



موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی اروندان

انجمن علمی دانشگاه اروندان خرمشهر

جزوه درس اصول سگنل دادن فلزات

[WWW.USS.VCP.IR](http://WWW.USS.VCP.IR)

بہ نام خدا

دانشگاه اروند ان خرمشهر

گروه مهندسی ساخت و تولید

جزوه درسی اصول شکل دادن فلزات

(METAL FORMING)

مدرس: مهندس حسین توصیفیان

### ۱-۱. مقدمه

شکل دهی فلزات شامل فرایندهایی است که در آنها یک شمشال (billet) یا پولک (blank) فلزی بوسیله چند ابزار یا قالب شکل داده می شود. این فرایندها عموماً با افزایش خواص مکانیکی در قطعات همراه می باشند به گونه ای که می توان گفت شکل دهی فلزی عملیاتی است که در نتیجه آن شکل و خواص قطعات از طریق تغییر شکل مومسان و بدون هر گونه عملیات براده برداری تغییر می یابد. از مشخصه های این مجموعه فرایندها یکی تغییر در کیفیت سطوح و دیگری دگرگونی ریز ساختار است که به بهبود خواص مکانیکی می انجامد. مواد اولیه یا به اصطلاح قطعاتی که باید شکل داده شوند ممکن است به صورت گرم یا سرد-عملاً منظور دمای محیط است- به فرایند وارد شوند. اگرچه نیرو یا انرژی مورد نیاز شکل دهی در حالت گرم کمتر است، عموماً ایجاد تغییر شکل ماندگار در فلزات نیروی زیادی را به کار میگیرد. بدین سان میتوان گفت ایجاد تغییر شکل مومسان در نتیجه اعمال انرژی زیاد از اختصاصات این فرایندها بوده که در سایر روشهای شکل دهی نظیر ریخته گری وجود ندارد. شکل دهی فلزات فرایندی کاملاً دینامیک است به گونه ای که معمولاً از آن به عملیاتی سریع و غیر آرام تعبیر می گردد. طراحی و کنترل چنین فرایندهایی به ویژگیهای جنس ماده، شرایط در فصل مشترک ابزار و قطعه کار، مکانیک تغییر شکل پلاستیک (سیلان فلز)، تجهیزاتی که مورد استفاده قرار می گیرند و ملاحظات کیفیت نهایی سطح محصول بستگی دارد. این عوامل انتخاب هندسه ابزار، ماده اولیه و شرایط شکل دهی نظیر درجه حرارت ابزار و قطعه کار و روانکاری را تحت تاثیر قرار می دهند. به دلیل پیچیدگیهای حاکم بر بسیاری از فرایندهای شکل دهی فلزی، انواع روشهای شبیه سازی و مدلسازی مثل شیوه های تحلیلی، محاسباتی و فیزیکی به منظور طراحی بهینه فرایند مورد استفاده قرار می گیرند. سه تعریف اساسی در شناخت مکانیزم حاکم بر فرایندهای شکل دهی فلزی وجود دارد. نخست شمشال (billet)، تختال (slab) و پولک (blank) میباشد که اگرچه هر یک تعاریف خاص خود را دارند اما در حالت کلی به معنای قطعه ای هستند که شکل داده خواهد شد. دومین تعریف مربوط به عامل اعمال انرژی یا ضربه می باشد که انرا رم یا کوبه گویند. سومین تعریف به قالب باز میگردد و ان ابزاری است شامل یک یا چند حفره که قطعه به کمک آن شکل دهی می شود. این سه اصطلاح در بیشتر فرایندهای شکل دهی فلزات مطرح بوده، آشنایی با آنها از مقدمات ورود به بحث است.

### ۱-۲. جنبه تاریخی

شکل دهی در کنار ریخته گری و متالورژی پودر سه روش عمده در ساخت و تولید محصولات فلزی می باشند. البته شکل دهی نسبت به دو روش دیگر قدیمی تر و توسعه یافته تر است. جدیدترین اکتشافات در تاریخچه شکل دهی فلزی از نوعی چکش کاری مس و طلا در نواحی مختلف خاورمیانه و مشخصاً در قلمرو ایران باستان در ۸۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح حکایت دارند. شکل دهی فلزات در ان زمان، عملیاتی دور از تصور نمی باشد زیرا فرایند تصفیه با کمک ذوب و تفکیک شیمیایی تا ان مقطع از تاریخ تحول بشر ناشناخته و بدین سان دشواری جداسازی ناخالصیها از سنگ معدن و مشکلات ان اساساً منتفی بوده است. بدیهی است ان نقیصه قابلیت کار نخستین محصولات تاریخ شکل دهی فلزی را محدود می نموده است. با ظهور فرایند تصفیه مس در ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد روش مفیدی به منظور خالص سازی فلزات از طریق واکنش های شیمیایی در فاز مایع بدست آمد. بعد ها و در عصر مس بشر دریافت چکش کاری فلزات به طور مطلوبی استحکام آنها را افزایش می دهد (پدیده ایی که امروزه به عنوان کرنش سختی شناخته شده است). احساس نیاز به استحکام های بالا انگیزه جستجوی الیازهای شد که بطور ذاتی مستحکم باشند، جستجویی که ابتدا به پیدایش برنز (الیاز مس و قلع) و پس از ان آهن (الیازهای آهن و کربن) منجر شد. عصر آهن که تاریخچه آغازان به ۱۲۰۰ سال قبل از میلاد باز میگردد ۱۳۰۰ سال پس از عصر برنز آغاز شد. علت اساسی ان تاخیر نبود فلزاتی بود که بتوانند درجه حرارت مورد نیاز برای ذوب و تصفیه سنگ آهن را تحمل نمایند. تا قرن ۱۳ میلادی بسیاری از فرایندهای شکل دهی فلزی به صورت دستی انجام می شدند. در این زمان چکش هایی با سرعت زیاد (tilt hammer) ساخته و برای نخستین بار در آهنگری لوله ها و میله ها به کار گرفته شدند. این ماشین از قدرت اب به منظور بالا

بردن بازویی اهرمی شکل که ابزار چکش کاری در یک انتهای آن قرار داشت، بهره می گرفت. پس از بالا رفتن چکش، اهنگر آنرا آزاد می نمود تا در اثر نیروی وزن خود سقوط کرده و نیروی اهنگری را تأمین کند. این وسیله ساده برای قرن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از تجهیزات اهنگری، غلطک‌های نورد رشد و تکامل تدریجی یافتند. در دفترچه یادداشت لئوناردو داوینچی طراحی مشتمل بر نقشه یک ماشین نورد سرب برای قاب پنجره‌های رنگی در سال ۱۴۸۰ میلادی وجود دارد. در ۱۴۹۵ میلادی داوینچی در جریان تولید ورق‌های تخت نورد شده از جنس فلزهای قیمتی روی دستگاه نورد دستی و به منظور سکه زنی قرار گرفت. در سال‌های بعد چندین دستگاه نورد در آلمان، انگلستان، ایتالیا و فرانسه طراحی شد. لازم به ذکر است طراحی دستگاه‌های نورد گرم که قادر به نوردکاری فلزات آهنی داغ باشند ۲۰۰ سال به طول انجامید. این پیشرفت هسته بیش از هر چیز با تهیه محدود آهن مرتبط می شد. تا میانه قرن ۱۸ میلادی نیروی محرکه غلطک‌های اولیه نورد که ورق و صفحات تخت تولید می نمودند انرژی هیدرولیکی آب بود. در طول انقلاب صنعتی در انتهای قرن ۱۸ میلادی، فرایندهایی به منظور تولید آهن و فولاد در مقیاس وسیع و به گونه‌ای که بتوانند تقاضای محصولات فولادی را ارضا نمایند، طراحی شدند. از جمله این ابتکارات می توان به اختراع چکش‌های بخار سرعت بالا

(high speed steam hammer) که در آنها چکش با نیروی بخار بالا می رفت و نیز پرس‌های هیدرولیک که در آنها نیروی مورد نیاز از طریق قدرت هیدرولیک تأمین می شد، اشاره نمود. در نتیجه توسعه این تجهیزات، قطعات متنوعی نظیر اجزا لوکوموتیو ساخته و روانه بازار شدند. به طور مشابه اختراع موتور بخار به توسعه فرایند نورد منجر شد و به دنبال آن در قرن نوزدهم میلادی محصولات مختلف فولادی به صورت انبوه نورد شدند. در صد سال گذشته پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌های نوین شکل‌دهی فلزات از نظر تجهیزات، مواد جدید، خواص ویژه و کاربرد حاصل شده است. از فواید جدید تجهیزات و ادوات می توان به پرس‌های پیچی و مکانیکی اشاره نمود. همگام با پیشرفت‌های تدریجی در زمینه ماشین‌آلات شکل‌دهی، مواد اولیه نیز بهبود کیفی یافته و گستره وسیع‌تری را شامل شدند. امروزه دامنه وسیعی از فولادهای کم کربن و فولادهای پیشرفته استحکام بالا در صنایع خودروسازی به کار گرفته می شوند. فلزاتی نظیر آلومینیوم، تیتانیوم و آلیاژهای پایه نیکل به صورت روز افزون در صنایع هوافضا و دیگر شاخه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند. در سال‌های اخیر روش‌های پیشرفته شکل‌دهی کامپوزیت‌ها و مواد استراتژیک گسترش یافته است. به علاوه ظهور کدهای کامپیوتری در تقابل با کاربر و کامپیوترهای ارزان به کیفیت بهتر محصولات و راندمان بالاتر فرایندهای شکل‌دهی فلزی منجر شده است.

### ۱-۳. مروری بر خواص مواد

در این قسمت خلاصه‌ای از مهمترین خواص مکانیکی مواد ارائه می گردد. گرچه این مرور اجمالی نکات عمیق مربوط به مکانیک مواد را شامل نمی شود اما بدون تردید دامنه وسیعی از اصطلاحات و تعاریف لازم را در بر می گیرد.

#### ۱-۱-۳ نیروی محوری یا نرمال:

منظور از نیروی محوری، نیرویی است که عمود بر سطح اعمال میگردد. دو تعریف زیر از این مفهوم ریشه می گیرند:  
الف. نیروی کششی :

نیرویی است که اعمال آن به دو انتهای قطعه، تمایل به ازدیاد طول ایجاد می کند. (شکل ۱-۱)



شکل ۱-۱. نمایش نیروی کششی

ب. نیروی فشاری:

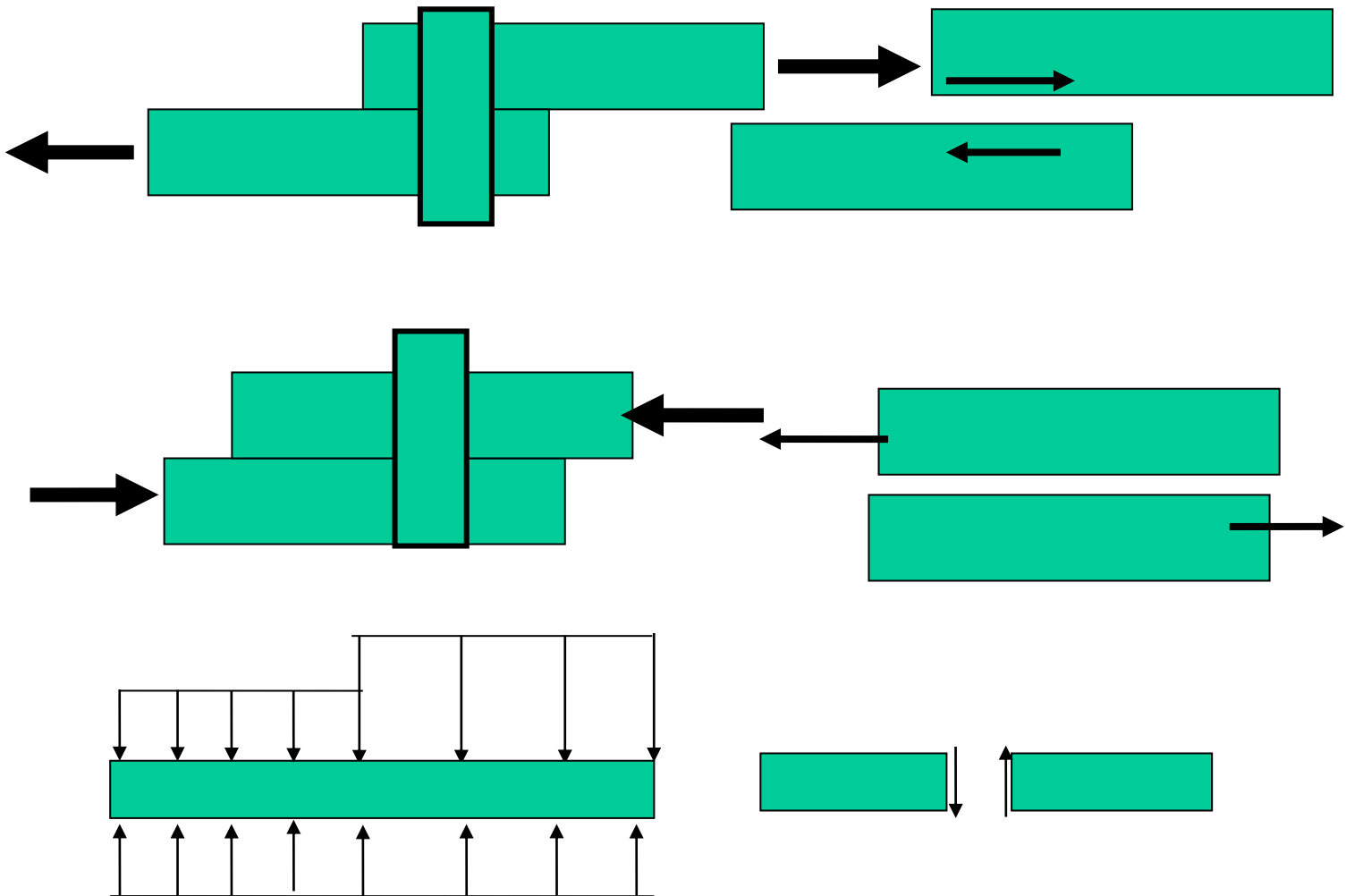
نیروی است که دو انتهای قطعه را در جهت کاهش طول می فشارد. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲. نمایش نیروی فشاری.

۳-۱-۲. نیروی برشی یا مماسی:

نیروی است موازی با سطح قطعه که مطابق شکل ۱-۳ تمایل به جداسازی اجزا از یکدیگر دارد.



شکل ۱-۳. نمایش نیروی برشی

۳-۱-۳. تنش:

یکی از مهمترین معیارهای طراحی و مقایسه خواص مواد است. تنش به صورت کلاسیک نیروی عمودی وارد بر واحد سطح تعریف میگردد. تنش و فشار به لحاظ فیزیکی هم ارز می باشند و یکای یکسان (نیوتن بر متر مربع) دارند اما به لحاظ عملی، واژه تنش معمولا برای جامدات و واژه فشار بیشتر برای سیالات به کار می رود. شکل ۱-۴ توضیحاتی در این زمینه ارائه می کند.



که در آن:

F: نیروی عمودی وارد بر سطح.

A: سطح مقطع جسم.

$\sigma$ : تنش

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

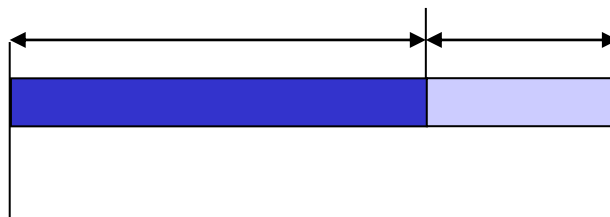
شکل ۱-۴. تعریف تنش و مفهوم آن

۳-۱-۴. کرنش:

نسبت تغییر طول یک ماده - که در نتیجه فرایند تغییر شکل ایجاد می شود- به طول اولیه انرا کرنش گویند. کرنش کمیتی بدون بعد است. شکل ۱-۵ و توضیحات آن به این مطلب می پردازد.



$$\epsilon = \frac{e}{L_0}$$



e: تغییر طول

L<sub>0</sub>: طول اولیه ماده

L: طول ثانویه ماده

$\epsilon$ : کرنش مهندسی

شکل ۱-۵. کرنش مهندسی و مفهوم آن .

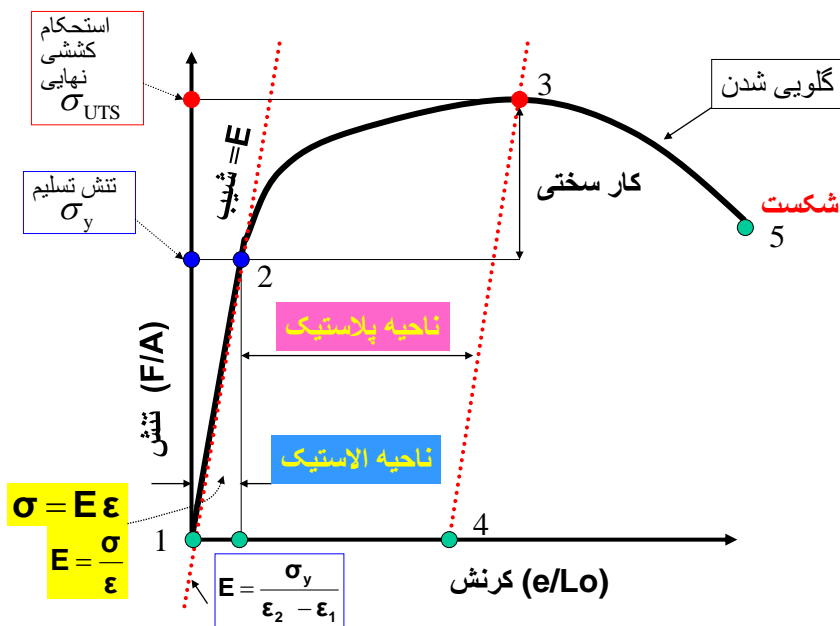
### ۳-۱-۵. نمودار تنش و کرنش

این نمودار رابطه تنش را بر حسب کرنش نشان می دهد که بیان دقیقی از رفتار ماده و مبین بسیاری خواص مکانیکی مهم آن است. هر ماده نمودار تنش و کرنش منحصر بفرد خود را دارد و البته برای یک جنس مشخص ماده، این نمودار مستقل از ابعاد نمونه ایی است که تحت ازمون کشش - متداولترین ازمون برای تعیین خواص مکانیکی مواد- یا ازمون فشار قرار خواهد گرفت. شکل ۱-۶ دستگاه هیدرولیکی مخصوص آزمایش کشش و فشار را نمایش میدهد. نمونه استاندارد از ماده مورد نظر به فکهای دستگاه بسته شده و ازمون اجرا میگردد.



