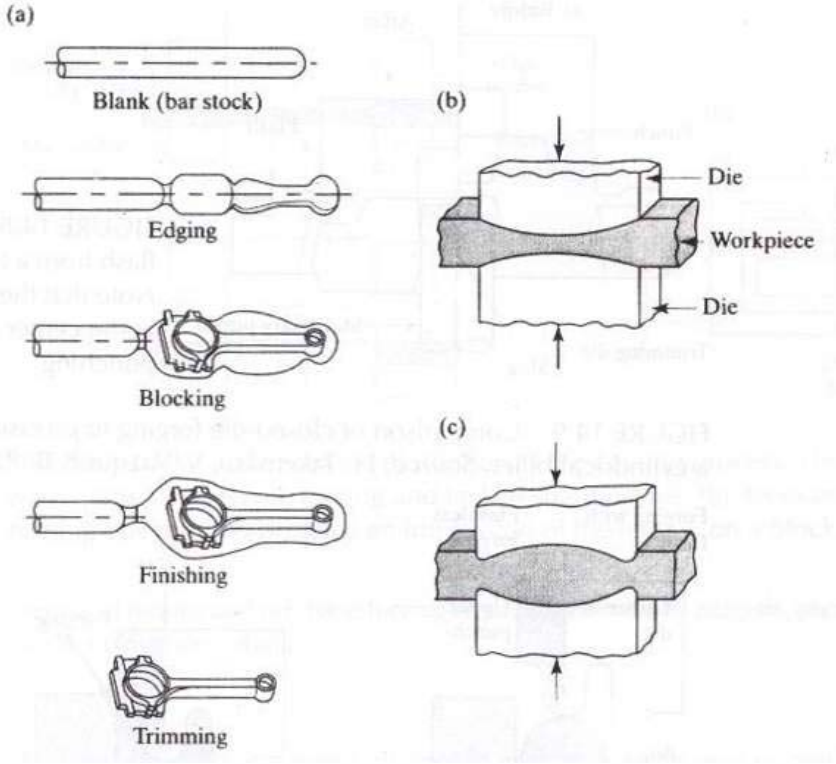
1 Pancaking
2 Barreling
3 Impression-die
4 Flash or Fin

www.jozveha.ir



شکل ۵- برش زائده یک قطعهٔ فورج شده. به مادهٔ نازک کنده شده توسط پانچ در وسط توجه شود.

از فرایندهای ماقبل شکل‌دهی نظیر باریک‌سازی[1] و لبه‌زنی[2] برای توزیع ماده به قسمت‌های مختلف بلانک استفاده می‌شود. در باریک‌سازی ماده از یک ناحیه به سمت بیرون دور می‌شود و در لبه‌زنی در یک ناحیه جمع می‌گردد. سپس قطعه توسط فرایند لقمه‌کاری[3] و با استفاده از قالب‌های لقمه‌زنی به صورت ظاهری شاتون درمی‌آید. درآخرین عملیات فورج قطعه توسط قالب‌های حفره‌دار به شکل نهایی را به خود می‌گیرد. در انتها زائده برشکاری می‌شوند.



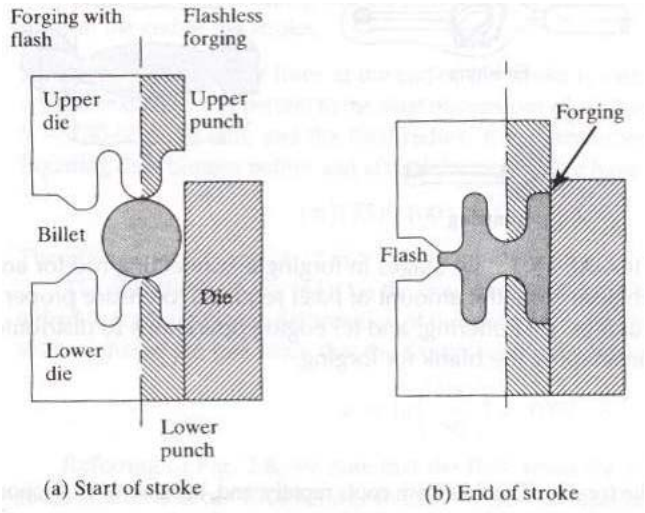
شکل ٤- (a) مراحل فورج شاتون مورد استفاده در موتورهای احتراق داخلی. به مقدار زائده مورد نیاز برای اطمینان از پر شدن کامل حفره‌های قالب توجه شود. (b) مراحل باریک سازی و (c) لبه‌زنی به منظور توزیع ماده به منظور آماده‌سازی قطعه خام برای فورج.

در شکل‌های ۵ و ۶-a مثال‌هایی از فورج در قالب‌های بسته آورده شده است. البته در فورج دقیق یا بدون زائده[4]، زائده‌ای شکل نمی‌گیرد و ماده قالب را به طور کامل پر می‌کند (سمت راست شکل ۶-b). برای تولید یک قطعه با ابعاد و

[1] Fullering
[2] Edging
[3] Blocking
[4] Flashless

www.jozveha.ir

تلرانس‌های دقیق طراحی صحیح قالب ضروری می‌باشد. در این روش بلانک کوچک‌تر از اندازه باعث پر نشدن کامل قالب و بلانک بزرگ‌تر از اندازه موجب ایجاد فشارهای فوق‌العاده که سبب تخریب قالب می‌شود، می‌گردد. در جدول ۱ مزایا و معایب هرکدام از روش‌های معول فورج آمده است.



شکل ۶- مقایسه بین فورج با قالب بسته و فورج دقیق یا بدون زائده یک قطعه

جدول ۱- مقایسهٔ مزایا و محدودیت‌های انواع روش‌های فورج

فرایند	مزایا	محدودیت‌ها
قالب باز (Open die)	ساده؛ قالب‌های ارزان؛ مفید برای تعداد کم؛ تولید با ابعاد مختلف؛ خواص استحکامی خوب	محدود به اشکال ساده؛ به سختی می‌توان به تلرانس‌های دقیق دست یافت؛ نرخ پایین تولید: محدودیت در نوع ماده خام؛ نیاز به مهارت بالا
قالب بسته (Closed die)	کم شدن محدودیت نوع ماده خام؛ معمولا دارای خواص بهتر نسبت به قالب باز؛ دقت ابعادی خوب: نرخ تولید بالا؛ قابلیت تکرارپذیری خوب	قیمت بالای قالب برای تولید کم؛ اغلب نیاز به ماشینکاری می‌باشد
نوع بلاکر (Blocker type)	قیمت ارزان؛ نرخ تولید بالا	نیاز به ماشینکاری به منظور عملیات پایانی ضروری است؛ داشتن قوس‌های بزرگ و پره‌های ضخیم ضروری است
نوع کانونشنال (Conventional type)	نسبت به نوع بلاکر نیاز به ماشینکاری خیلی کمتری دارد؛ نرخ تولید بالا؛ استفادهٔ مناسب از ماده	گاهی اوقات گرانتر از نوع بلاکر است
نوع دقیق (Precision type)	تلرانس‌های دقیق؛ اغلب نیازی به ماشینکاری نمی‌باشد؛ ممکن بودن تولید فلانج و پره‌های خیلی نازک	نیاز به نیروهای بالا، قالب‌های پیچیده، و مشکلات خروج قطعه از قالب

٤. سکه‌زنی[1]

سکه‌زنی اساسا یک فرایند فورج قالب بسته برای شکل دادن سکه‌ها، مدال‌ها و جواهرات (شکل؟؟؟؟؟؟؟) می‌باشد. برای رسیدن به ابعاد دقیق به فشارهایی تا پنج یا شش برابر استحکام ماده نیاز است. در این فرایند از مواد روانکار نمی‌توان استفاده نمود زیرا باعث پر شدن حفره‌های قالب شده و در این فشارهای اعمالی رفتار غیر قابل تراکم داشته و از شکل‌دهی دقیق قطعه جلوگیری می‌کنند. از فرایند سکه زنی با فورج برای ایجاد دقت ابعادی روی سایر قطعات نیز

[1] Coining

www.jozveha.ir

استفاده می‌شود. این فرایند، اندازه‌کردن[1] نامیده می‌شود. فرایند اندازه‌کردن به همراه فشارهای بالا و تغییر شکل قطعه می‌باشد. حک کردن حروف و اعداد روی قطعات را می‌توان با فرایندی شبیه به سکه زنی با سرعت انجام داد.