شکل ۱-۶. دستگاه هیدرولیکی BALDWIN، ویژه ازمون کشش و فشار

در طول آزمایش مقدار نیرو و ازدیاد طول نمونه روی دستگاه ثبت می شوند. نمودار تنش بر حسب کرنش که شبیه به نمودار رسم شده در شکل ۱-۷ میباشد، با این اطلاعات قابل رسم است.



شکل ۱-۷. نمودار تنش-کرنش.

### ۳-۱-۶. ناحیه الاستیک (نقطه ۱ تا ۲).

در این ناحیه پس از حذف بار یا نیرو، قطعه (یا نمونه ایی که تحت آزمایش قرار می گیرد) به هندسه و شکل اولیه باز می گردد. این اتفاق بسیار شبیه به کشیدن یک فنر یا یک تکه لاستیک و سپس آزاد نمودن آن است. در این ناحیه تنش به صورت خطی با کرنش متناسب است. و می توان گفت:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$\sigma = E \epsilon$$

که در آن :

$\sigma$  : تنش ( نیوتن بر متر مربع )

$E$  : مدول الاستیک یا مدول یانگ ( نیوتن بر متر مربع )

کرنش :

۳-۱-۷. حد تسلیم (نقطه ۲)

نقطه ایی است که در آن تغییر شکل دائم رخ می دهد. با عبور از این نقطه، ماده هرگز به هندسه و طول اولیه باز نمی گردد.

۳-۱-۸. ناحیه پلاستیک (نقطه ۲ تا ۳)

چنانچه ماده در محدوده ایی فراتر از نقطه تسلیم بار گذاری شود، در صورت حذف بار به ابعاد اولیه باز نمی گردد و بدین سان مقداری تغییر شکل دائم در آن ایجاد می شود. چنانچه در نقطه ۳ بار از روی جسم برداشته شود، منحنی مسیری موازی با ناحیه الاستیک و از نقطه ۳ به نقطه ۴ را خواهد پیمود. در این حالت فاصله بین نقاط ۱ تا ۴ روی محور افقی بیانگر میزان تغییر شکل ماندگار خواهد بود. باید توجه داشت تغییر شکل پلاستیک در اثر لغزش صفحات اهمی در امتداد صفحات و جهات کریستالی معین که جمعا سیستمهای لغزشی معین نامیده می شود، انجام می گیرد.

۳-۱-۹. کرنش سختی (کار سختی)

چنانچه ماده در نقطه ۴ دوباره بارگذاری شود منحنی به نقطه ۳ باز می گردد. این بازگشت موازی ناحیه الاستیک و با شیبی برابر مدول یانگ رخ خواهد داد. اکنون ماده در نقطه ۳ دارای حد تسلیم بیشتری از نقطه ۲ می باشد. این افزایش در حد تسلیم ماده که در نتیجه ایجاد کرنش یا تغییر شکل ماندگار در آن است را کرنش سختی گویند. در واقع تغییر شکل پلاستیک در زیر دمایی تبلور مجدد موجب افزایش سختی و استحکام و کاهش شکل پذیری قطعه می گردد.

۳-۱-۱۰. تنش کششی (نقطه ۳)

بیشترین مقدار تنش روی منحنی تنش - کرنش، به تنش کششی (TS) یا تنش کششی نهایی (UTS) معروف است. تنش کششی نهایی در واقع بیشترین مقدار تنش است که ماده می تواند بدون شکست تحمل کند.

۳-۱-۱۱. نقطه شکست (نقطه ۵)

اگر ماده در نقطه ۳ (تنش کششی نهایی) به صورت کششی بارگذاری شود، تغییر شکل آن غیر یکنواخت بوده و پدیده گلوئی شدن رخ خواهد داد. در واقع ضمن باریک شدن نمونه مقدار تنش نیز کم شده، سر انجام در نقطه ۵ شکست اتفاق می افتد.

۳-۱-۱۲. استحکام.

مقاومت ماده را در برابر تغییر شکل و تمایل آنرا به حفظ نمودن شکل اولیه، استحکام گویند. استحکام به صورت کمی و شهودی در مفاهیم تنش تسلیم و تنش کششی نهایی قابل درک است. به دیگر بیان هر اندازه تنش تسلیم یا تنش کششی نهایی ماده ای بیشتر باشد، استحکام آن بیشتر خواهد بود و بالعکس. فولادهای پر کربن و فلزات الیازی استحکام بالاتری از فلزات خالص دارند.

۳-۱-۱۳. سختی.

مقاومت ماده را در برابر فرورفتگی، خراش و سایش سختی گویند. سختی یک جسم معمولا بر حسب معیارهای برینل و راکول بیان می گردد. استحکام و سختی مفاهیم بسیار نزدیکی هستند زیرا هر دو به ماهیت پیوندهای شیمیایی مواد باز می گردند. معمولا سختی و استحکام با هم رابطه مستقیم دارند به گونه ایی که بالا بودن یکی مترادف با زیاد بودن دیگری نیز می باشد. در جدول ۱-۱ سختی چند ماده مختلف بر حسب معیار برینل ارائه شده است.



### ۳-۱-۱۴. شکل پذیری ( چکش خواری )

میزان تغییر شکل ماده قبل از شکست را شکل پذیری گویند. به لحاظ عددی مقدار کرنش به ازای تنش شکست و روی منحنی تنش-کرنش، معیاری از شکل پذیری ماده خواهد بود. فولاد های کم کربن، آلومینیوم، مس و برنج نمونه ای از بهترین مواد شکل پذیر می باشند.

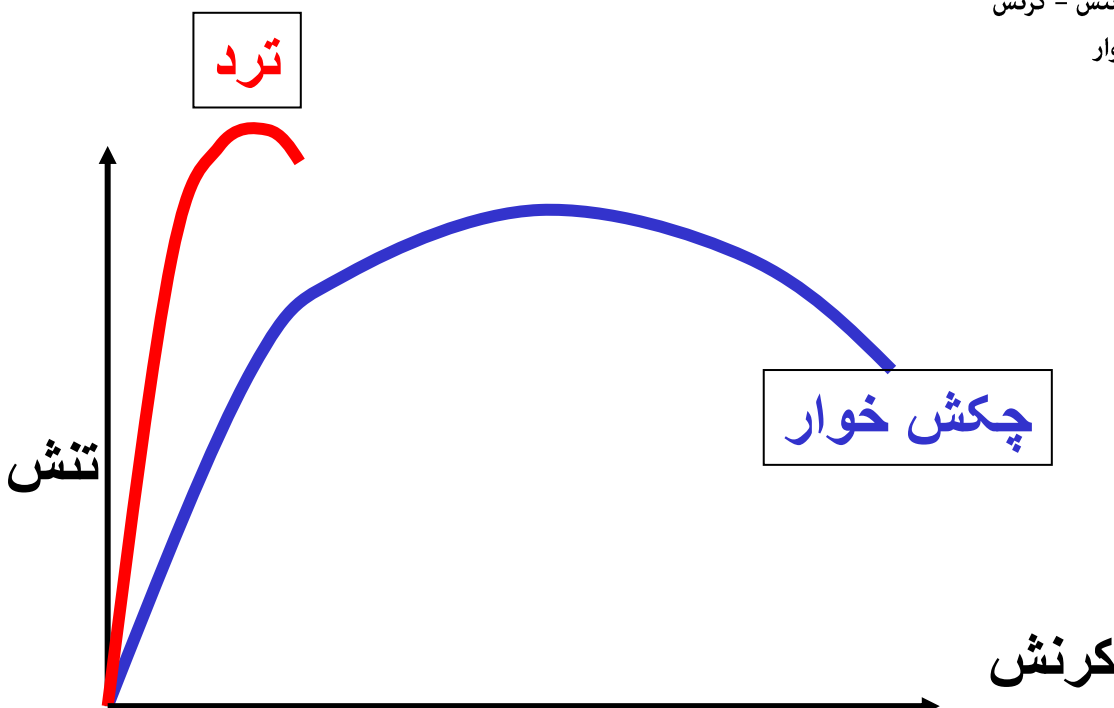
### ۳-۱-۱۵. شکنندگی یا تردی (بریتلنس)

عدم قابلیت شکل پذیری ماده تا قبل از نقطه شکست را شکنندگی گویند. بر خلاف قطعات چکش خوار، مواد ترد تا قبل از شکست نهایی تغییر شکل ناچیزی از خود نشان می دهند. شیشه، آهن ریخته گری، سرامیک و فولادهای پر کربن نمونه هایی از چند ماده ترد هستند. نمودار تنش-کرنش مواد دارای تفاوت اساسی با مواد چکش خوار است. شکل ۸-۱ به صورت شماتیک به این مطلب پرداخته است.

Material	Brinell Hardness
Pure Aluminum	15
Pure Copper	35
Mild Steel	120
304 Stainless Steel	250
Hardened Tool Steel	650/700
Hard Chromium Plate	1000
Chromium Carbide	1200
Tungsten Carbide	1400
Titanium Carbide	2400
Diamond	8000
Sand	1000

جدول ۱-۱. مقایسه سختی چند ماده متداول صنعتی.

شکل ۸-۱. مقایسه نمودار تنش - کرنش مواد ترد و مواد چکش خوار



### ۳-۱-۱۶. چقرمگی

قابلیت جذب انرژی یک ماده، کیفیتی از آن ماده است که به چقرمگی معروف می باشد. اگرچه ارائه تصویری شهودی از این خاصیت دشوار است، چقرمگی یک ماده را از دو طریق اندازه گیری می کنند. نخست محاسبه مساحت زیر منحنی تنش- کرنش است که انرژی جذب شده توسط ماده را در واحد حجم ارائه می کند. دومین روش تست ضربه می باشد که در واقع قابلیت جذب انرژی در اثر ضربه و پیش از شکست را ارزیابی می نماید.

### ۳-۱-۱۷. خستگی

قطعاتی که تحت تنش های تکراری قرار دارند ممکن است در سطح تنشی بسیار پایین تر از استحکام تسلیم در حالت تنش یکنواخت دچار شکست شوند. این فرآیند که عامل شکست حداقل ۹۰٪ سازه های مکانیکی است خستگی نامیده می شود.

### ۳-۱-۱۸. ناهمسانگردی

تغییر در خواص مکانیکی ماده در جهات مختلف را ناهمسانگردی گویند. مهمترین عامل ناهمسانگردی خواص مومسان در فلزات، جهتگیری ترجیحی دانه ها یا به دیگر بیان گرایش آماری دانه ها به جهت های بلور شناسی خاص است.

### ۴-۱. عوامل موثر بر خواص مواد

در حالت کلی دو عامل، یکی درجه حرارت و دیگری محیط بر خواص مواد اثر می گذارند. افزایش درجه حرارت به کاهش مدول الاستیک، تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی و کاهش ان به افزایش چکش خواری و کاهش تردی می انجامد. مراد از بحث محیط نیز اشاره به نقش سولفیدها، اکسیژن و مخصوصا اکسیژن موجود در اب و نیز اثر تششع بر خواص مواد می باشد.

### ۵-۱. دسته بندی فرایندهای شکل دهی فلزات

فرایندهای شکل دهی فلزات را می توان از دیدگاههای مختلف دسته بندی نمود:

- کارداغ، کارگرم و کارسرد.
- شکل دهی حجمی و شکل دهی صفحه ای.
- فرایندهای شکل دهی اولیه و ثانویه.
- فرایندهای شکل دهی یکنواخت و غیر یکنواخت.
- فرایندهای شکل دهی تدریجی و پیوسته.

حال برای عمیق تر شدن مطلب هر یک از مفاهیم و اصطلاحات فوق به اختصار مورد بررسی قرار می گیرند.

کار سرد:

- \* در درجه حرارتی کمتر از ۰.۳ نقطه ذوب فلز مورد نظر انجام میشوند.
- \* درعمل و برای بسیاری فلزات مهندسی این دما به مثابه دمای اتاق می باشد.
- \* پدیده کار سختی حاکم میباشد.

## کار گرم:

\*درجه حرارت بین ۰.۳ تا ۰.۵ نقطه ذوب فلز می باشد.

\* تنش سیلان تا حدی کمتر از فرایندهای کار سرد است.

## کار داغ:

\* در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد انجام می گیرند.  
\* درجه حرارت بیشتر از ۰.۵ یا ۰.۶ نقطه ذوب فلز است.

## فرایندهای شکل دهی صفحه ایی:

\* ماده خام ورودی به صورت ورق است.

\* تغییرات در ضخامت بسیار کم می باشد.

\* تنش های اعمالی اغلب کششی هستند.

## فرایندهای شکل دهی حجمی:

\* ماده ورودی به صورت میله یا بیلت یا از این قبیل است.

\* ضخامت قطعه به صورت محسوسی کاهش می یابد.

\* تنش های اعمالی اغلب فشاری هستند.

## فرایندهای شکل دهی اولیه:

\* بیشتر برای تولید ماده اولیه سایر فرایندها کاربرد دارند.

\* از این دسته می توان فرایندهایی نظیر نورد، کشش و اکستروژن را نام برد.

## فرایندهای شکل دهی ثانویه:

\* بیشتر برای تولید قطعات ترکیبی کاربرد دارند.

\* ماده خام آنها از فرایندهای شکل دهی اولیه بدست می آید.

\* از این دسته می توان به فرایندهایی نظیر آهنگری و کشش عمیق اشاره نمود.

## فرایندهای شکل دهی یکنواخت:

\* اساسا حالت تنش ثابت دارند.

\* محصول به صورت پیوسته شکل دهی میگردد.

\* از این دسته می توان فرایندهایی نظیر نورد، کشش و اکستروژن را نام برد.

## فرایندهای شکل دهی غیر یکنواخت:

\* حالت تنش در طول فرایند شکل دهی به طور پیوسته تغییر میکند.

\* از این دسته می توان به فرایندهایی نظیر آهنگری و کشش عمیق اشاره نمود.

## فرایندهای شکل دهی یک بعدی:

\* یک خط یا صفحه تماس بین ابزار و قطعه کار وجود دارد.

\* تنها یک حرکت نسبی برای ایجاد هندسه مورد نظر لازم است.

## فرایندهای شکل دهی دو بعدی:

\* تنها یک خط تماس بین ابزار و قطعه کار وجود دارد.

\* ایجاد هندسه مورد نظر مستلزم داشتن دو حرکت نسبی است.

\* فرایندهای شکل دهی تدریجی از این دسته اند.

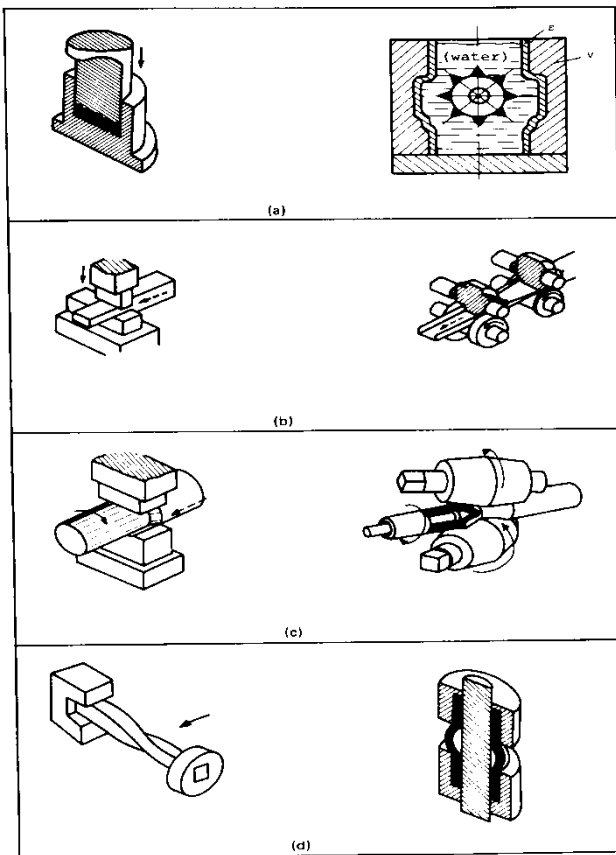
## فرایندهای شکل دهی ازاد:

\* ابزار فاقد هندسه و شکل نهایی قطعه است.

## فرایندهای شکل دهی نهایی:

\* ابزار دارای بیشترین شباهت به شکل نهایی قطعه میباشد.

شکل ۹-۱ شماتیک مربوط به چهار تعریف اخیر را ارائه میکند.

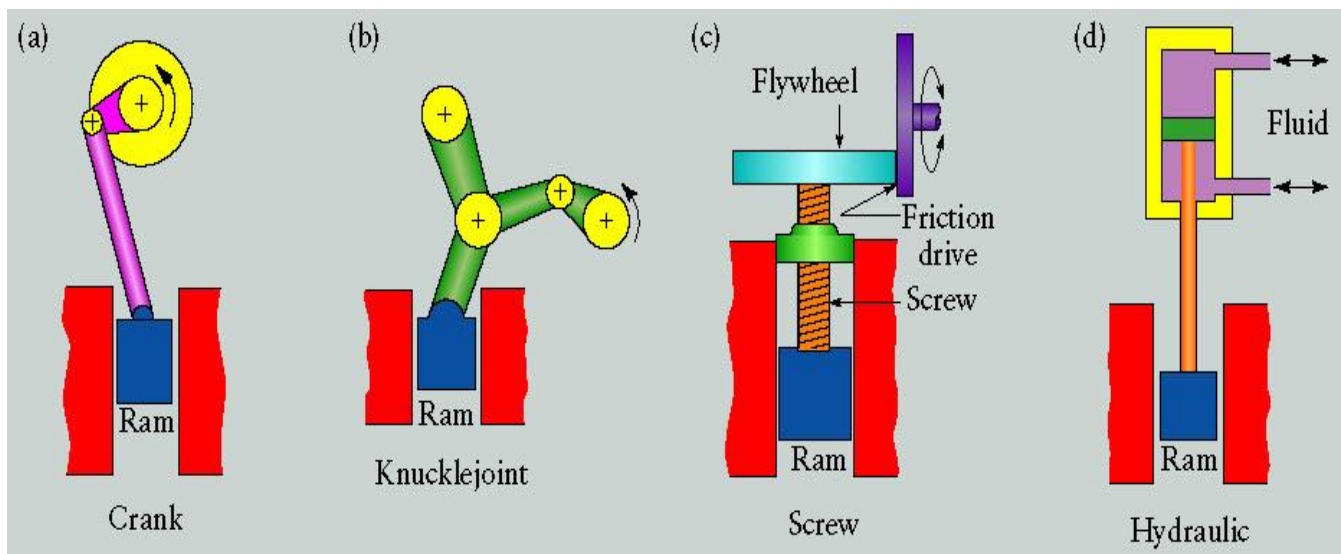


شکل ۹-۱. (a) فرایندهای شکل دهی نهایی، (b) فرایندهای شکل دهی یک بعدی (c) فرایندهای شکل دهی دو بعدی (d) فرایندهای شکل دهی آزاد.

## ۶-۱. انواع ماشین های شکل دهی فلزی

فرایندهای مختلف شکل دهی فلزی تنوع وسیعی از تجهیزات

و ماشین الات را می طلبند. مهمترین ماشین های شکل دهی فلزی عبارتند از پرس ها، چکشها و ماشینهای مخصوص فرایندهای شکل دهی با نرخ بالای انرژی. از این میان پرسها کاربرد بیشتری در فرایندهای شکل دهی فلزی پیدا کرده اند. پرس ها با مکانیزم های متفاوتی ساخته می شوند. معروفترین پرسها عبارتند از پرسهای مکانیکی، هیدرولیکی، قفلی و پیچی که در شکل شماتیک ۱۰-۱ ارائه شده اند.



شکل ۱۰-۱. طرح شماتیک انواع پرس. (a) مکانیکی (b) قفلی (c) پیچی (d) هیدرولیکی

در میان انواع مختلف پرس ، پرسهای مکانیکی و هیدرولیکی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. در مقایسه با نوع هیدرولیکی، پرسهای مکانیکی سرعت بیشتر و دقت کمتر دارند. باید توجه نمود قابلیت تنظیم کورس در پرسهای هیدرولیکی به مراتب بهتر بوده، قدرت بیشتری در اعمال نیرو دارند. در حالت کلی می توان مهمترین ویژگیهای پرسهای هیدرولیک را به صورت زیر دانست.

- سرعت ثابتی را در طول کورس فراهم می کنند.

- برخي محدوديتها در اعمال نيرو دارند.
- هزينه هاي اوليه بالايي را مي طلبند.
- نگهداري آنها اسان است.

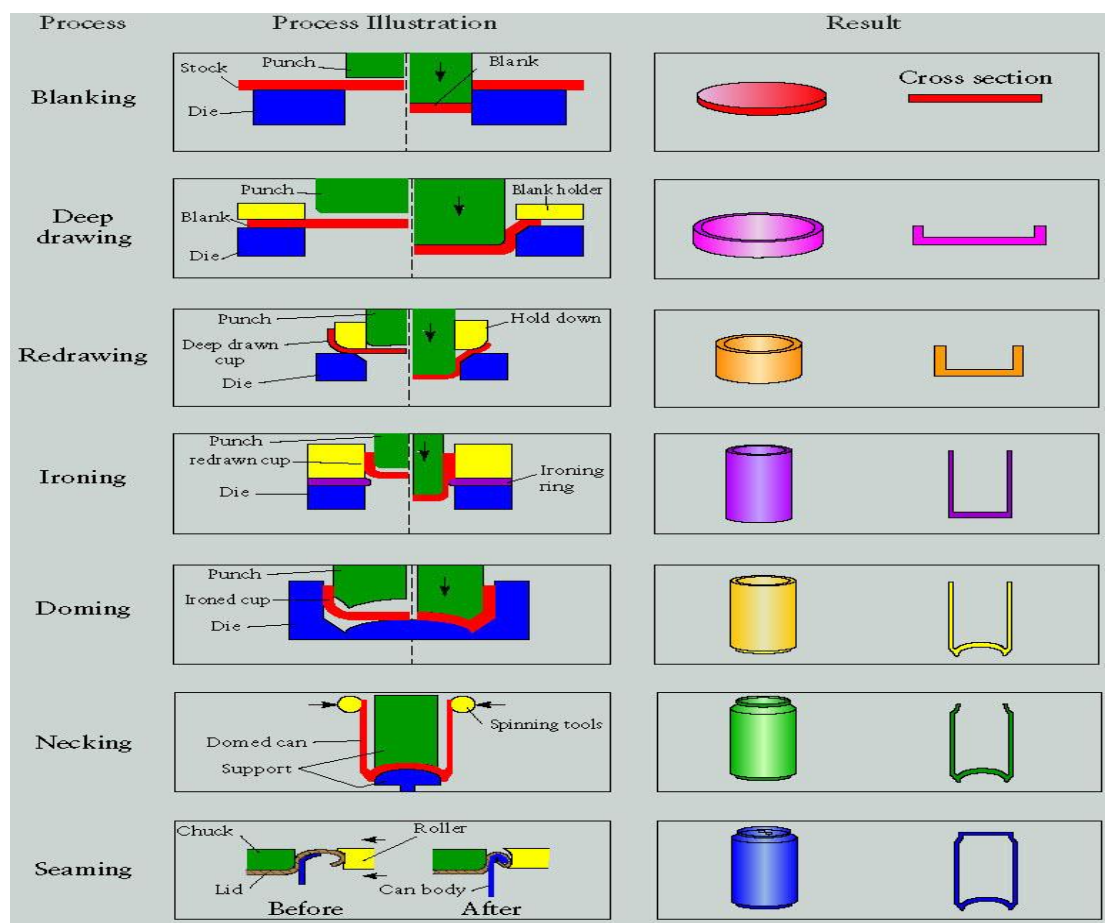
در مورد پرسهاي مكانيكي نکات زير وجود دارد:

- به صورت ميل لنگ يا خارج از مرکز وجود دارند.
- کورس آنها محدود است.
- انرژي ان به ميزان ذخيره شده در چرخ طيار بستگي دارد.
- در نقطه مرگ پايين مي تواند انرژي بسيار زيادي را تا مين کند.
- در طراحي قالب مي بايست احتياط نمود تا از شکست ان جلوگیری شود.

## فرآیندهای شکل دهی صفحه ایی

۱- مقدمه:

شکل دهی ورق های فلزی نقش بسیار مهمی را در دنیای ساخت و تولید ایفا می کند. بسیاری قطعات پیرامون ما، از لولای ساده در گرفته تا قطعات خودرو با فرایندهای شکل دهی صفحه ایی تولید می شوند. شکل ۲-۱ طرح نمونه ایی از فرایندهای شکل دهی فلزی که در تولید قوطیهای انواع نوشیدنی ها به کار می روند را ارائه می کند.

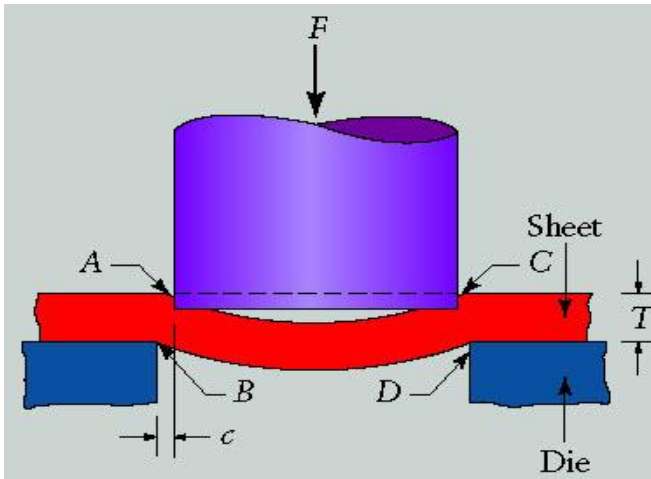


شکل ۲-۱. انواع فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی.

منظور از فرایندهای شکل دهی صفحه ایی، شکل دهی ورق های فلزی با نسبت بزرگی از مساحت سطح ورق به ضخامت آن می باشد. معمولا نیروهای کششی در شکل دهی ورق ها مطرح هستند و در این قسمت بکارگیری تنش های فشاری عموماً به کمانش، چین خوردگی و پیچش منجر می شود. عواملی نظیر ازدیاد طول، تنش تسلیم، ناهمسانگردی، اندازه دانه ها، تنش های پسماند، برگشت فیزی و کمانش از مهمترین پارامترهای مطرح در شکل دهی ورق ها می باشند. برش، خمکاری، هیدروفرمینگ، شکل دهی انفجاری و کشش عمیق مشهورترین فرایندهای شکل دهی صفحه ایی هستند که هر یک ویژگیها و امتیازات خاص خود را دارند. از این میان مهندسين طراح با بررسی خواص مکانیکی مورد نیاز و انتخاب موادی که خواص مورد نظر را تامین کنند، مناسب ترین تکنیک تولید را برمی گزینند. در این بخش اساس تمامی فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی ارائه و در هر مورد توضیحاتی بیان شده است.

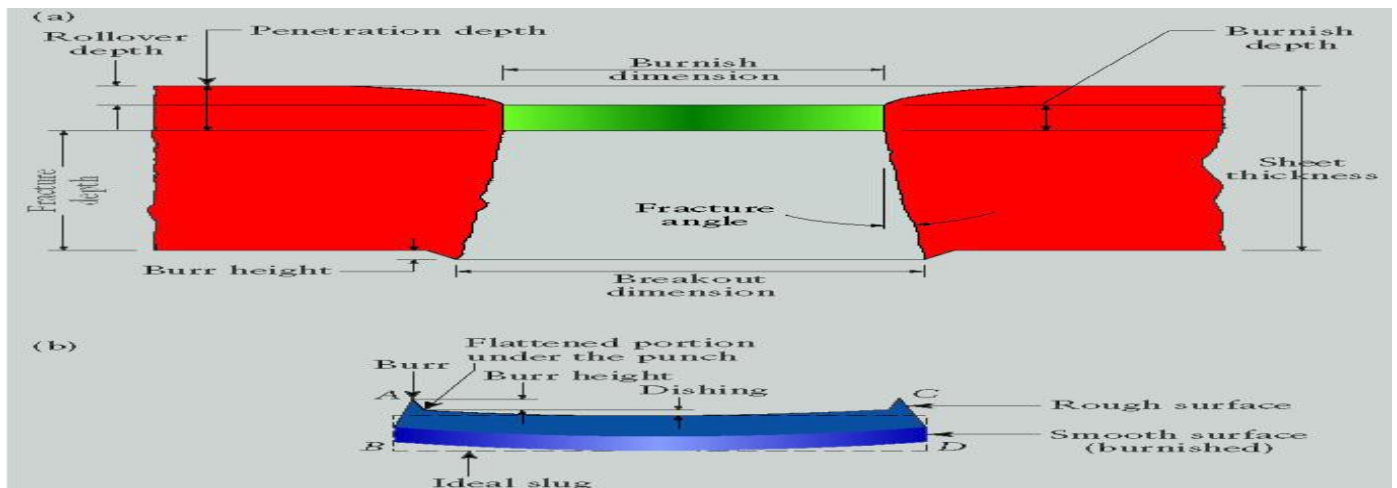
## ۱- برش (Shearing):

شکل دهی فلزات در اثر تنش برشی بین سنبه و ماتریس را برش گویند. شکل ۱-۲ شماتیک فرایندهای برش با سنبه و ماتریس را ارائه می کند. این فرایند روش متداول ایجاد سوراخ در ورق های فلزی است.



شکل ۱-۲. برش ورق بین سنبه و حفره ماتریس.

فولادهای کم کربن متداولترین جنس برای ورق های فلزی برش هستند. البته در صنایع هوایی بیشتر از آلومینیوم و تیتانیوم استفاده می شود. همانگونه که در شکل ۲-۲ نیز نمایان است برش معمولاً با شکل گیری ترکهایی در هر دو لبه بالا و پایین قطعه کار آغاز میگردد. این ترکها بهم رسیده و جدایش پولک از ورق اتفاق می افتد.



شکل ۲-۲. مشخصات سوراخ و پولک ایجاد شده. (a) سوراخ ایجاد شده توسط سنبه. (b) پولک جدا شده از ورق.

باید توجه داشت به دلیل تنش های پسماند حاصل از فرایند برش، ابعاد پولک نسبت به ابعاد مقطع سنبه تا حدودی افزایش می یابد (بازگشت الاستیک). بدین سان پولک حاصل از فرایند برش اندکی از حفره ماتریس چاق تر خواهد بود. پارامترهای این فرایند عبارتند از:

\* شکل قطعه که هندسه سنبه و ماتریس را تعیین میکند.

\* سرعت سنبه

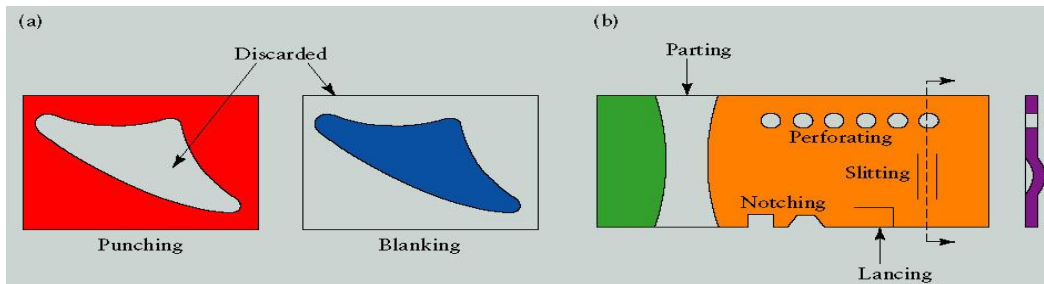
\* روانکاری

\* لقی بین سنبه و حفره ماتریس

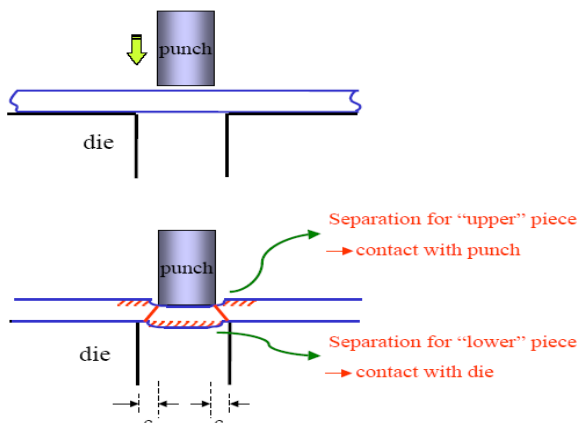
چندین عملیات بر پایه فرایند برش انجام میشوند که مهمترین آنها به شرح زیر اند:

\* عملیات بلنک زنی (پولک زنی) که در آن مطابق شکل ۳-۲ قسمت جدا شده از ورق، بلنک (پولک) مورد نظر میباشد. بدیهی اینکه در این حالت قسمت باقیمانده ورق اضافی میباشد.

\* عملیات سوراخ زنی که در آن مطابق شکل ۲-۳ قسمت جدا شده از ورق، اضافی بوده و قسمت باقیمانده بلنک (پولک) میباشد.



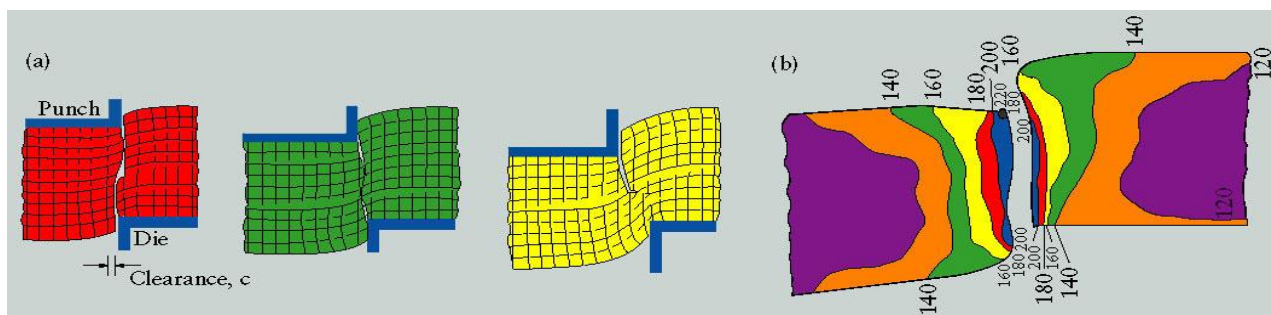
شکل ۲-۳. (a) نمایش عملیاتهای بلنک زنی و سوراخ زنی. (b) مثالهایی از فرایندهای مختلف برش در ورق های فلزی.



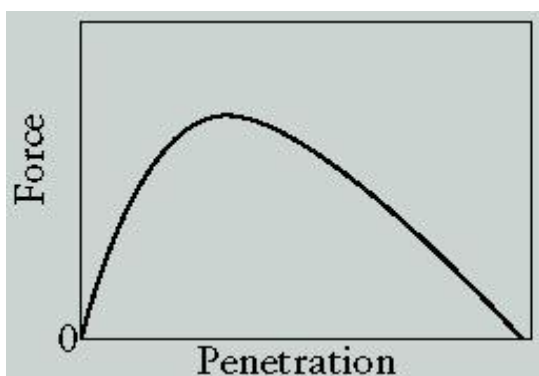
در بحث برش و طراحی قالب ، لقی و انتخاب مقدار مناسب آن بسیار حائز اهمیت می باشد. در حالت کلی میزان لقی تابعی از جنس ورق و ضخامت آن ، ابعاد بلنک و فاصله مرزهای برش تا لبه های ورق می باشد. میزان لقی برای مواد نرم کمتر از مواد سخت تر در نظر گرفته می شود. مطابق شکل ۲-۴ با افزایش لقی تمایل ورق به کشیده شدن در حفره ماتریس بیشتر از تمایل آن به برش خواهد بود.