۵. نیروی فورج

نیروی فورج، F، لازم در فرایند فورج با قالب حفره‌دار از رابطهٔ زیر بدست‌می‌آید:

$$F = kY_f A$$

که k یک ضریب (از جدول ۲ بدست می‌آید)، Y_f تنش سیلان ماده در دمای فورج و A سطح مورد فورج به همراه زائده می‌باشد. در فورج داغ فشار واقعی فورج از 550 MPa تا 1000 MPa (80 psi-140 psi) تغییر می‌کند.

جدول ۲- مقادیر k برای محاسبه نیروی فورج

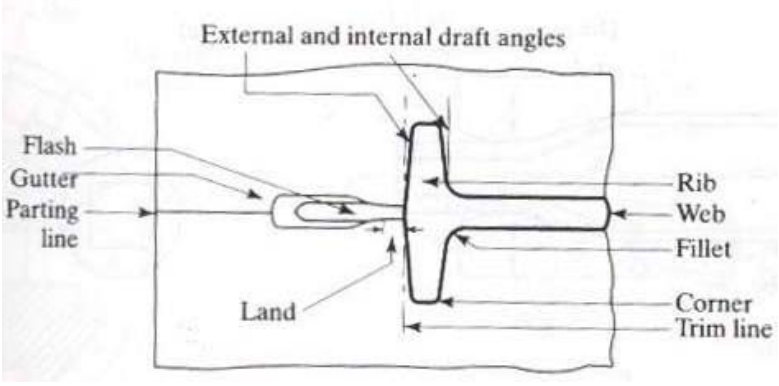
اشکال ساده بدون زائده	3-5
اشکال ساده با زائده	5-8
اشکال پیچیده با زائده	8-12

۶. طراحی قالب‌های فورج

طراحی قالب‌های فورج به دانش زیادی دربارهٔ خواص استحکام، چکش‌خواری، حساسیت به نرخ تغییرشکل و دما، اصطکاک و شکل قطعه نیاز دارد. اعوجاج قالب تحت بارهای بالا، خصوصا در تولید قطعات با تلرانس کم قابل ملاحظه می‌باشد. مهم‌ترین قانون در طراحی قالب این است که قطعه در هنگام عملیات فورج در جهتی که دارای کمترین مقاومت است جریان می‌یابد. بنابراین قطعه (شکل میانی) بایستی به گونه‌ای شکل داده شود تا تمامی حفره‌های قالب پر شود. در شکل a-٤ مثالی از شکل‌دهی میانی یک شاتون آمده است.

شکل‌دهی اولیه[2] در شکل‌دهی اولیه قطعه، ماده نباید به آسانی به سمت زائده حرکت کند. الگوی جریان دانه‌ای بایستی مطلوب باشد و لغزش‌های شدید بین قطعه و قالب بایستی به حداقل برسد تا فرسایش کاهش یابد. انتخاب اشکال نیازمند تجربهٔ زیادی بوده، شامل محاسبات سطوح مقطع در هر موقعیتی از فورج می‌باشد. از آنجاییکه ماده در این فرایند تحت تغییرشکل‌های مختلفی در مناطق مختلف حفره‌های قالب می‌باشد، خواص مکانیکی بستگی به موقعیت فورج دارد.

طراحی قالب در شکل ۷ اجزای استاندارد قالب‌های مختلف فورج بسته معمولی آمده است. در ادامه دربارهٔ این اجزا توضیح داده شده است، بعضی از آنها شبیه به موارد گفته شده دربارهٔ ریخته‌گری می‌باشد.



شکل ۷- اجزای استاندارد قالب‌های مختلف فورج بسته معمولی.

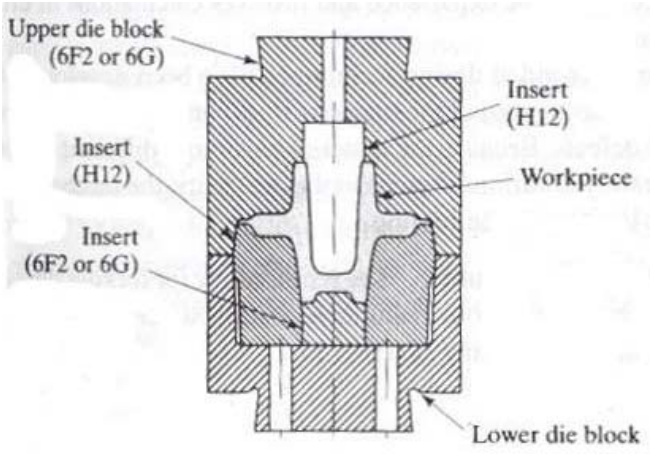
[1] Sizing
[2] Preshaping

www.jozveha.ir

در اغلب قطعات فورج‌شده، خط جدایش (Parting line) درست در مکان بزرگترین سطح مقطع قطعه قرار دارد. در قطعات متقارن خط جدایش معمولا خط مستقیمی در مرکز قطعه می‌باشد اما در قطعات پیچیده این خط در یک صفحه قرار ندارد. این قالب‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا هنگام کار قفل شده و از حرکت‌های عرضی قالب جلوگیری شود. در این حالت تعادل نیروها و هم‌محوری قطعات قالب حفظ می‌گردد. بعد از آنکه قالب پر شد به اضافهٔ مواد اجازه داده می‌شود که به داخل سیمراهه (Gutter) راه پیدا کند. این موضوع باعث می‌شود که این مواد اضافی باعث بالا بردن فشار قالب نشوند. معمولا ضخامت زائده (Flash) برابر 3% بیشترین ضخامت قطعه فورج‌کاری می‌باشد. طول تکهٔ مسطح (Land) معمولا دو تا پنج برابر ضخامت زائده می‌باشد. در طی سالها چند طراحی مختلف برای سیمراه ارائه شده است. در اغلب قالب‌های فورج به زاویهٔ شیب (Draft angle) مناسب برای بیرون آمدن قطعه از قالب نیاز می‌باشد. قطعه در هنگام خنک‌شدن هم از نظر طولی و هم از نظر شعاعی منقبض می‌شود بنابراین زوایای شیب داخلی بزرگتر از زوایای شیب خارجی ساخته می‌شوند. زوایای داخلی در حدود ۷ تا ۱۰ درجه و زوایای خارجی در حدود ۳ تا ۵ درجه می‌باشند.

انتخاب صحیح اندازهٔ شعاع‌ها و گوشه‌ها به منظور اطمینان خاطر از جریان آرام فلز به داخل حفره‌ها و افزایش عمر قالب بسیار مهم است. معمولا شعاع‌های کوچک غیرمطلوب می‌باشد، چراکه جریان فلز را با سختی مواجه کرده، فرسایش قالب را بالا می‌برد (به دلیل ایجاد تمرکز تنش و حرارت). قوس‌های کوچک همچنین سبب ایجاد ترک‌های ناشی از خستگی[1] در قالب می‌شود. بنابراین مقدار این قوس‌ها تا آنجاییکه طراحی قطعهٔ فورج‌کاری اجازه می‌دهد باید بزرگ باشد.

در فرایند فورج، خصوصا برای قطعات پیچیده می‌توان از قالب‌های چندتکه به جای قالب‌های یک‌تکه استفاده نمود (شکل ۸). این موضوع باعث کاهش هزینه‌های ساخت قالب‌های مشابه می‌شود. این تکه‌ها (مغزی‌ها) را می‌توان از مواد پراستحکام‌تر و سخت‌تر ساخت. در صورت فرسایش و شکست این تکه‌ها آنها را به راحتی می‌توان تعویض نمود.



شکل ۸- مغزی‌های استفاده شده در قالب فورج هوزینگ اکسل خودرو.

۷. جنس قالب‌ها و روانکارها[2]

مواد قالب. اغلب عملیات فورج خصوصا در مورد قطعات بزرگ، در دماهای بالا انجام می‌شود. بنابراین مواد قالب بایستی (الف) دارای استحکام و چقرمگی در دماهای بالا باشند، (ب) سختی‌پذیر بوده و بتوان آنها را صورت یکنواخت سخت‌کاری نمود، (ج) در مقابل شوک‌های حرارتی و مکانیکی مقاوم باشند و (د) در مقابل سایش به سبب پوسته شدن در فورج داغ مقاوم باشند.