شکل ۲-۴. با افزایش لقی ، تمایل ورق به کشیده شدن در حفره ماتریس زیاد می گردد.

در عمل مقدار لقی بین ۲ تا ۱۰ درصد ضخامت ورق در نظر گرفته می شود. در شکل a - ۲-۵ اثر لقی بین سنبه و ماتریس در ناحیه تغییر شکل و در قسمت b کانتورهای سختی بر اساس معیار ویکرز برای یک ورق فولادی AISI 1020 با ضخامت ۰.۴ میلیمتر بررسی شده است.



شکل ۲-۵ (a) اثر لقی بین سنبه و ماتریس در ناحیه تغییر شکل (b) کانتورهای سختی بر اساس معیار ویکرز

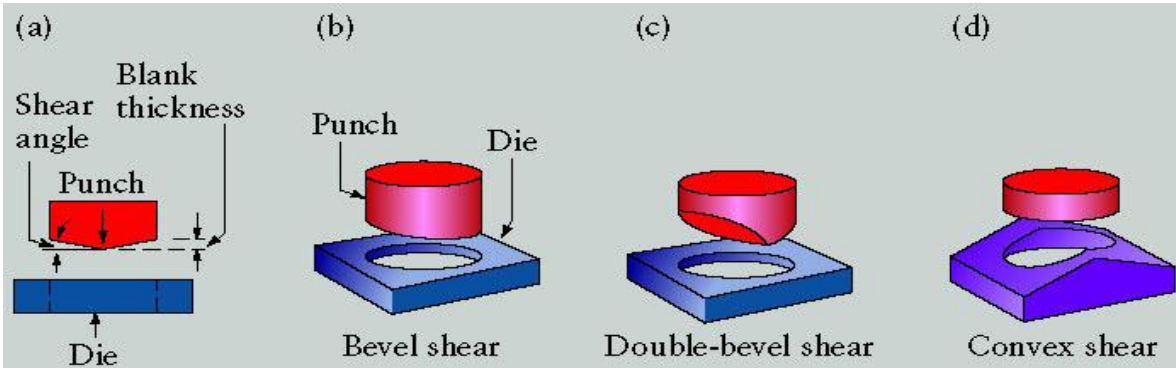


شکل ۲-۶ نمودار نیرو بر حسب عمق نفوذ سنبه در ورق را نشان می دهد. سطح زیر نمودار بیانگر کار لازم برای انجام عملیات برش می باشد. این مساحت که بیانی از نیروی مورد نیاز شکل دهی (تناژ پرس) است به شکل قطعه و پارامترهای فرایند بستگی دارد.

شکل ۲-۶. نمودار نیرو بر حسب جابجایی سنبه (عمق نفوذ)

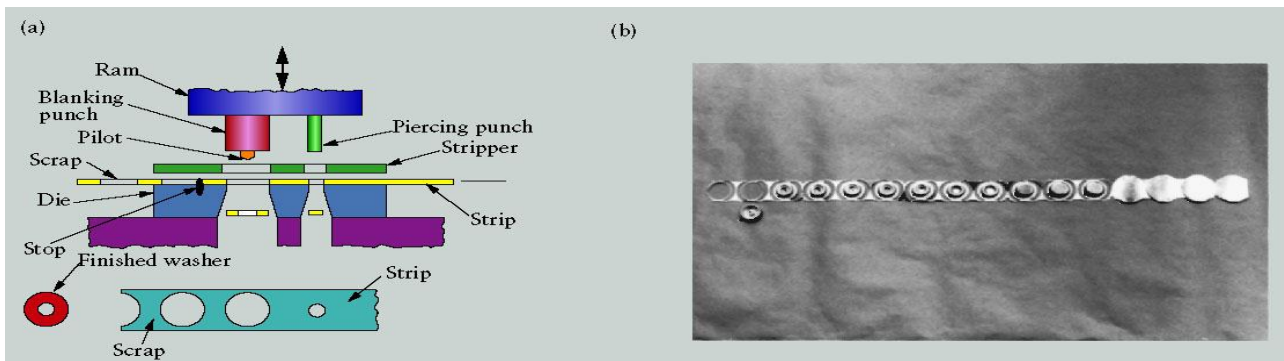


به منظور کاهش نیروی مورد نیاز معمولاً و با در نظر گرفتن ملا حظاتی سر سنبه یا ماتریس را به صورت شیبدار می سازند و اصطلاحاً انرا قیچی کردن سر سنبه یا ماتریس گویند. (شکل ۷-۲)



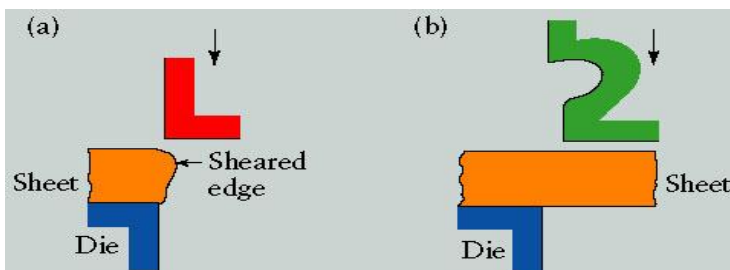
شکل ۷-۲. مثالهایی از قیچی کردن سر سنبه و ماتریس

در برخی موارد لازم است تعدادی عمل برش به صورت سری روی ورق انجام گیرد. بدین منظور چند ایستگاه کاری (مرحله) در قالب تعبیه می شود به گونه ای که در هر مرحله بخشی از قطعه ایجاد شده و با هدایت ورق به سمت خروجی قالب در آخرین ایستگاه، محصول تکمیل می گردد. چنین قالبی را قالب مرحله ای گویند. شکل ۸-۲ فرایند تولید واشر در یک قالب مرحله ای را ارائه می کند.



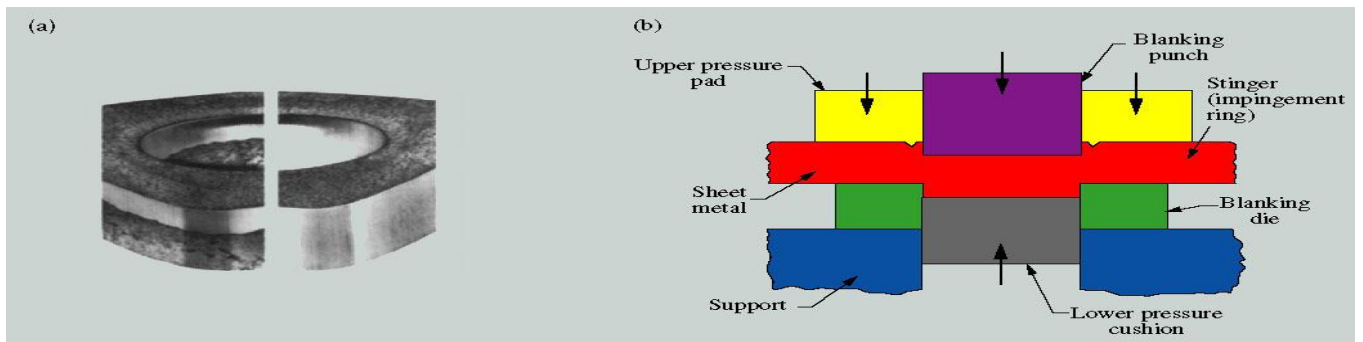
شکل ۸-۲. (a) تولید واشر در قالب مرحله ای. (b) نمایش ورق برش خورده در یک قالب مرحله ای و محصول نهایی این فرایند (درب بالایی قوطی اسپری)

سطوح بریده شده بوسیله قالبهای معمولی حتی در مواردیکه همه پارامترها - از جمله لقی - بهینه انتخاب شوند، سطوح صاف و تمیزی نیستند. بنابراین اگر هدف تولید قطعات با دیواره های پرداخت باشد لازم است عمل اصلاح نیز صورت گیرد. شکل ۹-۲ به این مطلب می پردازد.



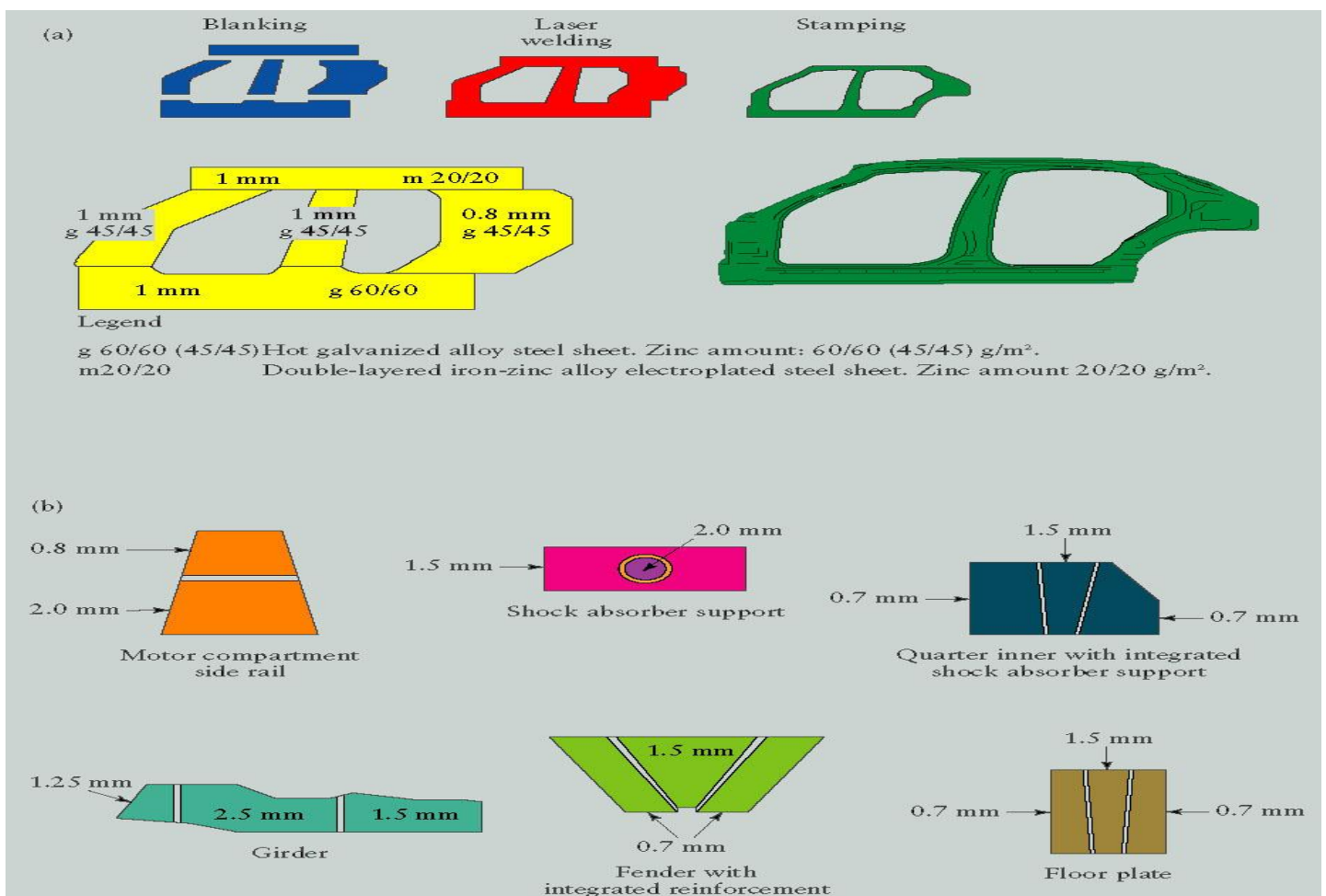
شکل ۹-۲. (a) اصلاح یک لبه برش خورده. (b) ترکیب عمل برش و اصلاح در یک ضرب پرس.

تلاش برای تولید قطعات با دیواره های صاف و پرداخت بوسیله خود عمل برش و نه هیچ عملیات اضافی دیگر به ساخت قالبهای دقیق منجر شد. در این قالبها معمولاً سنبه در حفره ماتریس وارد نمی شود و فقط تا سطح ماتریس در ورق فرو می رود. مشخصه متمایز این روش لقی بسیار کم بین سنبه و ماتریس است. در شکل ۱۰-۲ مقایسه ای عملی بین کیفیت سطح حاصل شده از قالبهای برش معمولی و قالبهای دقیق ارائه شده است. شکل ۱۰-۲-ب طرح شماتیک یک قالب دقیق را نمایش می دهد.



شکل ۲-۱۰. (a) محصول قالب سنتی (چپ) و قالب دقیق (راست). (b) طرح شماتیک قالب دقیق

علاوه بر موارد گذشته، صنعت پیشرفته امروز شیوه های دیگری از فرایند برش فلزات را نیز مورد استفاده قرار می دهد. یکی از نمونه های معروف، جوش دادن دو یا چند ورق فلزی است که عموماً دارای ضخامت و حتی جنسهای متفاوتی می باشند. این مجموعه ورق های جوش خورده تشکیل یک ورق یکپارچه را می دهند که تحت عملیات بلنک زنی قرار میگیرد. تکنیک اخیر که خصوصاً در صنایع خودرو سازی به کار گرفته می شود را بلنک زنی اتصالات تیلور می گویند.

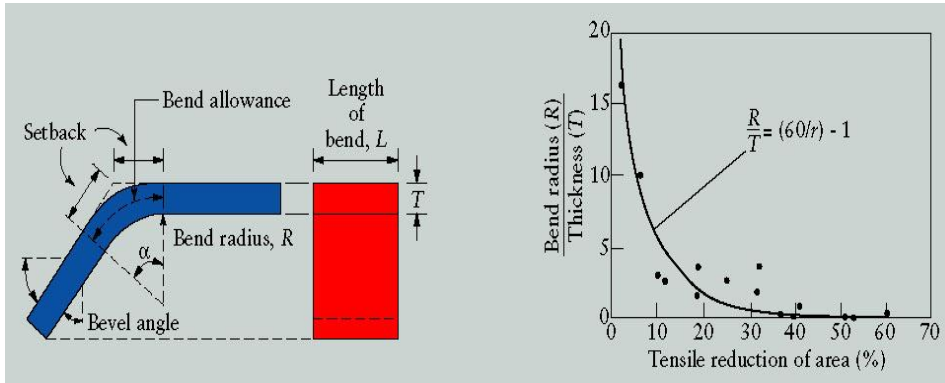


شکل ۲-۱۱. (a) تولید بدنه خارجی خودرو به روش بلنک زنی اتصالات تیلور (b) نمونه هایی از بدنه های جوش خورده (عموماً به روش جوشکاری لیزر)

## ۲- خمکاری ( BENDING ):

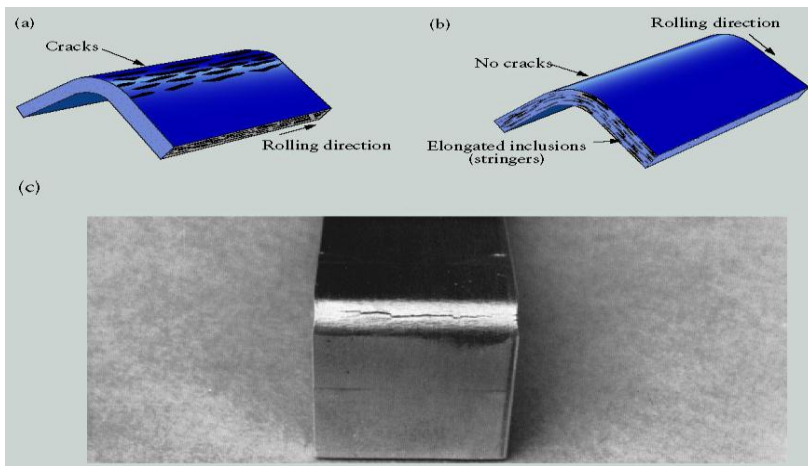
خمکاری به دسته ای از فرایندهای شکل دادن سرد گفته می شود که در آن ورق های فلزی تحت خمش قرار گرفته و زاویه دار می شوند. تنش اعمالی در این فرایند بیش از تنش تسلیم و کمتر از تنش کششی نهایی قطعه می باشد. با توجه به شکل a - ۲-۱۲ شعاع خم از سطح داخلی آن ارزیابی شده، همچنین طول خم نیز همان عرض ورق می باشد. در عملیات خمکاری - که عموماً

حول یک محور انجام می شود- سطح داخلی ورق در معرض تنشهای فشاری بوده و سطح بیرونی آن تنش های کششی را تحمل می کند. در واقع خمکاری فلز از یک سو موجب ایجاد تنش های کششی روی سطح خارجی خم- که فلز بایستی در آنجا کشیده شود- و از سوی دیگر به ایجاد تنش های فشاری روی قسمت درونی خم- که فلز در آنجا فشرده می شود- منجر می گردد. محور خنثی عبارت است از خطی که فلز در امتداد آن نه کشیده می شود و نه فشرده می گردد. از عیوب عمده این فرایند میتوان به چین خوردگی در لایه های داخلی- تحت فشار- و پارگی در لایه های خارجی ورق- تحت کشش- اشاره نمود. شکل ۲-۱۲-ب رابطه بین نسبت شعاع خم به ضخامت ورق و میزان کاهش مقطع ورق در ازمون کشش را ارائه می کند. همانگونه که



از نمودار برمی آید ورق های فلزی که قابلیت کاهش مقطع در آنها تا ۵۰ درصد باشد می توانند بدون آنکه دچار ترک خوردگی (پارگی) شوند تحت خمکاری قرار گیرند.