[1] Fatigue cracking
[2] Lubrication

www.jozveha.ir

انتخاب جنس قالب به فاکتورهایی نظیر ابعاد قالب، ترکیب و خواص قطعه، پیچیده بودن قطعه، دمای فورج، نوع فرایند فورج، هزینهٔ مواد قالب و تیراژ قطعه بستگی دارد. همچنین انتقال حرارت از قطعهٔ داغ به قالب (و بنابراین اعوجاج قالب) فاکتور مهمی می‌باشد. از مواد که معمولا در ساخت قالب‌های فورج استفاده می‌شوند، می‌توان به فولادهای دارای کرم، نیکل، مولیبدن و وانادیم اشاره نمود.

روانکارها. روانکارها به شدت بر میزان اصطکاک و سایش تاثیر می‌گذارند. بنابراین در مقدار نیروها و جریان فلز به داخل حفره‌ها موثرند. همچنین به عنوان حایل حرارتی بین قطعهٔ داغ و قالب نسبتا خنک عمل کرده، باعث پایین آمدن نرخ خنک‌شوندگی قطعه و بهبود جریان فلز می‌گردد. نقش مهم دیگر روانکار عمل‌کردن به عنوان عامل جدایش و جلوگیری کننده از چسبیدن قطعه به قالب می‌باشد.

در فرایند فورج از روانکارهای مختلفی می‌توان استفاده نمود. در فورج داغ از گرافیت، دی‌سولفید مولیبدن و در بعضی اوقات از شیشه به عنوان روانکار استفاده می‌شود. در فورج سرد، از روغن‌های معدنی و صابون‌ها به عنوان روانکار استفاده می‌شود. در فورج داغ معمولا قالب مستقیما به روانکار آغشته می‌شود؛ در فورج سرد قطعه به روانکار آغشته می‌شود. روش کاربرد و یکنواخت نمودن ضخامت روانکار روی بلانک در کیفیت محصول مهم است.

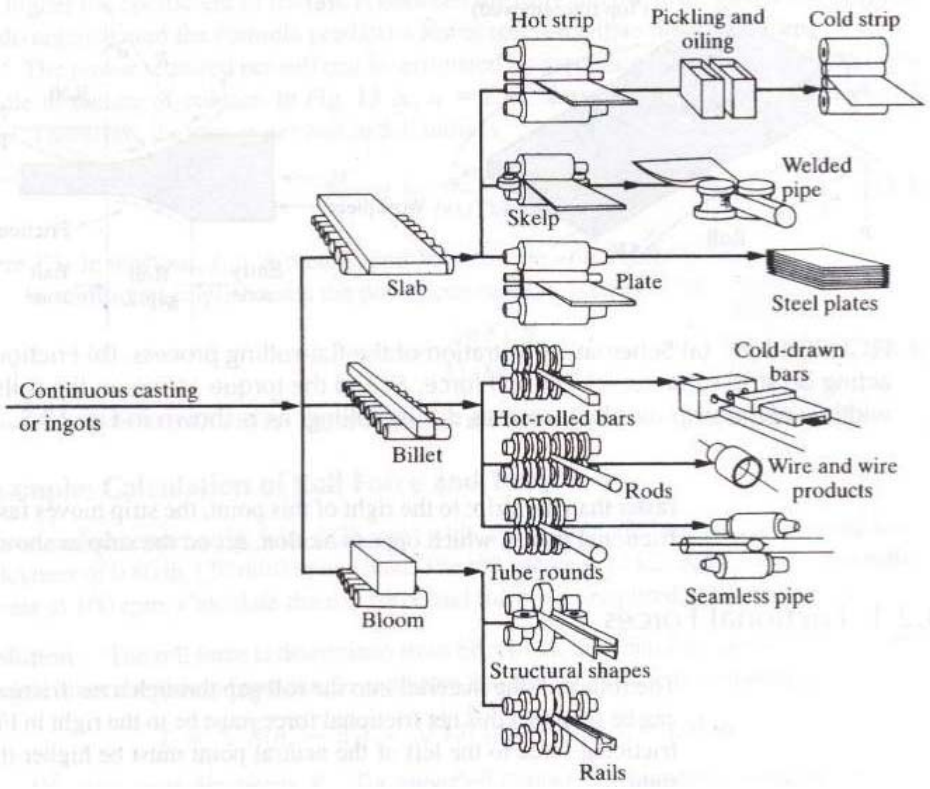
www.jozveha.ir

نورد

۱. مقدمه

نورد[1] روشی برای کاهش ضخامت (یا تغییر سطح مقطع) قطعات طویل با استفاده از دو یا چند غلتک می‌باشد (شکل ۱). 90% قطعات فولادی تولید شده از فرایندهای شکل‌دهی فلزات با این روش تولید می‌شوند. این روش برای اولین بار در دهه ۱۵۰۰ گسترش پیدا کرد.

صفحه (Plate)، که معمولا به ضخامت بالای 6 mm (1/4 in) اطلاق می‌شود و در ساختن سازه‌هایی نظیر پل‌ها، بویلرها، پوستهٔ راکتورهای اتمی و بدنهٔ کشتی به کار می‌رود، با این روش تولید می‌شود. این پلیت‌ها می توانند به ضخامت 0.3 m (12 in) برای نگهدارنده‌های بویلرهای بزرگ، 150 mm (6 in) برای پوستهٔ راکتورها، و 100-125 mm (4-5 in) برای کشتی‌های جنگی و تانکرهای باشند. ورق (Sheet)، معمولا از ضخامتی کمتر از 6 mm دارد و برای ساخت انواع قطعات ورقی نظیر بدنهٔ خودروها، هواپیماها، قوطی‌های کنسروها، لوازم آشپزخانه و ... به کار می‌رود.



شکل ۱- نمای شماتیکی از فرایندهای شکل‌دهی در نورد.

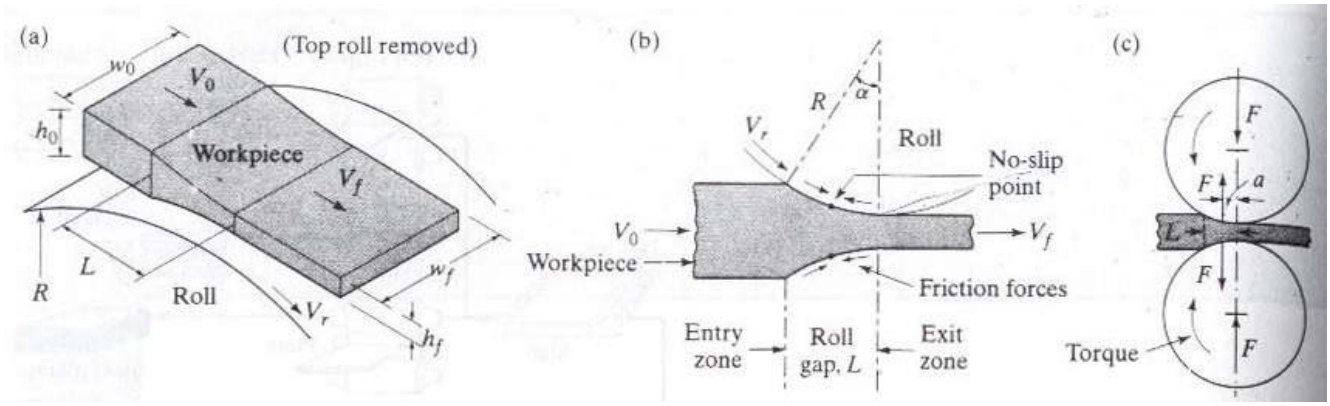
همانطور که در شکل ۱ آمده است علاوه بر پلیت و ورق، مقاطع فولادی نظیر ریل‌آهن، آشکل، چهارگوش، نبشی، میل‌گرد، سپری و... (قطر مقاطع گرد از 5.5 mm تا 300 mm متغیر است و مقاطع کمتر از 5.5 mm را معمولا دیگر با این روش نمی‌توان تولید نمود و بایستی توسط فرایند کشش سیم و لوله تولید کرد)، لوله و محصولات ویژه مانند چرخ واگن را تولید نمود.

[1] Rolling

www.jozveha.ir

۲. نورد تخت[1]

در شکل ۲ تصویر شماتیک فرایند نورد تخت آمده است. نواری با ضخامت h_0 وارد فضای مابین یک جفت غلتک شده و ضخامت آن به h_f رسیده است (هرکدام از این غلتک‌ها توان خود را جداگانه بوسیلهٔ یک شفت که به یک موتور الکتریکی متصل است می‌گیرند.). سرعت خطی غلتک‌ها برابر V_r می‌باشد. سرعت ورودی نوار به هنگام ورود به غلتک‌ها برابر V_0 می‌باشد. وقتی که ورق به داخل فضای مابین دو غلتک می‌رود، بایستی سریع‌تر جریان یابد چراکه ضخامت آن در حال کاهش است. سرعت نوار در نقطهٔ خروج از غلتک‌ها بیشترین مقدار را دارد (V_f)؛ با توجه به اینکه سرعت گردش غلتک‌ها یکسان و بدون تغییر می‌باشد، یک لغزش نسبی بین نوار و غلتک‌ها در فضای مابین غلتک‌ها (L) بوجود می‌آید. در نقطهٔ خنثی[2] یا نقطهٔ بدون لغزش[3]، سرعت نوار با سرعت غلتک‌ها برابر می‌شود. در سمت چپ این نقطه غلتک سریع‌تر از نوار حرکت می‌کند و در سمت راست این نقطه نوار سریع‌تر از غلتک حرکت می‌کند. بنابراین نیروهای اصطکاکی همانند شکل ۲-b عمل می‌کنند.



شکل ۲- (a) نمای شماتیکی از فرایند نورد تخت. (b) نیروهای اصطکاکی وارد بر سطح نوار. (c) نیروی غلتک، F، و گشتاور اعمالی روی غلتک. معمولا پهنای w

۳. نیروهای اصطکاکی نورد

غلتک‌ها نوار را توسط نیروی اصطکاک به درون خود می‌کشند، با توجه به شکل ۲-b معلوم می‌شود که جهت این نیرو به سمت راست می‌باشد. بنابراین نیروی اصطکاک در سمت چپ نقطهٔ خنثی بایستی از نیروی اصطکاک سمت راست بیشتر باشد. گرچه به نیروی اصطکاک برای انجام نورد نیاز است ولی انرژی بوسیلهٔ اصطکاک هدر می‌رود و افزایش اصطکاک به معنای افزایش نیرو و توان لازم می‌باشد. اگر h_0 و h_f به ترتیب ضخامت ورودی و خروجی ورق، R، شعاع غلتک و μ ضریب اصطکاک باشند خواهیم داشت:

$$h_0 - h_f = \mu^2 R$$

با توجه به رابطهٔ بالا معلوم می‌شود که با افزایش شعاع غلتک می‌توان مقدار کاهش ضخامت نوار را افزایش داد. این موضوع درست شبیه استفاده از چرخ‌های بزرگتر در تراکتورها و خودروهای سنگین به منظور جلوگیری از سر خوردن روی گل و لای و جاده می‌باشد.

---

[1] Flat rolling
[2] Neutral point
[3] No-slip point

www.jozveha.ir

٤. نیرو و توان لازم برای نورد

نیروی نورد در حالت نورد تخت را می‌توان از رابطهٔ زیر بدست آورد:

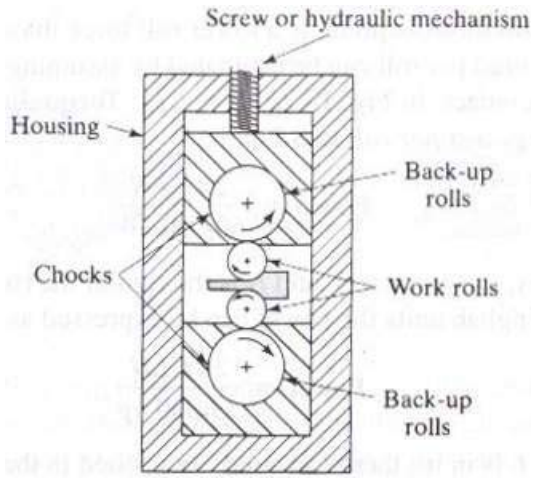
$$F = LwY_{avg}$$

که L طول نوار در تماس با غلتک، w پهنای نوار و Y_{avg} تنش متوسط نوار مابین دو غلتک می‌باشد. رابطهٔ بالا در حالت بدون اصطکاک می‌باشد. هرچه ضریب اصطکاک مابین غلتک‌ها و نوار بیشتر باشد، تفاوت بین نیروی واقعی و نیروی بدست آمده از رابطهٔ فوق بیشتر می‌شود و رابطه فوق نیروی کمتری از نیروی واقعی را پیش‌بینی می‌کند.

با فرض آنکه نیروی F به وسط قوس در تماس اعمال می‌شود (شکل ۲-c) خواهیم داشت: a=L/2. گشتاور پیچشی هر غلتک برابر با حاصلضرب F در a می‌باشد. بنابراین توان غلتک در سیستم SI از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$Power = \frac{2\pi FLN}{60{,}000kW}$$

که F برحسب نیوتن، L برحسب متر و N برحسب rpm (تعداد دور غلتک در یک دقیقه) می‌باشد.



شکل ۳- تصویر شماتیکی از یک دستگاه نورد با چهار غلتک (دو غلتک نورد و دو غلتک پشتیبان). استحکام پوسته، غلتک‌ها و یاتاقان‌های غلتک‌ها در کنترل و نگهداری ضخامت نوار مهم می‌باشند.

۵. کاهش نیروی غلتک

نیروهای غلتک می‌توانند باعث تغییرشکل[1] و له‌شدگی[2] غلتک بشوند؛ چنین نیروهایی می‌توانند برای غلتک بسیار مضر باشند و بر فرایند نورد تاثیر نامطلوبی بگذارند. همچنین تکیه‌گاه‌های غلتک‌ها که شامل پوسته، یاتاقان‌ها و غلتک‌های پشتیبان می‌باشند (شکل ۳) ممکن تحت نیروها نورد دچار کشش آمدن شده، درنتیجه فاصلهٔ بین دو غلتک به میزان قابل توجهی ازدیاد پیدا کند. بنابراین برای جبران این تغییرشکل و رسیدن به شکل مطلوب غلتک‌ها را بایستی از مقدار محاسبه شده به یکدیگر نزدیک‌تر نمود تا ضخامت مطلوب نوار بدست آید. با هرکدام از روش‌های زیر می‌توان نیروهای غلتک‌ها را کاهش داد:

- کاهش اصطکاک؛
- استفاده از غلتک‌هایی با شعاع کمتر؛
- پایین آوردن میزان کاهش ضخامت در هر مرحله از نورد؛
- انجام نورد در دماهای بالاتر به منظور کاهش استحکام ماده.

[1] Deflection
[2] Flattering

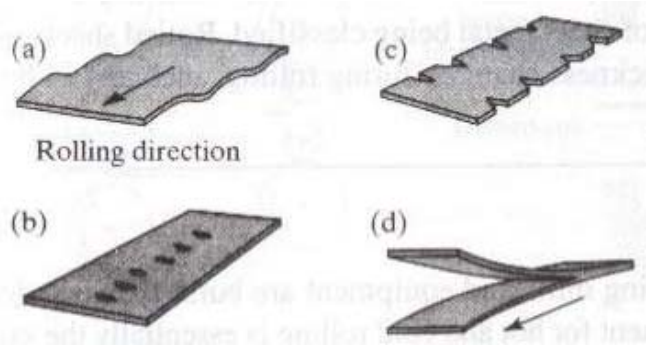
www.jozveha.ir

یک روش دیگر برای کاهش نیروهای نورد، کشیدن نوار در طی فرایند نورد می‌باشد. در این حالت به نیروی فشاری کمتری برای تغییر شکل پلاستیک ماده نیاز است. از آنجاییکه برای نورد کردن مواد پراستحکام به نیروی فشاری زیادی نیاز است، کشیدن نوار در این حالت بسیار مهم است. می‌توان نوار را چه در ناحیهٔ ورودی (کشش پشتی[1]) و چه در ناحیهٔ خروجی (کشش جلویی[2]) و یا هر دو تحت کشش قرار داد.

کشش پشتی توسط اعمال نیرو به غلتک‌ها حامل نوار که نوار را به درون غلتک‌های نورد می‌فرستند، اعمال می‌شود. کشش جلویی بوسیلهٔ افزایش سرعت غلتک‌های تحویل‌گیرندهٔ نوار اعمال می‌شود. همچنین می‌توان نوردکاری را بدون اعمال هیچ‌گونه نیروی اضافی به غلتک‌های نورد و فقط با اعمال نیروی کششی از سمت جلو انجام داد که به این روش نورد استکل[3] گویند.