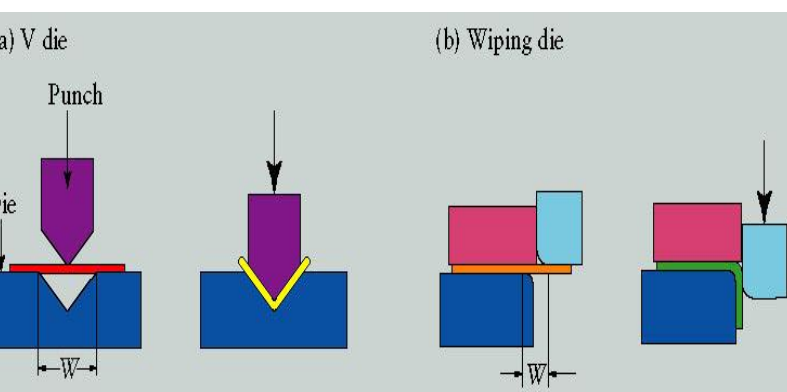
شکل ۲-۱۲ . (a) پارامترهای خمکاری (b) نمودار رابطه تجربی میان نسبت شعاع خم به ضخامت ورق و میزان کاهش مقطع ورق



بهتر است به منظور جلوگیری از ترک خوردگی ، جهت خمکاری و جهت نورد اولیه ورق یکسان باشد. اساس این پیشنهاد به آثار ناشی از تمرکز تنش در ناخالصی های ورق- که نورد شده و از این رو افزایش طول داشته اند - باز می گردد. این مطلب در شکل ۲-۱۳ و توضیحات آن بررسی شده است.

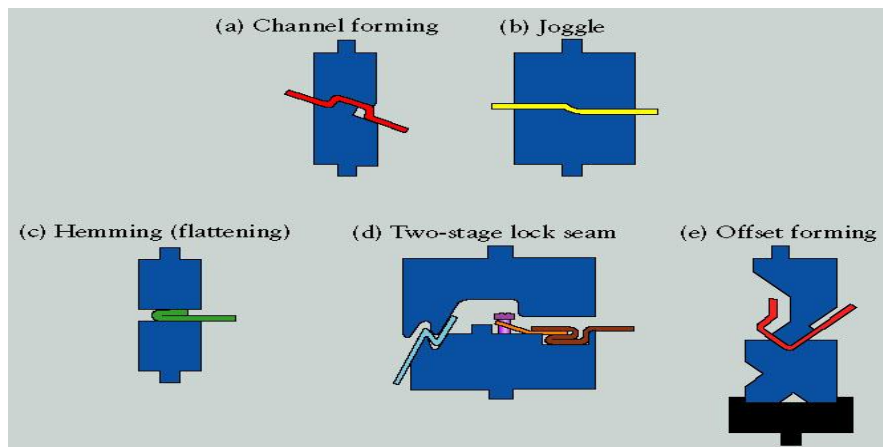
شکل ۲-۱۳ . (a) خمکاری در راستای نورد (b) در جهت عمود بر راستای نورد (c) نمایش ترک خوردگی روی شعاع خارجی یک ورق آلومینیوم که تا زاویه ۹۰ درجه خم شده است .

با کاهش شعاع خم یا افزایش ضخامت میله (به ازای شعاع خمشی به اندازه کافی بزرگ) فلز در معرض تنش های کششی بزرگی قرار خواهد گرفت. هرگاه تنش های کششی بیشتر از تنشهای فشاری شوند، قطعه کار خواهد شکست، بنابر این لازم است تنشهای کششی سطح خارجی را در یک حد مجاز نگه داشت. حداقل شعاع خمشی که بعد از آن ماده ترک بر می دارد را حد شکل دادن یا



حد خمکاری گویند که عموماً به بصورت ضریبی از ضخامت (۲ تا ۴ برابر) و غیره بیان می گردد. خمکاری در قالبهای V شکل و نیز قالبهای روبشی، دو روش متداول ایجاد خم در ورقهای فلزی هستند که در شکل ۲-۱۴ ارائه شده اند.

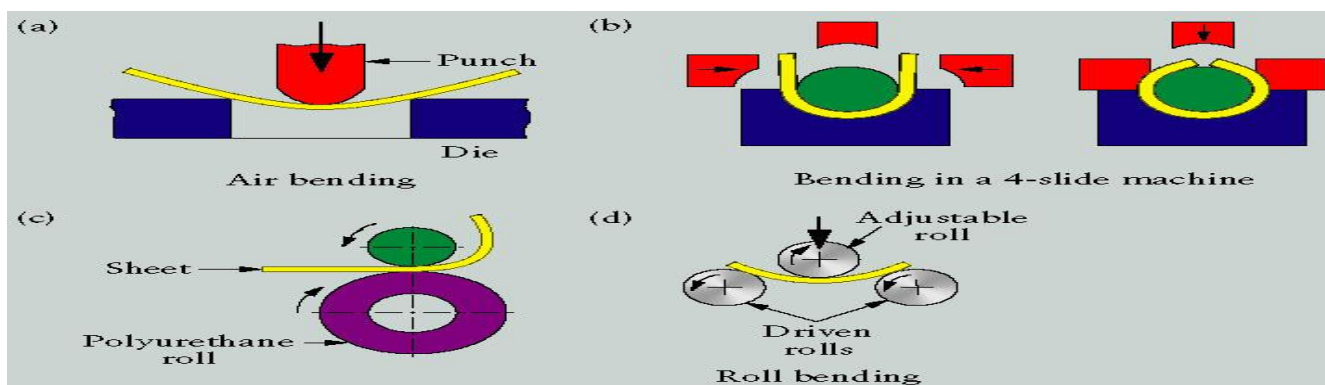
برخی عملیاتهای خمکاری با به کار گیری پرس های خمشی انجام می گیرند. ظرفیت این پرس ها از ۲۰ تا ۲۰۰ تن می باشد و چند نمونه شماتیک انها در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵. نمونه هایی از فرایندهای خمکاری در پرس های خمشی.

(a) حیدیه کانالی (b) قالب خم (c) تخت کاری. (d) خم دو طرفه (E) قالب دارای زاویه منفرجه به شکل گردن غاز

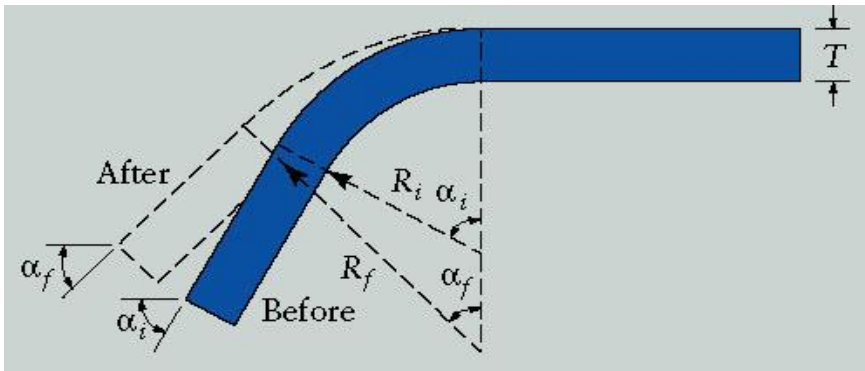
شکل ۲-۱۵ طرح شماتیک عملیاتهای مختلف خمکاری را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۵. شماتیک عملیات های خمکاری. (a) خمکاری بادی یا خمکاری ازاد ( چون ورق تکیه گاهی جز هوا ندارد به این نام موسوم است ) (b) خمکاری در ماشینهای چهار پارچه (c) خمکاری موافق ( غلطک بالایی ورقهای بزرگ فلزی را به سمت غلطک پایین کشیده و در ان انحنا ایجاد می کند ). (d) خمکاری غلطکی ( برای ورق ها )

یکی از مباحث مهم در خمکاری پدیده برگشت فیزی می باشد. این پدیده از رفتار الاستیک ماده پس از حذف بار (پایان شکل دهی و توقف در اعمال نیروی خمکاری) ناشی می شود. در واقع در هنگام بارگذاری، نمونه ابتدا به صورت الاستیک و سپس بطور پلاستیک تغییر شکل می دهد. وقتی نیرو از روی جسم برداشته می شود ناحیه الاستیک تغییر شکل خود را باز می یابد و به برگشت فیزی می انجامد. همانگونه که از شکل ۲-۱۴ بر می آید ورق تمایل دارد به حالت تخت قبل از خمکاری بازگردد. در نتیجه شعاع خم مقداری افزایش خواهد یافت. مقدار برگشت فیزی که معمولاً بین ۵ تا ۱۰ درجه می باشد به جنس ماده، ضخامت، دانه بندی و عملیات حرارتی بستگی دارد. برای مثال در فولاد بسته به سختی آن حدود ۰.۵ تا ۵ درجه و در برنز فسفر دار ۱۰ تا ۱۵ درجه می باشد. باید توجه داشت برخی مواد مثل مس نرم نیز عملاً هیچگونه برگشت فیزی ندارند.

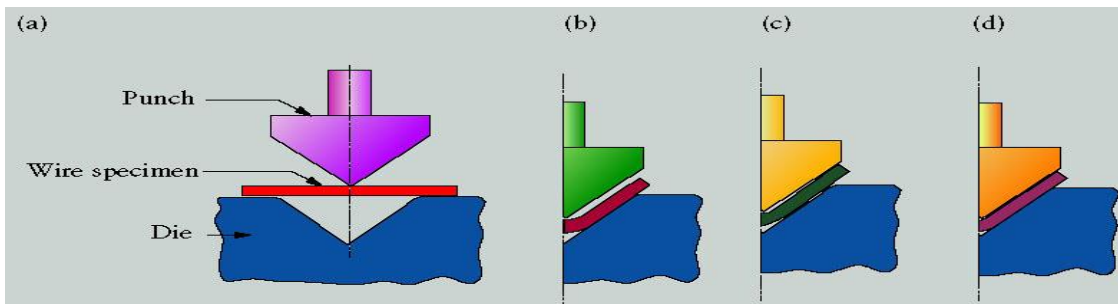
شکل ۲-۱۴. پدیده برگشت فزری



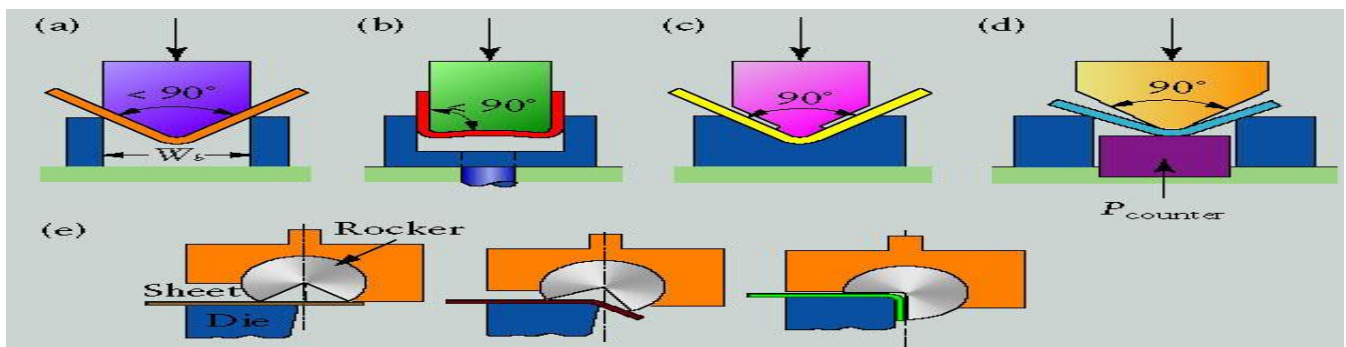
حالتی نیز وجود دارد که در آنها پس از خمکاری، ماده به خم شدن بیشتر (کاهش شعاع خم) تمایل نشان می دهد. این حالت

را برگشت فزری منفی می گویند. شکل ۲-۱۵ طرح شماتیک خمکاری یک سیم مدور در قالب ۷ شکل را ارائه می کند. این نوع خمکاری می تواند به پدیده برگشت فزری منفی منجر شود که احتمال وقوع آن در خمکاری ازاد اساسا منتفی است.

شکل ۲-۱۵. خمکاری منجر به برگشت فزری منفی

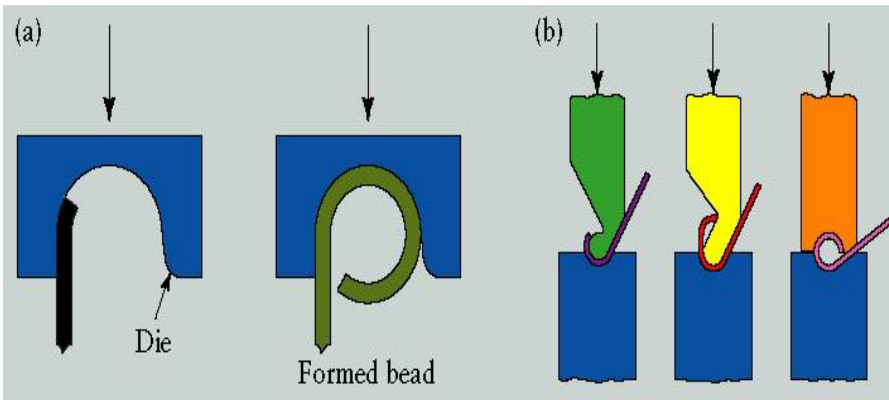


به منظور غلبه بر پدیده برگشت فزری راهکارهای متفاوتی وجود دارد. خمکاری قطعه با زاویه ایی بیشتر از زاویه خم مورد نظر، کوبش قطعه کار در انتهای عملیات خمکاری برای کاهش تنش های الاستیک موجود و نیز استفاده از خمکاری دوار که در شکل E-۲-۱۶ ارائه شده است.



شکل ۲-۱۶. روشهای کاهش یا حذف برگشت فزری.

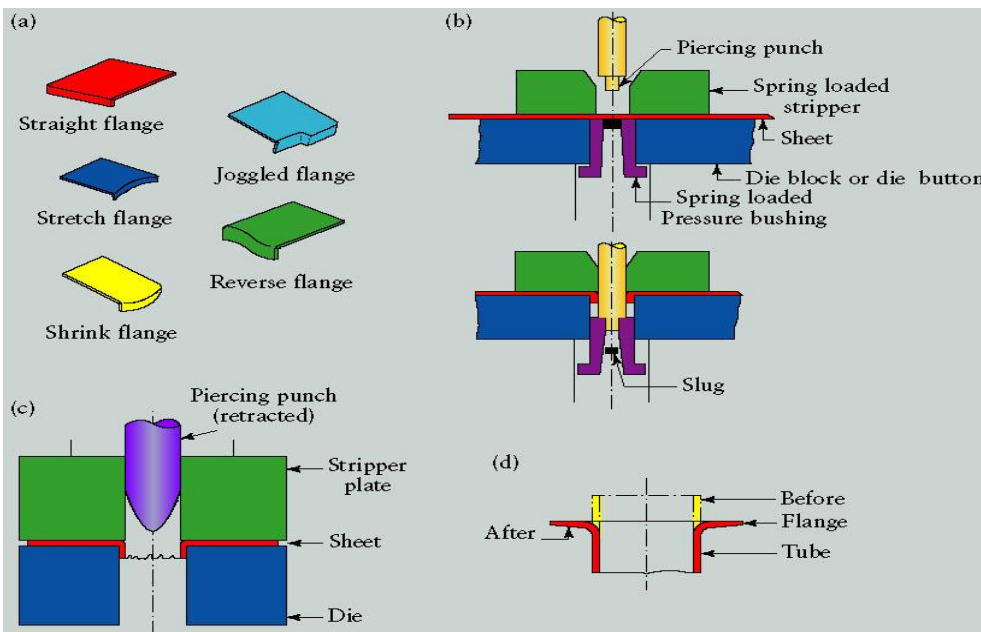
به منظور حذف لبه های تیز و همچنین افزایش ممان اینرسی ورق از فرایند خمکاری موسوم به لبه دار کردن خمشی استفاده میشود. مطابق شکل ۲-۱۷ این عمل ممکن است در قالبهای یک تکه یا قالبهای دو تکه و در یک پرس خمشی انجام شود.



شکل ۲-۱۷. (a) لبه دار کردن خمشی در قالب یک تکه (b) لبه دار کردن در پرس خمشی.

## ۲- شکل دهی فلانچ ( لبه ) های کش آمده یا جمع شده (Flanging Operations):

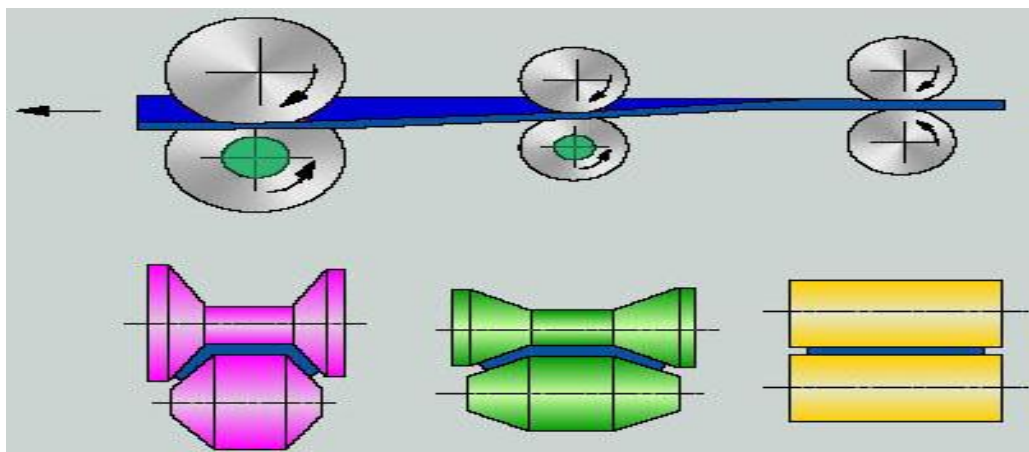
خم کردن و فرم دهی لبه ورق را لبه دار کردن یا اصطلاحاً فلانچ زنی گویند. فلانچ ها (لبه ها) بی که در هنگام شکل دهی کشیده می شوند به فلانجهای کش آمده و فلانچ هایی که در فرایند فرم دهی جمع می شوند به فلانچ های جمع شده معروف اند. اگر ترکیبی از هر دو نوع عمل در فلانچ ایجاد شود انرا نوع معکوس گویند که در واقع قسمتی از نوع کش آمده و قسمتی از نوع جمع شده خواهد بود. شکل a - ۲-۱۸ چند نمونه لبه ایجاد شده در ورق را نمایش می دهد. در فلانجهای کش آمده امکان شکست و ترک خوردگی و در فلانچ های جمع شده احتمال چین خوردگی وجود دارد. شکل b - ۲-۱۸ شماتیک فرایند لبه دار کردن تدریجی را ارائه می کند. در این فرایند یک ورق فلزی از طریق عملیات سوراخ زنی لبه دار می شود. با پیشروی سنبه ، ابتدا سوراخ ایجاد شده و سپس به صورت تدریجی لبه دار می شود، بدین سان این فرایند در دو مرحله اما به صورت همزمان تکمیل می گردد. شکل c- ۲-۱۸ نیز به همان فرایند می پردازد با این تفاوت که در اینجا سوراخ زنی و لبه دار کردن به صورت همزمان و در یک مرحله انجام می گیرند. شکل d- ۲-۱۸ لبه دار کردن یک لوله را نمایش می دهد.



شکل ۲-۱۸. فرایند های لبه دار کردن ( فلانچ زنی )

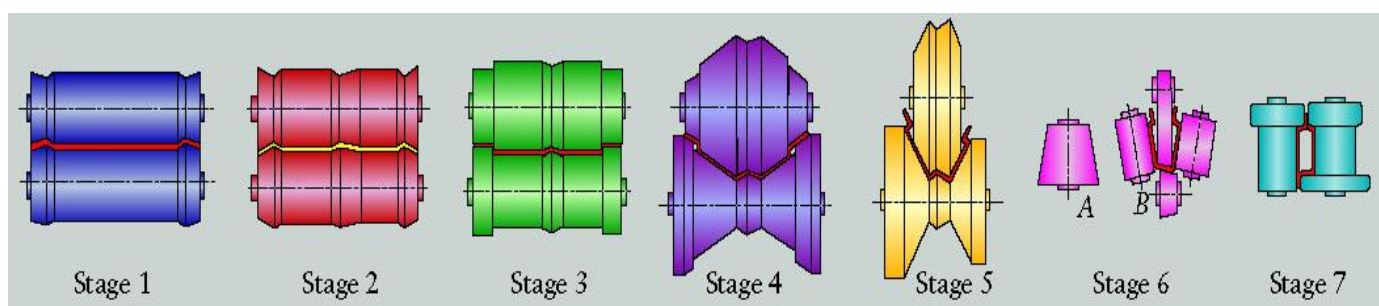
## ۳- فرایند های نورد خمکاری ( Roll-Forming Process ):

این فرایند قابلیت تولید بالایی دارد و عملاً به افزایش طول ورق می انجامد. غلطک ها از جنس چدن خاکستری با پوشش کرم یا از جنس فولاد کربنی می باشند. عملیات روغنکاری به منظور افزایش عمر غلطک ها، خنک کاری و بهبود کیفیت سطح بسیار ضروری است. ( شکل ۲-۱۹ )



شکل ۲-۱۹ . فرایند های خمکاری به وسیله نورد.

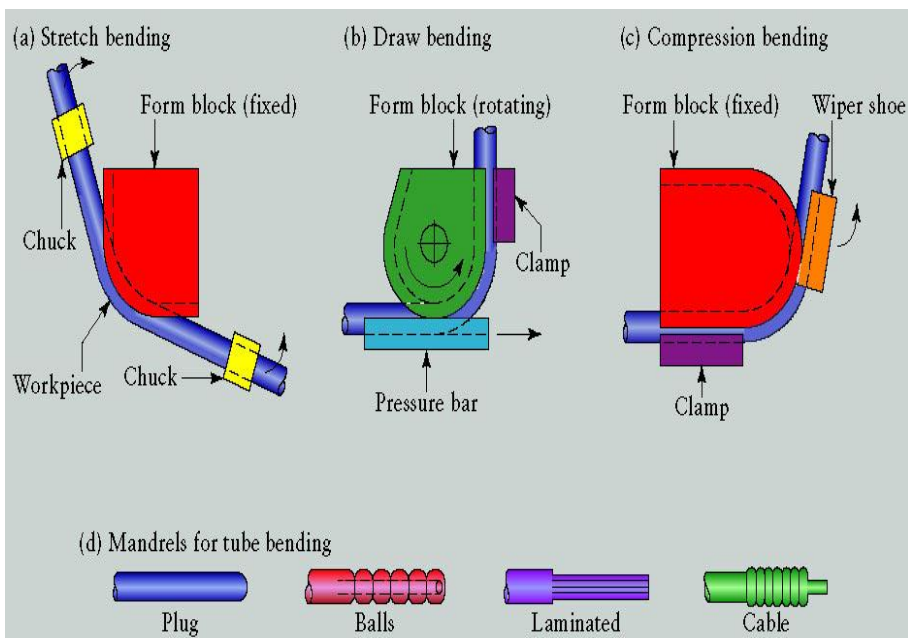
شکل ۲-۲۰ مراحل شکل دهی قاب فلزی یک درب اتاق بوسیله عملیات های نورد خمکاری را ارائه می کند. در مرحله ۶ غلطک ها ممکن است چیدمانی به صورت A یا B را داشته باشند.



شکل ۲-۲۰ . مراحل شکل دهی قاب یک درب اتاق به کمک فرایند های نورد خمکاری

#### ۴- خمکاری لوله ها (Bending of Tubes):

شکل ۲-۲۱ طرح شماتیک فرایندهای خمکاری لوله ها را نمایش می دهد. به منظور جلوگیری از پیچش و تا خوردگی، درون میله ها از مواد خاصی نظیر ماسه و یا سنبه های انعطاف پذیر استفاده می شود.

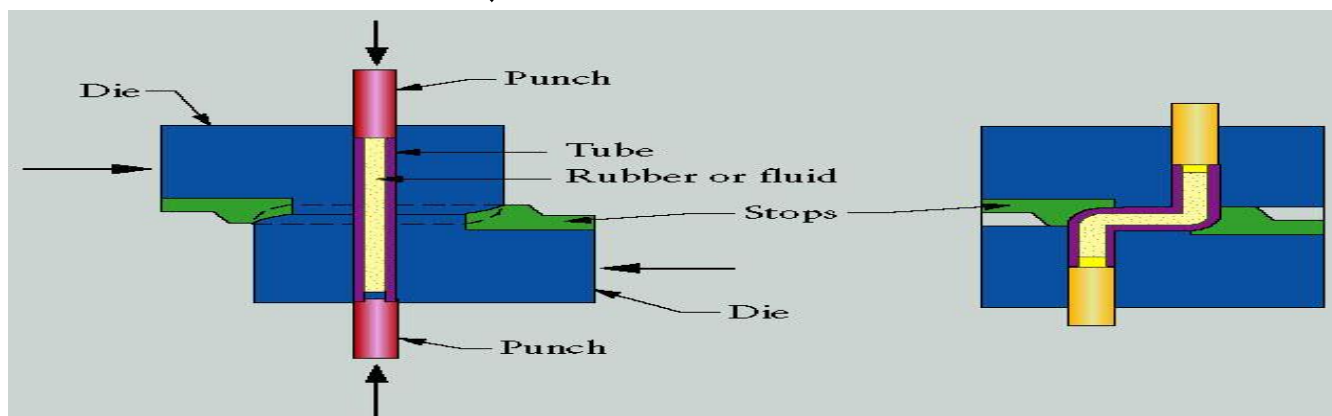


شکل ۲-۲۱. (a) خمکاری کششی (b) خمکاری تحت کشش (c) خمکاری تحت فشار (d) چند نمونه سنبه برای خمکاری لوله ها.

#### ۵- شکل دهی لوله ها (Tube Forming):

لوله های ضخیم تمایل کمتری به پیچش و تا خوردگی دارند از این رو اساساً نیازی به تدابیری مثل پر کردن آنها با ماسه نمی باشد. در این حالت به منظور حصول گوشه های تیز بدون ایجاد ترک از نیروها و تنش های فشاری استفاده می شود. تنش

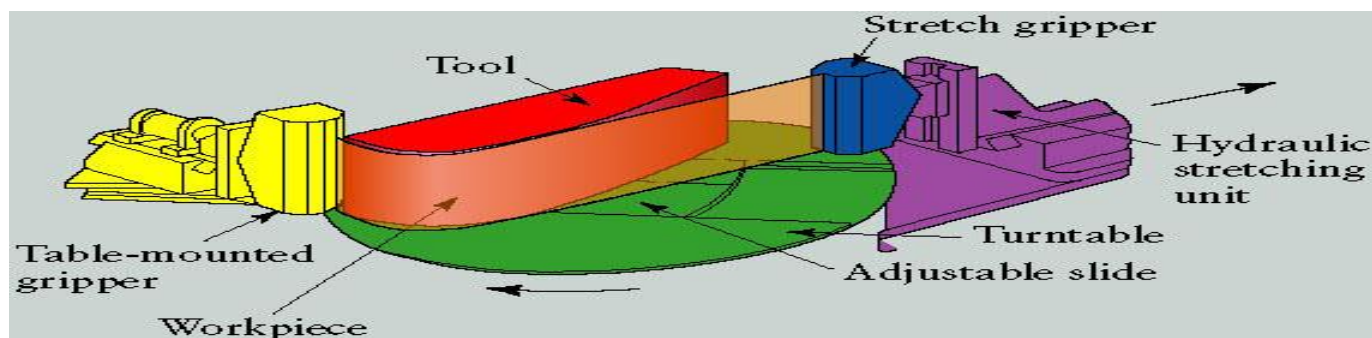
های فشاری در فرایند های شکل دهی بسیار مفید هستند زیرا شکست را به تاخیر می اندازند. از آنجا که در خمکاری لوله هالایه های بیرونی تحت کشش هستند ، اعمال فشار به تعدیل تنش های کششی منجر می شود. به منظور جلوگیری از تخریب لوله در طول فرایند شکل دهی معمولا داخل لوله را با سیال یا لاستیک پر می کنند. (شکل ۲-۲۲)



شکل ۲-۲۲. شکل دهی لوله ها

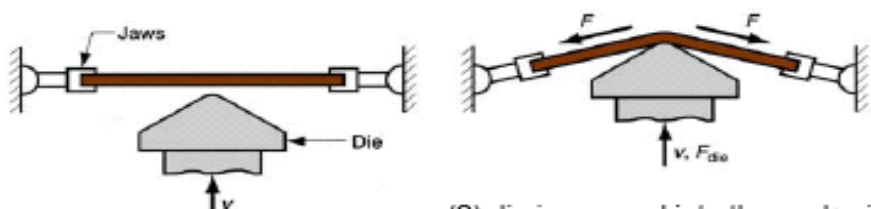
### ۷- فرایند های شکل دهی کششی (Stretch Forming) Process:

در این فرایند مطابق شکل ۲-۲۳ ورق فلزی از دوانتها گیره بندی شده و سپس در یک قالب متحرک کشیده می شود. به منظور جلوگیری از پارگی، فرایند کشش کاملا کنترل شده خواهد بود. قالب ممکن است از جنس الیاژهای مس یا فولاد یا حتی پلاستیک فشرده باشد. بدنه الومینیومی هواپیما را می توان با چنین روشی ساخت.



شکل ۲-۲۳. طرح شماتیک فرایندهای شکل دهی کششی.

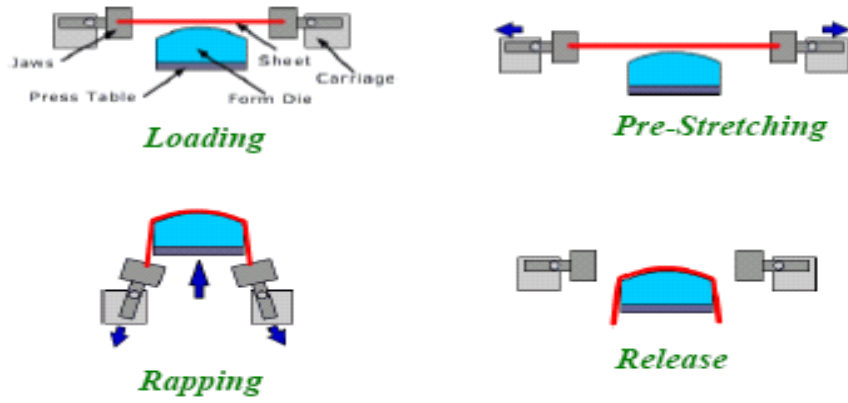
شکل ۲-۲۴ نیروهای وارد بر ورق را در این فرایند به تصویر می کشد.



شکل ۲-۲۴. شماتیک نیروهای وارد بر ورق

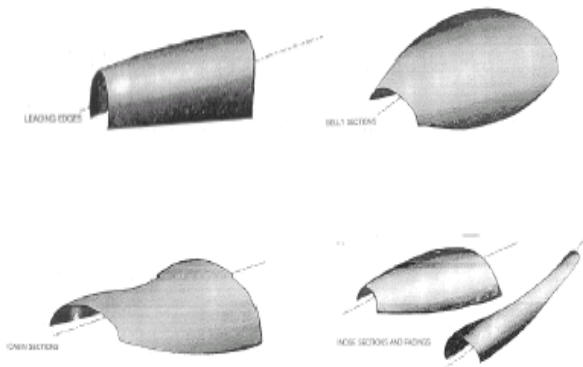
ترتیب ومراحل عمومی شکل دهی کششی در شکل ۲-۲۵ ارائه شده است.





شکل ۲-۲۵ . مراحل شکل دهی کششی.

نمونه ایی از طرح واقعی این فرایند در شکل ۲-۲۶ و همچنین برخی قطعات قابل تولید در شکل ۲-۲۷ ارائه شده اند.



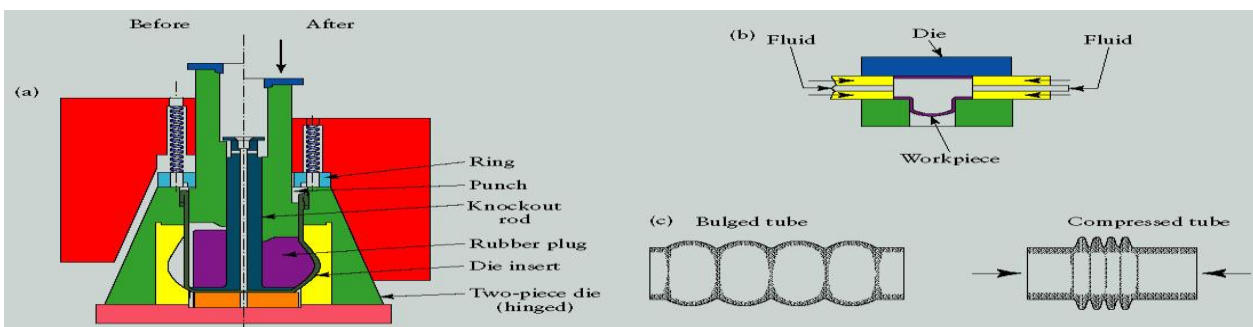
شکل ۲-۲۶ . فرایند شکل دهی کششی.



شکل ۲-۲۷ . محصولات فرایند شکل دهی کششی.

### ۸- برآمده کردن مقاطع مدور ( Bulging Of A Tubular Part ):

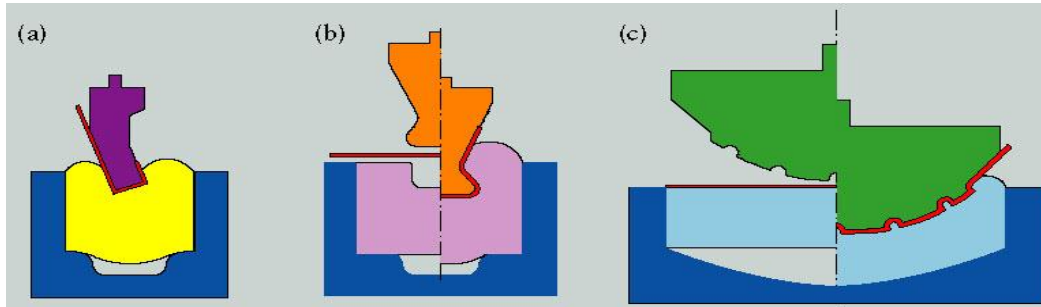
شکل a- ۲-۲۸ طرح شماتیک فرایند برآمده کردن لوله ها را ارائه میکند. مطابق شکل با پیشروی سنبه و با استفاده از توپی های لاستیکی وانعطاف پذیر، فرایند شکل دهی انجام می شود. برای جلوگیری از تخریب جدار داخلی لوله می توان درون آن یک میله توپر قرار داد. برگشت سنبه با کمک فنر انجام می شود. کوزه های اب می توانند با این روش ساخته شوند. شکل b- ۲-۲۸ روش تولید اب بندهای لوله کشی از طریق افزایش ابعاد بلنکهای مدور در نتیجه اعمال فشار داخلی به آنها را نمایش می دهد. در شکل c- ۲-۲۸ نمونه هایی از برآمده سازی میله ها ارائه شده است.



شکل ۲-۲۸ . برآمده کردن میله ها و مقاطع مدور.