۶. عیوب ایجادی در صفحات و ورق‌های نوردشده

عیوب نورد می‌تواند چه در سطح صفحات و ورق‌ها و چه در ساختار داخلی آنها بوجود آید. این عیوب چه به سبب کاهش کیفیت سطح و چه به سبب کاهش استحکام و شکل‌گیری تولیدات نامطلوب می‌باشند. تعدادی از عیوب نظیر پوسته‌شدن[4]، زنگ‌زدگی[5]، خراش[6]، گدازش[7]، حفره[8] و ترک[9] در ورق‌های فلزی شناخته‌شده‌اند. این عیوب ممکن است که به سبب آخال‌ها[10] (Inclusions) و یا ناخالصی‌های[11] (Impurities) موجود در ماده اصلی ریخته‌گری شده و یا در طی شرایط مختلف مربوط به آماده‌سازی و فرایند نورد بوجود آمده باشند.



شکل ٤- نمای شماتیکی از عیوب معمول در نورد: (a) لبه‌های موجی‌شکل؛ (b) ترک در مرکز نوار؛ (c) ترک‌های لبه‌ای؛ (d) پوست سوسماری شدن.

موج‌دار شدن لبه‌ها[12] (شکل a-٤) نتیجهٔ خمش غلتک‌ها می‌باشد. نوار در لبه‌ها نازک‌تر از مرکز می‌باشد؛ چراکه شکم‌دادن غلتک‌ها در وسط بیشتر است. ترک‌های بوجود آمده در شکل‌های b,c-٤ نتیجهٔ چکش‌خوار بودن ضعیف ماده در دمای نورد می‌باشد.

---

[1] Back tension
[2] Front tension
[3] Steckel rolling
[4] Scale
[5] Rust
[6] Scratch
[7] Gouge
[8] Pit
[9] Crack
[10] ناخالصی‌های غیرفلزی و بیگانه که در جریان انجماد وارد فلز شده‌اند. ناخالصی‌ها در فلزات کار شده پس از کار گرم، دراز شده و برای همیشه در فلز باقی می‌مانند. آخال‌ها در فولاد، بیشتر عبارتند از سولفور و سیلیکات منگنز، سرباره و آلومین. در برنج‌ها، بیشتر ریم‌ها و زغال چوب هستند. ناخالصی‌ها ممکن است از آسترهای نسوز کوره یا سرباره بوجود آید ولی معمولا در نتیجهٔ واکنش‌های خود فلز در جریان تکمیل‌کاری یا فرایندهای اکسایش یا در جریان ریخته‌گری و انجماد هستند.
[11] هرنوع ماده‌ای که ناخواسته وارد ترکیب فلز یا آلیاژ گردیده است. بعضی از این مواد اثرات کمی روی خواص فلز دارند. ولی بعضی دیگر مانند گوگرد و فسفر آلیاژ را به طور فاحشی ضایع می‌سازند.
[12] Wavy edges

www.jozveha.ir

پوست سوسماری‌شدن[1] (شکل ٤-d) پدیده‌ای پیچیده می‌باشد که به سبب تغییرشکل غیریکنواخت در طی فرایند نورد و یا به خاطر وجود عیوب در ماده خام ریخته‌گری شده بوجود می‌آید. از آنجاییکه کیفیت لبه‌های ورق در فرایندهای شکل‌دهی ورق مهم می‌باشد، عیوب لبه‌ای با برش‌کاری و برش‌کاری غلتکی[2] لبه‌ها از بین می‌رود.

۷. دستگاه‌ها و روش‌های نورد

دستگاه نورد به مجموعهٔ ماشین‌آلات و ابزارهایی گفته می‌شود که به کمک هم محصول مورد نظر را به دست می‌دهد که شامل یک پایهٔ نورد اصلی و ماشین‌آلات کمکی است. ماشین‌آلات کمکی می‌توانند از قبیل دستگاه تغذیه، دستگاه تحویل، سیستم خنک‌کننده، روغن‌کاری کننده، کنترل اتوماتیک (کنترل ضخامت به کمک اشعهٔ x) و امکانات کنترل دیگر برای جلوگیری کردن از طبله شدن ورق باشند که به این تشکیلات، دستگاه نورد گویند.

برای انجام فرایند نورد چندین نوع تجهیزات و غلتک‌های مختلف ساخته‌شده است. گرچه تجهیزات اصلی لازم برای نورد سرد و داغ شبیه به هم می‌باشند ولی تفاوت‌هایی در نوع مادهٔ نورد، پارامترهای فرایند، روانکارها و سیستم خنک‌کاری وجود دارد. طراحی، ساختن و عملکرد دستگاه‌های نورد به تحقیقات زیادی نیاز دارد. دستگاه‌های اتوماتیک صفحات و ورق‌هایی با دقت و نرخ تولید بالا به همراه قیمت ارزان تولید می‌کنند. عرض تولیدات نورد می‌تواند از 5 m تا 0.0025mm تغییر کند. سرعت نورد می‌تواند از 25 m/s (تقریبا یک مایل در دقیقه) در نورد سرد و حتی سریع‌تر در دستگاه‌های تمام اتوماتیک و کنترل شونده با کامپیوتر تغییر کند.

از دستگاه‌های نورد دو یا سه غلتکی (شکل ٥-a,b) برای انجام مراحل مقدماتی نورد (خشن‌کاری یا پیش‌نوردکاری[3]) شمش ریخته‌گری شده در ریخته‌گری پیوسته استفاده می‌شود. قطر این غلتک‌ها از 0.6 m تا 1.4 m متغیر است. در نورد سه غلتکی یا رفت و برگشتی[4]، جهت حرکت ماده پس از هر مرحله تغییر می‌کند؛ صفحهٔ نورد شده مکررا به بین دو غلتک بالایی رفته و سپس توسط انبر ماشینی (Manipulator)[5] و بالابرنده‌های مختلفی به بین دو غلتک پایینی فرستاده می‌شود.

دستگاه‌های نورد چهار غلتکی و خوشه‌ای[6] (سندزیمیز[7] یا دستگاه Z؛ شکل ٥-d) بر این اصل پایه‌گذاری شده‌اند که غلتک‌های کم قطرتر به نیرو و توان کمتری نیاز دارند و موجب کاهش پخش‌شوندگی (Spreading[8]) می‌گردد. علاوه براین استفاده از غلتک‌های کم قطر این مزیت را دارد که در هنگام آسیب‌دیدن و مستهلک شدن، به جای تعویض غلتک‌های بزرگ گران قیمت فقط یک غلتک کوچک تعویض شود. گرچه هزینهٔ تجهیزات نورد خوشه‌ای به میلیون‌ها دلار می‌رسد ولی برای نورد سرد ورق‌های نازک و پراستحکام مناسب است. معمولا پهنای محصولات نورد از 0.66m تا 1.5m می‌باشد.

---

[1] Alligatoring

[2] Slitting

[3] Cogging mill

[4] Reversing mill

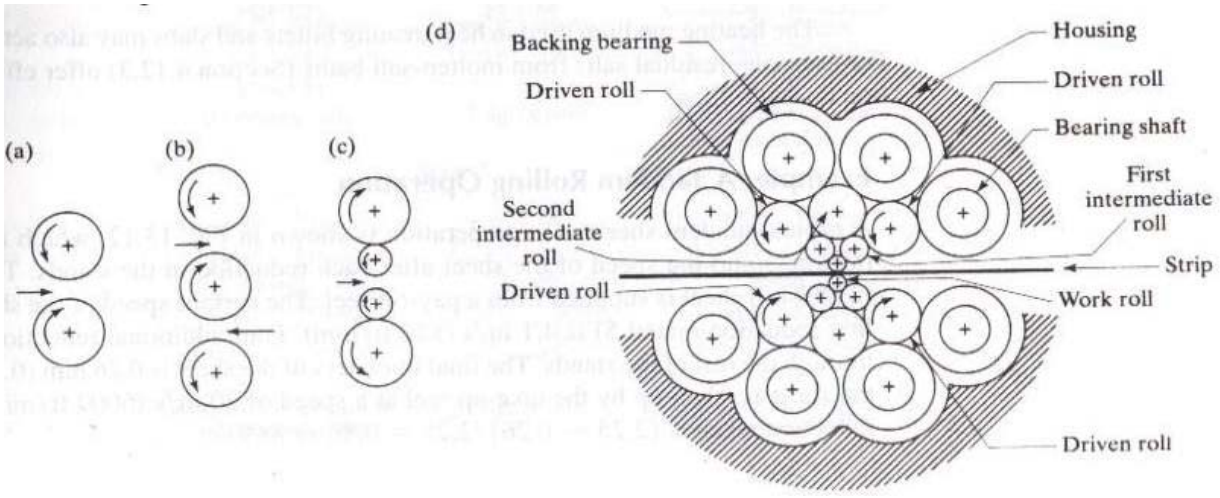
[5] دستگاهی است که در کارگاه‌های نورد، جهت حرکت دادن شمش‌ها و در دستگاه‌های پرس، به جای جرثقیل زنجیردار و مرغک و میله حمال و در دستگاه‌های آهنگری، برای نگاه‌داشتن شمش، جهت آهنگری به کار برده می‌شود.