۹- شکل دهی بوسیله بالشتک انعطاف پذیر (Forming with a Flexible Pad):

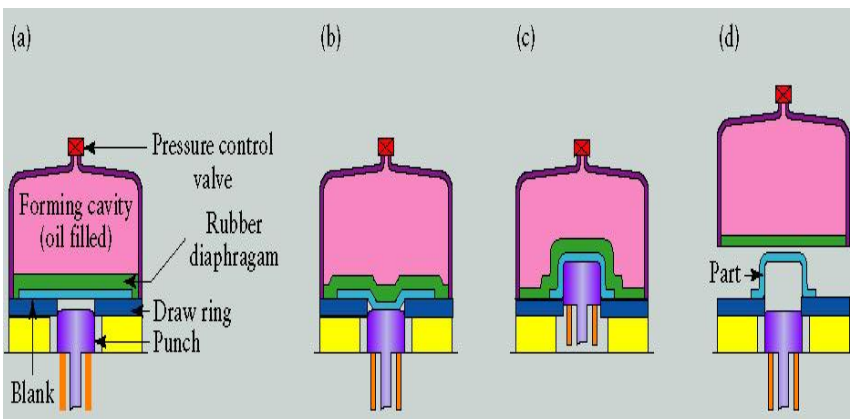
این روش که به شکل دهی با قالب انعطاف پذیر (flexible die forming) نیز معروف است یک بالشتک (دیافراگم) پلاستیکی و یک سنبه را به منظور ایجاد شکل مطلوب به کار می‌گیرد. در واقع در این روش ابزار از دو قسمت، یک سنبه سخت برای اعمال فشار و تکمیل فرایند شکل دهی و یک بالشتک نرم به منظور جلوگیری از تخریب و کمک به سیلان مطلوب ماده تشکیل می‌شود. به دیگر بیان هدف اصلی از به کارگیری بالشتک پلاستیکی کمک به توزیع یکنواخت فشار سنبه می‌باشد. این روش مخصوصاً در تولید قطعات با اشکال پیچیده کاربرد دارد. (شکل ۲-۲۹)



شکل ۲-۲۹. نمونه هایی از شکل دهی در قالب انعطاف پذیر.

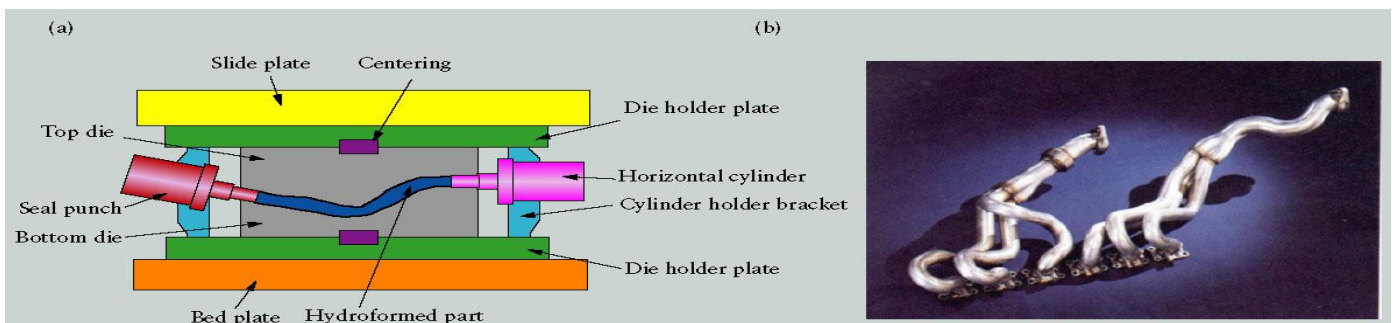
۱۰- فرایندهای هیدروفرمینگ (Hydroform Process):

این روش تحت عنوان شکل دهی به کمک سیال (forming fluid) نیز مشهور است. در این فرایند مطابق شکل ۲-۳۰ ابتدا پولک (بلانک) مورد نظردرون محفظه قالب موقعیت دهی شده، سپس محفظه شکل دهی توسط سیال هیدرولیک پر می‌شود. نقش دیافراگم لاستیکی در این فرایند بسیار تکنیکی است زیرا فصل مشترک سطح بالایی قطعه و سیال هیدرولیک است. با بالا رفتن و پیشروی سنبه در حین عمل شکل دهی، سیال توسط دیافراگم تحت فشار قرار گرفته و فشار آن افزایش می‌یابد. فشار سیال درون محفظه شکل دهی میتواند به ۱۰۳ مگا پاسکال نیز برسد. با رسیدن فشار سیال به مقداری معین و از پیش تعیین شده، فرایند شکل دهی تکمیل گشته و عمل تخلیه هیدرولیکی انجام می‌گیرد.



شکل ۲-۳۰. طرح شماتیک فرایند هیدروفرمینگ. (a) آماده سازی (b) آغاز شکل دهی، پیشروی سنبه (c) پایان شکل دهی (d) خارج سازی قطعه

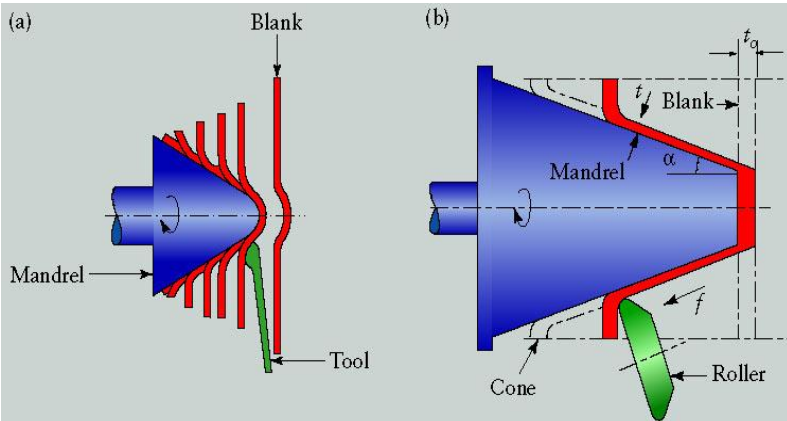
شکل ۲-۳۱- a طرح شماتیک فرایند هیدروفرمینگ لوله را ارائه می‌کند. در قسمت b میتوان تصویر واقعی یک لوله هیدروفرم شده را مشاهده نمود. لوله آگزوز اتومبیل ها و قابهای دوچرخه نمونه هایی از محصولات این فرایند هستند.



شکل ۲-۳۱. طرح شماتیک فرایند هیدروفرمینگ

۱۱- فرایندهای شکل دهی ( منگنه کاری ) چرخشی ( Spinning Processes ):

منگنه کاری چرخشی به دسته ایی از فرایندهای شکل دهی فلزی گفته می شود که در آن قطعات متقارن محوری توسط یک

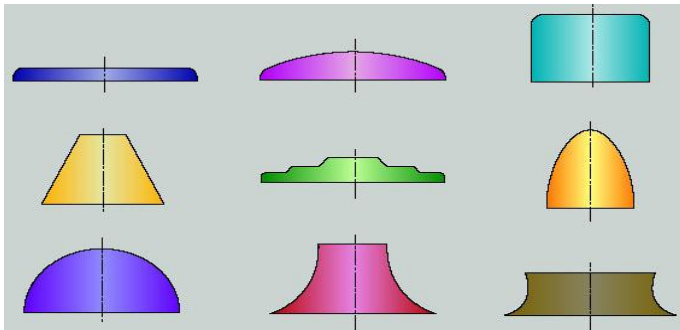


سنبه دوار- که دارای سرعت چرخشی زیادی است- و یک ابزار مدور یا غلطک شکل داده می شوند. به دیگر بیان شکل دادن چرخشی عبارت است از شکل دهی قطعاتی که روی یک سنبه یا شاه میله همراه با یک ابزار یا غلطک دارای تقارن چرخشی هستند. مطابق شکل ۳۲-۲ این فرایند به دو صورت سنتی و برشی انجام می شود.

شکل ۳۲-۲. شماتیک فرایند منگنه کاری چرخشی. (a) روش سنتی (b) روش برشی (غلطک با سرعت  $f$  میلیمتر بر دور پیشروی می کند).

شکل دادن چرخشی سنتی (مرسوم) موجب افزایش در ضخامت دیواره های قطعه نمی گردد. بسیاری از قطعاتی که با شکل دادن چرخشی سنتی تولید می شوند ممکن است با فرایند کشش نیز قابل ساخت باشند. در این میان معمولا انتخاب روش مناسب تر بر مبنای پارامترهایی نظیر خواص ماده، هزینه های ابزار، کمیت تولید و کیفیت سطح می باشد. در شکل دادن برشی، ورق شدیداً فشرده میشود به گونه ایی که میزان کاهش ضخامت در آن ممکن است تا ۹۰ درصد نیز برسد. این کاهش ضخامت نوعی فرایند کار سرد را به ورق تحمیل می کند که در نتیجه آن خواص مکانیکی ماده بهبود می یابد. بزرگترین امتیاز این فرایند آن است

که قطعات بزرگ و سنگین به شرط اینکه تقارن محوری داشته باشند در یک زمان کوتاه، با اتلاف فلز ناچیز و خواص مکانیکی بهتر تولید می شوند.



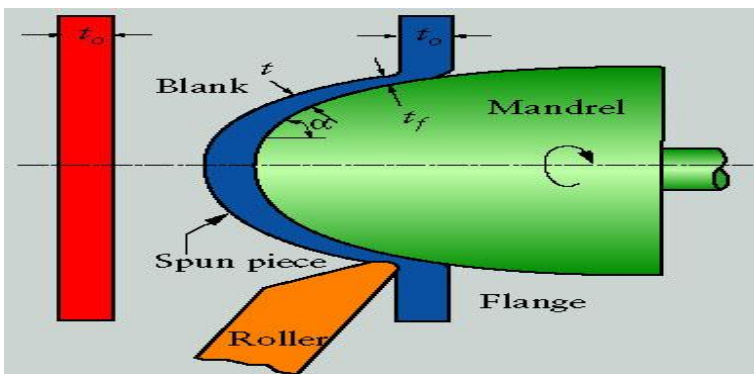
شکل ۳۳-۲ برخی هندسه های قابل تولید در این فرایند را ارائه می کند. اساساً قسمتهای دایره ایی در سطوح خارجی قطعات حکایت از منگنه کاری چرخشی دارند. برای نمونه می توان به

لوازم الومینیومی اسپنزاخانه اشاره نمود.

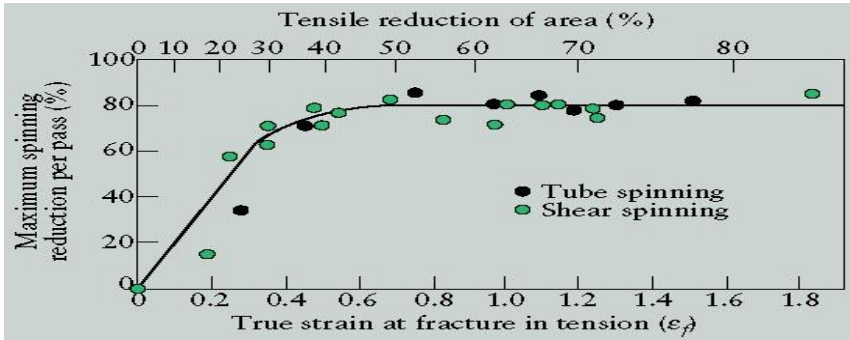
شکل ۳۳-۲. شماتیک برخی هندسه های قابل تولید با فرایند منگنه کاری چرخشی.

شکل ۳۴-۲ به قابلیت منگنه کاری برشی می پردازد. با افزایش پیشروی غلطک، ضخامت ورق کاهش می یابد. به حداکثر کاهش ضخامت در نقطه شکست، بیشترین کاهش قابلیت منگنه کاری در هر پاس فرایند شکل دهی گویند.

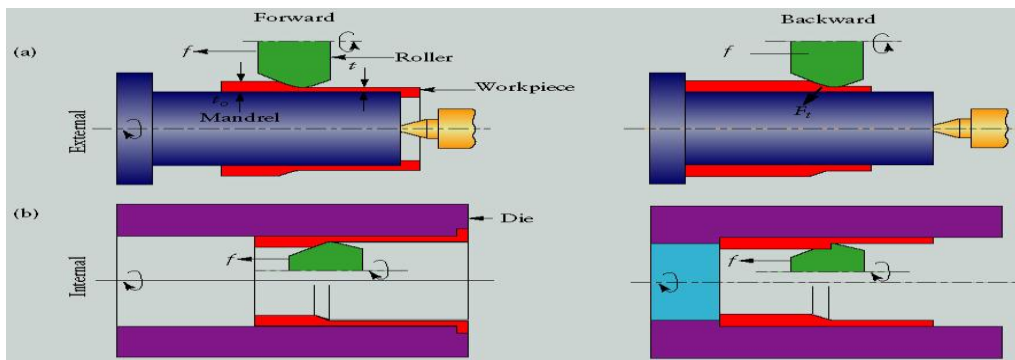
شکل ۳۴-۲. آزمایش تعیین قابلیت منگنه کاری.



ازمایشهای تجربی رابطه میان بیشترین کاهش قابلیت منگنه کاری در هر پاس و میزان کاهش سطح مقطع ماده اولیه در آزمایش کشش ساده را مشخص نموده اند. مطابق شکل ۲-۳۶ با کاهش ۵۰ درصدی سطح مقطع در آزمایش کشش ساده، افزایش چکش خواری ماده به افزایش قابلیت منگنه کاری آن منجر نمی شود.



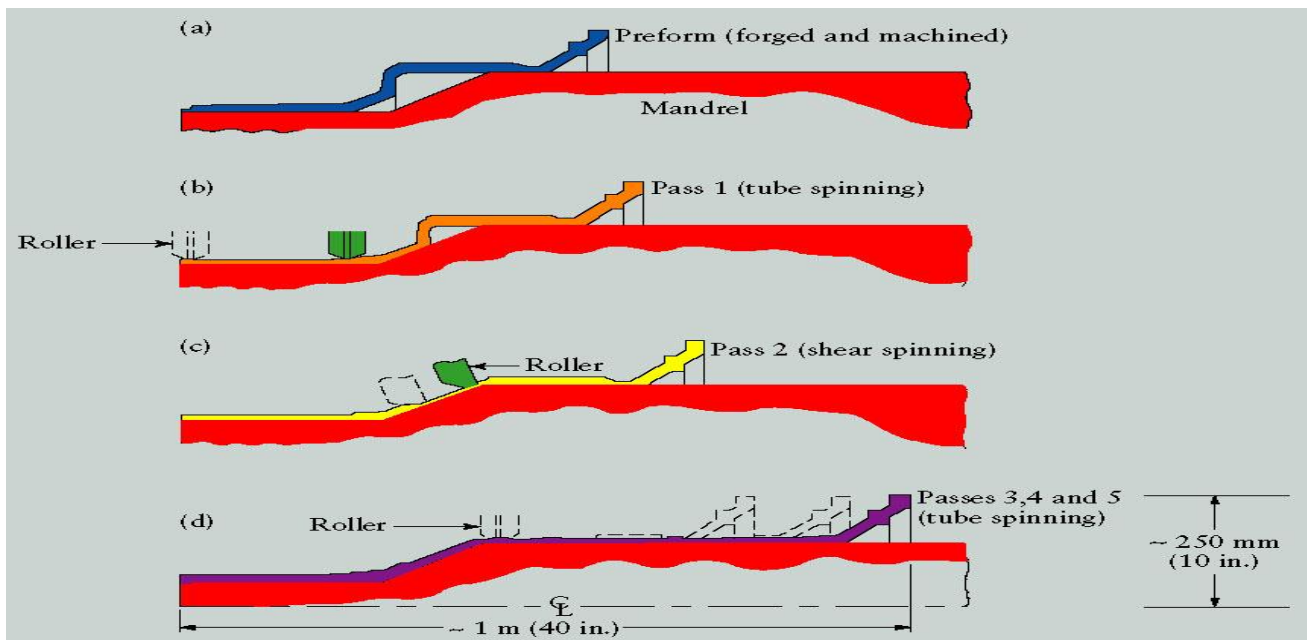
شکل ۲-۳۵. رابطه تجربی میان بیشترین کاهش قابلیت منگنه کاری در هر پاس و میزان کاهش سطح مقطع ماده.



طرح شماتیک منگنه کاری لوله ها در شکل ۲-۳۷ ارائه شده است. مطابق شکل این فرایند به دو صورت پیشرو و پس رو انجام می گیرد.

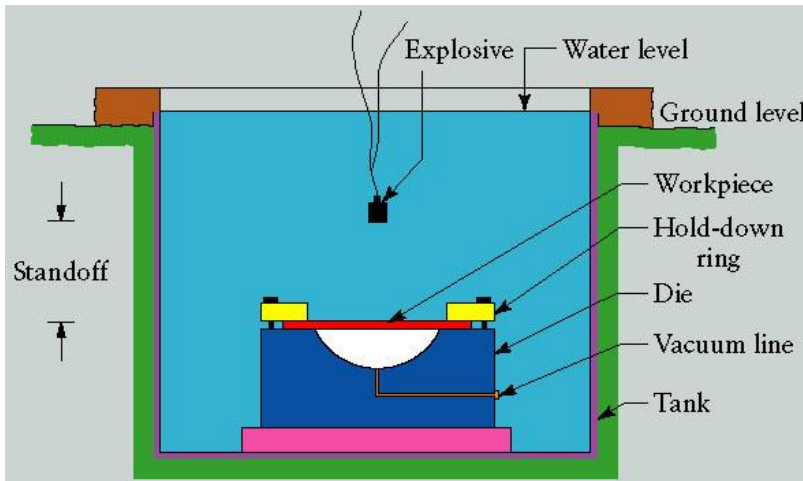
شکل ۲-۳۶. منگنه کاری چرخشی لوله ها. (a) منگنه کاری خارجی (پیشرو و پس رو) (b) منگنه کاری داخلی (پیشرو و پس رو)

مراحل منگنه کاری لوله ای و برشی شافت کمپرسور موتور یک هواپیمای مافوق صوت کنکورد در شکل ۲-۳۷ نشان داده شده است. انالیزهای اقتصادی تأیید می کنند تولید این قطعه با روش حاضر بهینه ترین حالت ممکن می باشد.