[6] Cluster mill

[7] Sendzimir or Z mill

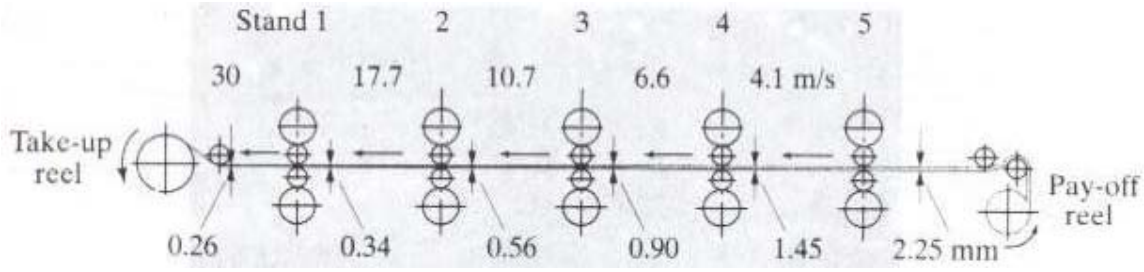
[8] قابلیت یک مایع در تشکیل سطح مشترک مایع به جامد فقط توسط فعالیت سطحی و ترسازی روی سطح است.

www.jozveha.ir



شکل ۵- تصویر شماتیک از چیدمان‌های مختلف در نورد: (a) دو غلتکی؛ (b) سه‌غلتکی؛ (c) چهار غلتکی؛ (d) خوشه‌ای (Sendzimir).

در نورد ردیفی[1] (شکل ۶) نوار به صورت پیوسته در چند ایستگاه نورد می‌شود تا در آخرین آنها به کمترین ضخامت ممکن برسد. هر ایستگاه شامل یک سری غلتک و سایر تجهیزات لازم می‌باشد. به یک گروه از این ایستگاه‌ها قطار نورد[2] می‌گویند. کنترل سرعت و فاصله‌ها در این نوع نورد بسیار مهم است و از کنترل‌کننده‌های کامپیوتری و هیدرولیکی زیادی (خصوصا در نورد دقیق) در این روش استفاده می‌شود.



شکل ۶- فرایند نورد ردیفی.

غلتک‌ها مادهٔ مورد استفاده برای ساخت غلتک‌ها باید از پراستحکام و مقاوم به سایش باشد. موادی که معمولا برای این منظور به‌کار می‌روند، چدن، فولاد ریخته‌گری و فولاد فورج‌شده می‌باشند. در غلتک‌های کم قطر (نظیر غلتک‌های نورد خوشه‌ای) از تنگستن‌کارباید می‌باشند. فولاد فورج‌شده نسبت به چدن دارای استحکام، سفتی و چقرمگی بیشتری است. غلتک‌های نورد سرد به منظور ایجاد سطح صاف سنگ‌زنی می‌شوند و در بعضی موارد پولیش‌کاری می‌گردند. از غلتک‌های نورد سرد نباید برای نورد داغ استفاده شود چراکه حرارت موجب ترک برداشتن و پوسته‌شدن[3] سطح غلتک می‌شود.

روانکارها[4] نورد داغ آلیاژهای آهنی معمولا بدون روانکار انجام می‌شود گرچه شاید از گرافیت استفاده شود. از محلول‌های آبی برای خنک‌کردن غلتک‌ها و کندن پوسته‌های روی مادهٔ نورد شده استفاده می‌شود. آلیاژهای غیرآهنی با

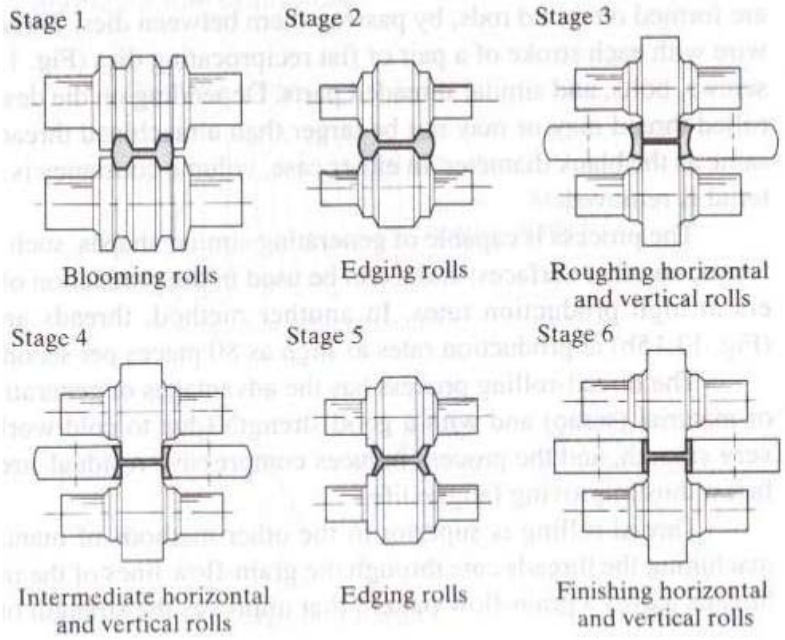
[1] Tandem rolling
[2] Train
[3] Spalling
[4] Lubricants

www.jozveha.ir

استفاده از ترکیب روغن‌ها، امولسیون‌ها و اسیدهای چرب مختلف نورد می‌شوند. نورد سرد با استفاده از روغن‌های قابل حل در آب و روانکارهای با لزجت پایین مثل روغن‌های معدنی، امولسیون‌ها، پارافین و روغن‌های چرب انجام می‌شود.

۸. تولید اشکال مختلف با استفاده از نورد

علاوه بر نورد تخت، اشکال مختلفی را می‌توان با نورد پروفیل[1] تولید نمود. قطعات مستقیم و طویل سازه‌ها مثل میل‌گردها (با قطرهای مختلف)، کانال‌ها، تیرهای Iشکل و ریل‌های قطار (شکل‌های ۱ و ۷) با این روش تولید می‌شود. از آنجاییکه سطح مقطع ماده به صورت غیریکنواختی تغییر می‌کند، برای طراحی غلتک‌های لازم به تجربهٔ زیادی نیاز است تا قطعات تولیدی عاری از عیوب داخلی و خارجی باشند.



شکل ۷- مراحل نورد قطعات با سطح مقطع H شکل.

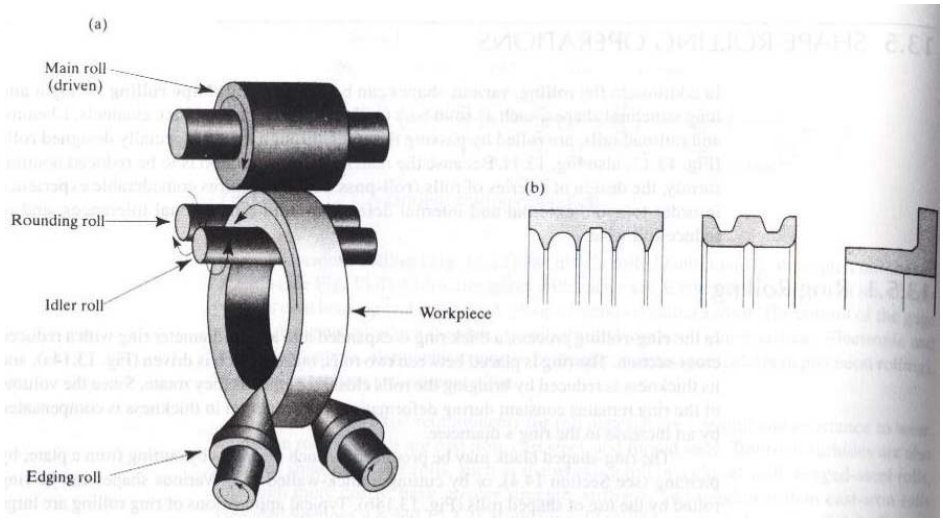
۸-۱. نورد رینگ‌ها

در فرایند نورد رینگ‌ها قطر یک رینگ ضخیم با کاهش سطح مقطع آن، افزایش می‌یابد. رینگ مابین دو غلتک که یکی از آنها محرک است قرار گرفته (شکل ۸) و با نزدیک‌تر شدن غلتک‌های چرخان به یکدیگر ضخامت آن کاهش می‌یابد. آزآنجاییکه حجم رینگ ثابت می‌باشد، کاهش ضخامت با افزایش قطر رینگ جبران می‌شود. قطعه خام اولیه (بلانک) از برش لول‌های ضخیم و یا با سنبه‌کاری (Piercing)[2] بدست می‌آید. از قطعات که معمولا با این روش تولید می‌شوند می‌توان رینگ‌های بزرگ در راکت‌ها، توربین‌ها، رینگ‌های چرخ‌دنده‌ها، رینگ‌های بلبرینگ و رلبرینگ‌ها، فلانچ‌ها و رینگ‌های تقویت‌کنندهٔ لوله‌ها نام برد.

[1] Shape rolling

[2] در تولید لوله، میل‌گرد توپر توسط سنبه‌ای سوراخ می‌شود. فرایند چرخاندن و نوردکاری شمشال گرم روی سنبه است.

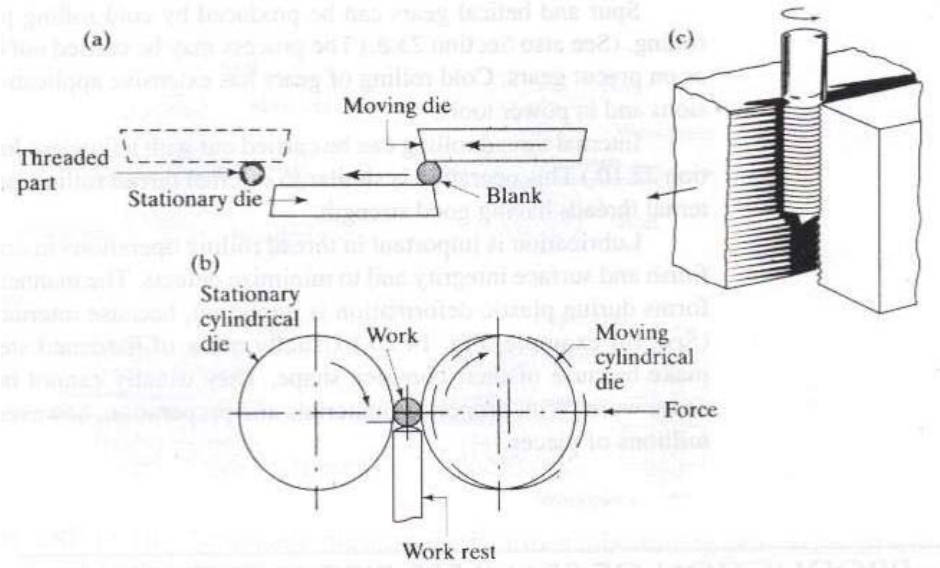
www.jozveha.ir



شکل ۸- (a) تصویر شماتیک فرایند نورد رینگ. کاهش ضخامت افزایش قطر رینگ را نتیجه می‌دهد. (b) مثال‌هایی از سطح مقطع‌هایی که می‌توان با نورد رینگ شکل داد.

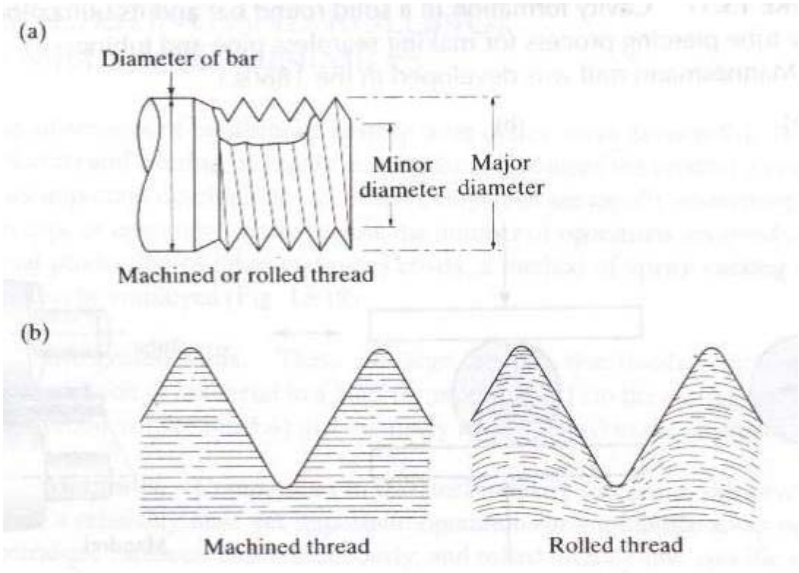
۸-۲. نورد رزوه‌ها

فرایند نوردکاری رزوه‌ها یک فرایند نورد سرد به حساب می‌آید که در آن رزوه‌های مستقیم یا مخروطی بر روی میل‌گردها با عبور آنها از بین قالب‌ها ایجاد می‌شود. در هر کورس از یک جفت قالب رفت و برگشتی تخت، رزوه‌ها روی میل‌گرد شکل می‌گیرند (شکل ۹). از قطعاتی که معمولا با این روش تولید می‌شوند را می‌توان به پیچ‌ها، مهره‌ها و قطعات رزوه دار مشابه اشاره نمود. بسته به طراحی قالب، قطر بزرگ یک قطعهٔ رزوه شده با این روش ممکن است از رزوه تولید شده با ماشین بزرگتر و یا کوچکتر باشد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نورد رزوه‌ها: (a) و (c) قالب‌های تخت رفت و برگشتی؛ (c) قالب‌های دو غلتکی. تولید اتصالات رزوه‌دار مثل مهره‌ها با این روش در تیراژ بالا اقتصادی است.

www.jozveha.ir

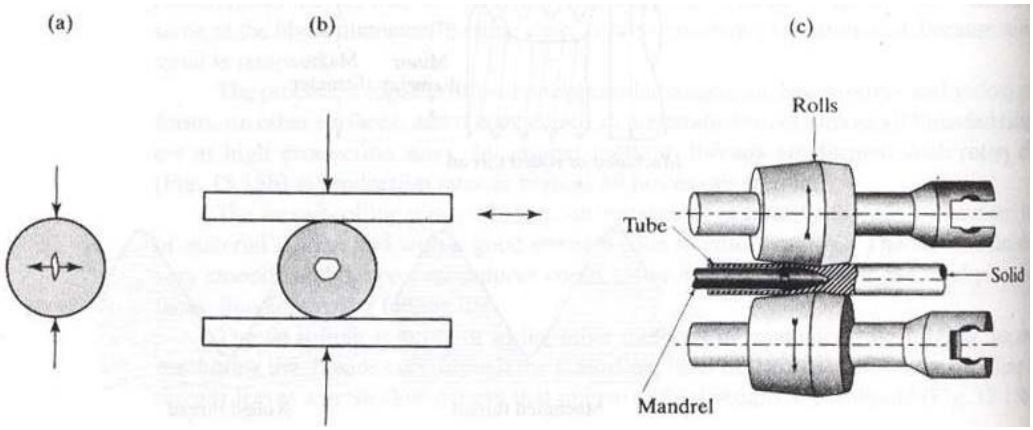


شکل ۱۰- (a) رزوه‌های نورد شده و ماشینکاری شده. (b) جریان دانه‌ها در رزوه‌های نورد شده و ماشین‌کاری شده. برخلاف ماشینکاری که فلز از لبهٔ دانه‌ها کنده می‌شود تولید رزوه با استفاده از نورد به علت انجام کار سرد و جریان دانه‌ای مطلوب، موجب افزایش استحکام می‌شود.

۸-۳. تولید لوله‌های بدون درز

با روش سنبه‌کاری چرخشی لوله[1] می‌توان لوله‌های طویل بدون درز ضخیم تولید نمود (شکل ۱۱). اساس کار این روش بر این اصل استوار است که وقتی یک میلهٔ مدور تحت نیروهای فشاری شعاعی قرار می‌گیرد، تنش‌های کششی در مرکز آن میله گسترش می‌یابند.

در فرایند سنبه‌کاری چرخشی (فرایند مانسمان) از غلتک‌هایی که نسبت به محور لوله دارای زاویه هستند (شکل ۱۱-c) برای کشیدن میلهٔ مدور به میان غلتک‌ها استفاده می‌شود. از یک ماندرل[2] داخلی به منظور گسترش سوراخ و کنترل قطر داخلی لوله کمک گرفته می‌شود. این ماندرل می‌تواند در طول لوله ثابت بوده و یا به صورت شناور و بدون نگهدارنده باشد.



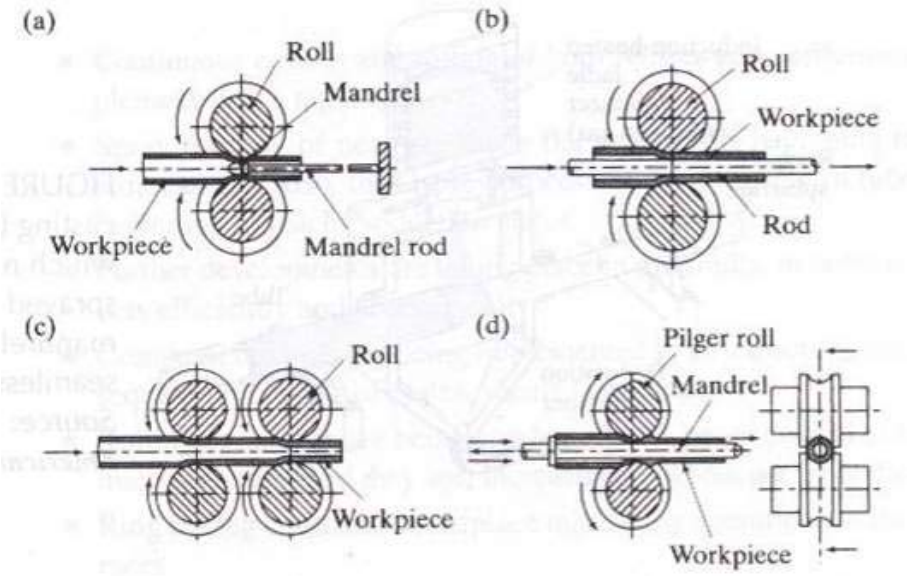
شکل ۱۱- فرایند سنبه‌کاری چرخشی (Rotary tube piercing) یا فرایند مانسمان (Mannesmann).

می‌توان قطر و ضخامت لوله‌ها را با نورد کردن آنها کاهش داد (شکل ۱۲). بعضی از این فرایندها بدون استفاده از ماندرل داخلی انجام می‌شود. در نورد با استفاده از غلتک پیلگر (Pilger mill) لوله و ماندرل داخلی تحت یک حرکت رفت و برگشتی قرارمی‌گیرند؛ این غلتک‌ها شکل مخصوصی دارند و به صورت پیوسته می‌چرخند. در هنگامی که بین غلتک و لوله فاصله می‌افتد، لوله جلو رفته و می‌چرخد و سیکل دیگری از کاهش لوله شروع می‌شود.

---

[1] Rotary tube piercing
[2] Madrel

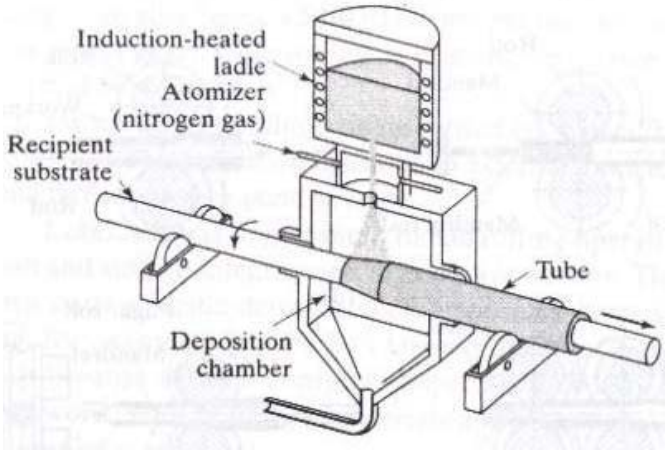
www.jozveha.ir



شکل ۱۲- فرایندهای مختلف نورد لوله: (a) با ماندرل ثابت؛ (b) با ماندل متحرک؛ (c) بدون ماندرل؛ (d) نورد پلیگر

۹. فرایند ریخته‌گری پاششی[1]

یکی دیگر از روش‌های تولید لولهٔ بدون درز ریخته‌گری پاششی می‌باشد. در این فرایند مذاب فلز در یک محفظـهٔ حـاوی گاز نیتروژن بر روی یک میلهٔ در حال چرخش پاشیده می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- فرایند ریخته‌گری پاششی.

[1] Spray casting (Osprey process)

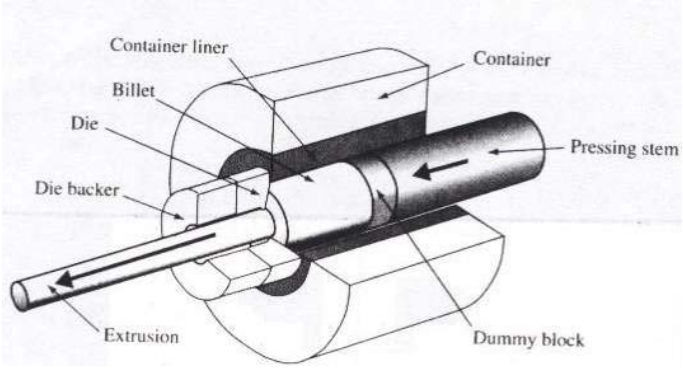
www.jozveha.ir

اکستروژن و کشش فلزات

۱. مقدمه

در فرایند اکستروژن[۱] مادهٔ خام (بیلت[۲]) که معمولا گرد می‌باشد با فشار از داخل یک قالب می‌گذرد (شکل ۱)، درست شبیه به خروج خمیردندان از داخل تیوپ آن. تقریبا هر سطح مقطع توپر و توخالی را می‌توان با این روش تولید نمود. بسته به میزان چکش‌خواری ماده می‌توان این فرایند را در دمای اتاق و یا دماهای بالاتر انجام نمود. اغلب اکستروژن با فرایند فورج ترکیب می‌شود که با عنوان اکستروژن سرد[۳] شناخته می‌شود. از قطعاتی که معمولا با روش اکستروژن تولید می‌شوند می‌توان به ریل درهای کشویی، قاب‌های در و پنجره اشاره نمود.

فرایند کشش بین سال‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلادی یعنی موقعی که با کشیدن میله، سیم و یا لوله از میان قالب، قطر آنها را کاهش می‌دادند، گسترش یافت. از میله‌های کشیده شده برای ساخت شفت‌ها، اسپیندل‌ها، پیستون‌های کوچک و قطعات اتصال نظیر پیچ‌ها، مهره‌ها و پرچ‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۱- نمای شماتیک فرایند اکستروژن (اکستروژن مستقیم).

۲. فرایند اکستروژن

چند نوع فرایند اکستروژن وجود دارد: مستقیم[۴]، معکوس[۵]، عرضی[۶]، هیدروستاتیک و ضربه‌ای[۷]. در شکل ۱ فرایند اکستروژن مستقیم مشاهده می‌شود. در اکستروژن معکوس برخلاف مستقیم جهت حرکت سنبه و فلز خروجی مخالف هم می‌باشد. در اکستروژن هیدروستاتیک (شکل ۲) قطر بیلت از قطر محفظه کمتر می‌باشد و این فضا با سیال پر می‌شود و فشار توسط یک جک به بیلت اعمال می‌شود. برخلاف اکستروژن مستقیم اصطکاکی بین بیلت و جدارهٔ محفظه وجود ندارد.

شکل ۲- (a) معکوس؛ (b) هیدروستاتیک؛ (c) عرضی.

[1] Extrusion
[2] Billet
[3] Cold extrusion
[4] Direct
[5] Indirect, reverse, inverted, or backward extrusion
[6] Lateral or side extrusion
[7] Impact

www.jozveha.ir

منابع

1. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid,“Manufacturing Engineering and Technology,” Fourth Edition, Pearson Education, 2004
2. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid,“Manufacturing Processes for Engineering Materials,” Fourth Editon, Pearson Education, 2004
3. P.Farhang,“An Encyclopaedia of Metallurgy and Materials, English-Persian,” Donya Publisher, 1990
4. William F.Hosford, Robert M.Caddll,“Metal Forming Mechanics and Metallurgy,” Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1983