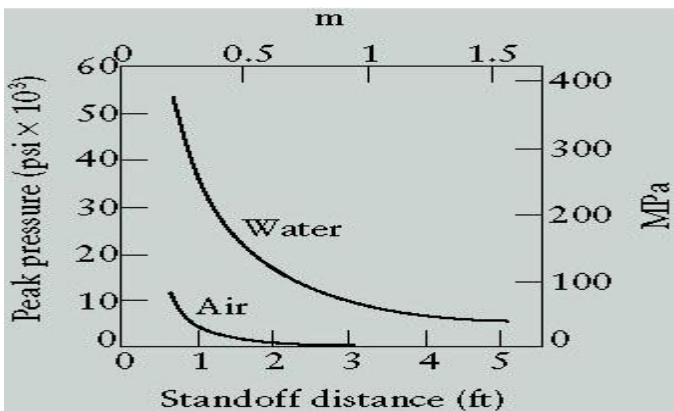
شکل ۲-۳۷. مراحل منگنه کاری شافت کمپرسور موتور هواپیمای کنکورد. (a) قطعه اولیه (اهنگری و ماشینکاری شده) منگنه کاری لوله ای (C) منگنه کاری برشی (d) منگنه کاری میله ای.

اگرچه مواد منفجره بیشتر کاربرد تخریبی دارند، با مهار انرژی حاصل از انفجار می توان فرایند شکل دهی قطعات بزرگ که امکان تولید آنها با روشهای دیگر اگر غیر ممکن نباشد دست کم بسیار پر هزینه است را به گونه موفق اجرا نمود. در شکل دهی انفجاری از انرژی ذخیره شده در مواد منفجره شیمیایی استفاده می شود. در واقع در این فرایند ماده منفجره جایگزین سنبه یا دیافراگم - که در اغلب روشهای شکل دهی وجود دارد- می گردد. موجهای ضربه ایی حاصل از انفجار در سراسر مایع منتشر می شوند و با انرژی کافی به قطعه کار ضربه وارد نموده، آنرا درون ماتریس داخلی یا مادگی می رانند. معمولا موادی نظیر cyclotrimethylene trinitramine (RDX) و trinitrotoluene (TNT) و ... به عنوان ماده منفجره مورد استفاده قرار می گیرند. انتخاب نوع ماده انفجار به ضخامت و استحکام تسلیم قطعه ایی که شکل داده می شود بستگی دارد. دو روش عمده در شکل دهی انفجاری مورد استفاده قرار می گیرند، روش غیر تماسی یا فاصله دار-stand off- و روش تماسی - contact method - . در روش تماسی ماده منفجره مستقیما در تماس با قطعه (ورق فلزی) قرار داده می شود. شدت انفجار قادر است فشاری معادل چند میلیون پاسکال بر سطح قطعه اعمال کند . یک اشکال عمده این تکنیک آن است که موج انفجار قطعه را می پیماید و بدین جهت ممکن است به پیشش، تغییر شکل و حتی شکست آن منجر شود. حال آنکه در روش غیر تماسی مطابق شکل ۲-۳۸ ماده منفجره در فاصله مشخصی نسبت به ورق فلزی قرار داده می شود. انفجار در زیر سطح آب رخ میدهد تا از یک سو صدای ناشی از انفجار تعدیل شده و از سوی دیگر انتقال بهینه انرژی به قطعه تضمین شود. به همین علت این روش به شکل دهی انفجاری در زیر



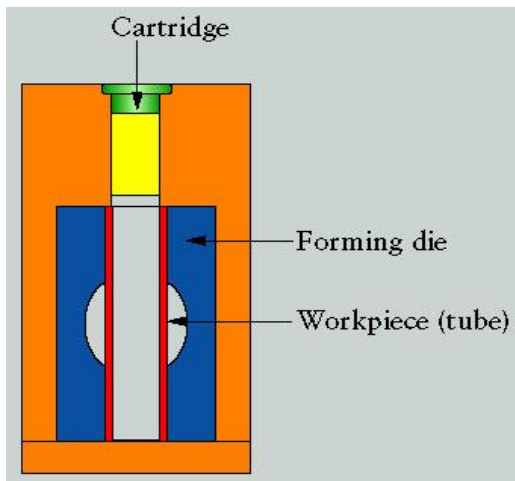
اب نیز مشهور است. با رسیدن موج انفجار، ورق فلزی نسبت به قالب تحت فشار قرار گرفته و شکل مطلوب در آن ایجاد می شود. جنس قالب در فرایندهای شکل دهی انفجاری ممکن است پلاستیک، بتون، فایبرگلاس و حتی فولاد باشد.

شکل ۲-۳۸. فرایند شکل دهی انفجاری به روش غیر تماسی.



شکل ۲-۳۹ تاثیر فاصله ماده منفجره تا قطعه و نوع سیال بر حداکثر فشار ایجاد شده بوسیله ۱.۸ کیلوگرم TNT در روش غیر تماسی را بررسی می کند. همانگونه که از شکل برمی آید بهینه ترین حالت انتقال انرژی به قطعه زمانی است که سیال واسط، چگالی بالا و تراکم پذیری کم داشته باشد. در عمل آب متداولترین سیال واسطی است که مورد استفاده قرار می گیرد.

شکل ۲-۳۹. تاثیر فاصله ماده منفجره و نوع سیال بر حداکثر فشار.



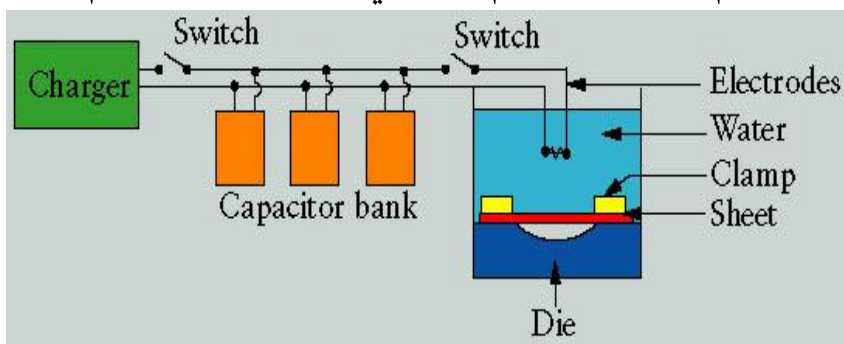
طرح شماتیک برآمده کردن انفجاری لوله ها در شکل ۴۰-۲ ارائه شده است. موج انفجار شکل قالب را به بخش خاصی از جداره لوله تحمیل می کند. در این تکنیک لوله های نازک با تolerانس بسیار بسته شکل دهی شده و برآمده می شوند.

شکل ۴۰-۲. شماتیک فرایند برآمده کردن انفجاری لوله ها

### ۱۳- فرایندهای شکل دهی الکترو هیدرولیک (Electrohydraulic Forming):

شکل دادن الکترو هیدرولیکی از بسیاری جهات شبیه به شکل دادن انفجاری است. عمده تفاوت در این روش به منبع تامین انرژی باز می گردد. در فرایند تخلیه الکترو هیدرولیکی انرژی از تخلیه یک گروه از خازنهای دارای ولتاژ زیاد به دست می آید. مطابق شکل ۴۱-۲، این فرایند بر اساس شارژ و تخلیه الکتریکی تعدادی خازن موازی انجام می شود. با برقرار شدن اتصال الکترودها، انرژی ذخیره شده در مجموعه خازنها به سیال واسط - معمولاً آب - تخلیه شده و در نتیجه آب یونیزه می گردد. انبساط مایع یونیزه شده یک ضربه فشاری قوی ایجاد میکند که بطور شعاعی به طرف خارج حرکت کرده، قطعه کار را به شکل مطلوب در می آورد. در برخی موارد دو الکتروود توسط یک سیم تحت کشش به هم متصل می شوند. در نتیجه با انجام عمل

تخلیه، فلز تبخیر شده و با انبساط بخار آن فشار مورد نیاز شکل دهی تامین می گردد.

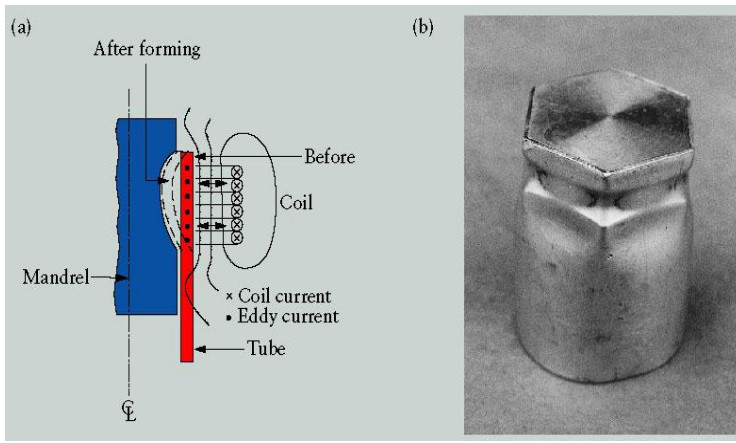


شکل ۴۱-۲. طرح شماتیک فرایندهای شکل دهی الکترو هیدرولیک.

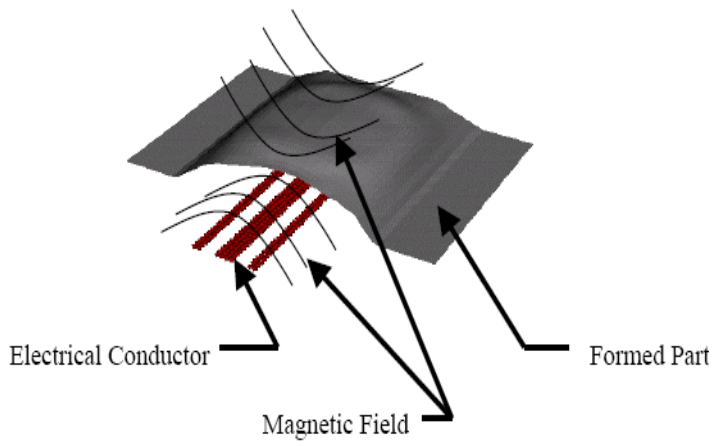
فرایند شکل دهی الکترو هیدرولیک یا EHF یک روش شکل دهی بسیار سریع محسوب می شود که مخصوصاً برای ایجاد شکل مطلوب در تعداد محدودی ورق های فلزی کاربرد دارد. از مزایای این تکنیک می توان به تکنولوژی کم هزینه ابزار، افزایش شکل پذیری ماده و حداقل برگشت فزنی اشاره نمود. این روش در سالهای اخیر به عنوان یک الترناتیو در نمونه سازی سریع ورق های فلزی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱۴- فرایندهای شکل دهی پالس مغناطیسی (Magnetic-Pulse-Forming Process)

این تکنیک قدمتی پنجاه ساله دارد و می توان آنرا مهمترین روش در فرایندهای شکل دهی با نرخ انرژی زیاد (HERF) به شمار آورد. در این فرایندها انرژی الکتریکی با استفاده از یک میدان مغناطیسی به انرژی مکانیکی تبدیل می شود. با عبور جریان الکتریسیته از یک سیم رسانا، میدان مغناطیسی در اطراف آن ایجاد می گردد. ایجاد ناگهانی این میدان به پدید آمدن جریان گردابی - در هر رسانایی که به اندازه کافی به سیم حامل جریان نزدیک باشد - منجر می شود که در جهت مخالف شارش می یابد. این جریان گردابی خاصیت مغناطیسی خود را تقویت نموده و نیروی دافعه ایی به وجود می آورد که از آن برای ایجاد شکل دلخواه در ورق های فلزی استفاده می شود. طرح شماتیک این فرایند در شکل ۴۲-۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۴۲. (a) طرح شماتیک فرایندهای شکل دهی پالس مغناطیسی (b) قطعه ایی که با این روش شکل داده شده است.



امکان کنترل میدان مغناطیسی با دقت مناسب، قابلیت تکرار بسیار بالا و ارزان بودن قالب شکل دهی بواسطه یک تکه بودن آن از یک سو و نیز انجام فرایند شکل دهی به صورت غیر تماسی از سوی دیگر، مهمترین امتیازات این تکنیک هستند. مطابق شکل ۲-۴۳ میدان مغناطیسی بین سیم حامل جریان و قطعه مورد نظر نوعی فشار مغناطیسی ایجاد می کند که به تکمیل فرایند شکل دهی می انجامد.

شکل ۲-۴۳. غیر تماسی بودن فرایندهای شکل دهی پالس مغناطیسی از مهمترین امتیازات این تکنیک است.

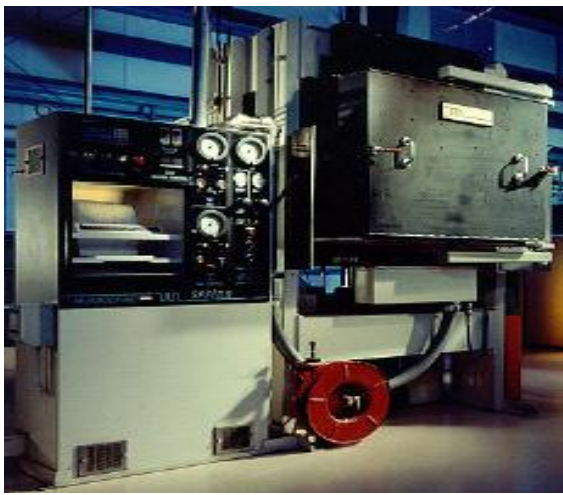
### ۱۵- فرایندهای شکل دهی ابر مومسان ( Superplastic Forming ):

در موادی با ساختار مافوق ریز دانه، تحت نرخ کرنش ناچیز ( ۰.۰۱ بر ثانیه یا کمتر) و در دماهایی بالاتر از ۰.۴ نقطه ذوب، تغییر طولهای فوق العاده زیاد (تا چند صد برابر) و تنشهای سیلان بسیار کم قابل دستیابی است. برای توصیف این آثار از اصطلاح ابر مومسانی استفاده می شود. در واقع مقصود از قابلیت فوق پلاستیک ( ابر مومسانی) آن است که در سرعت های کششی بالا و معینی، بسیاری از فلزات دارای درجه غیر عادی و بسیار بالایی از انعطاف پذیری هستند. از این رو این فلزات برای شکل دادن تحت آن سرعت ویژه تغییر شکل نسبت به هر سرعت دیگر با اشکال کمتری مواجه می شوند. با توجه به اینکه حداکثر افزایش طول در بیشتر فلزات حدود ۸ تا ۱۲ درصد میباشد، مروری بر اعداد و ارقام ارائه شده در شکل ۲-۴۴ قابلیت های منحصر به فرد این تکنیک را بیشتر نمایان می سازد.



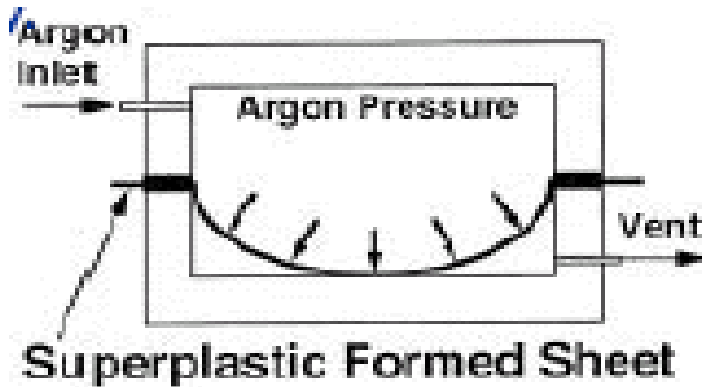
شکل ۲-۴۴. در فرایندهای شکل دهی ابر مومسان امکان افزایش طولهای شگفت اورمیسر است.

لزوم انجام شکل دهی ابر مومسان در دماهای بالا، کاهش تنش تسلیم ماده با افزایش دما است. بدین منظوری ابتدا ورق فلزی در یک قالب شکل دهی ابر مومسان یا قالب SPF (super plastic forming) موقعیت دهی می شود. نمونه ایی از این قالب در شکل ۲-۴۵ ارائه شده است.



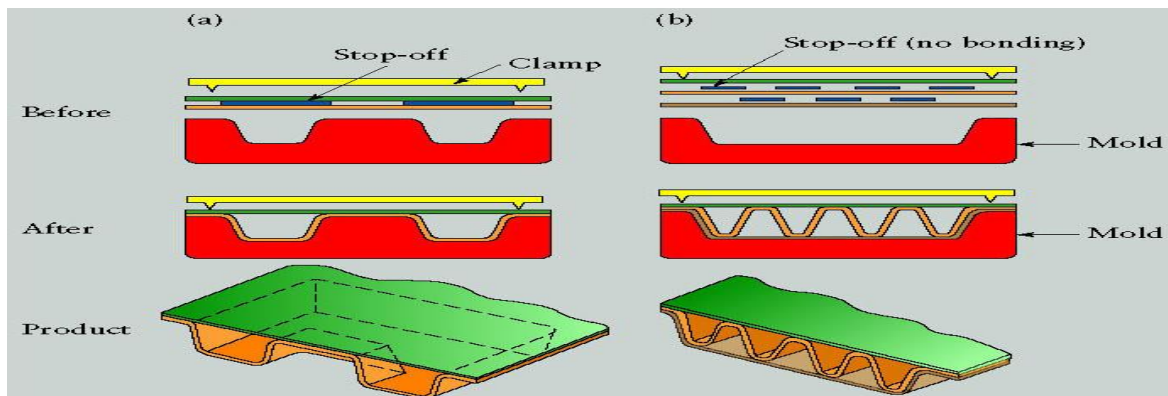
شکل ۲-۴۵. نمونه ایی از یک قالب شکل دهی ابر مومسان

قالبهای شکل دهی بر اساس هندسه قطعه نهایی ممکن است شکل ساده یا پیچیده داشته باشند. پس از موقعیت دهی، ابزار و ورق فلزی گرم می شوند و در نهایت از فشار یک گاز به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک و پرشدن حفره های قالب استفاده می گردد. (شکل ۲-۴۶)



شکل ۲-۴۶. استفاده از فشار گاز به منظور شکل دهی ابرمومسان

طرح شماتیک این فرایند و نمونه هایی از قطعات قابل تولید بوسیله آن در شکل ۲-۴۷ نمایش داده شده است. قطعات تولید شده نسبت سفتی به وزن بالا دارند و نزدیک به شکل نهایی هستند.



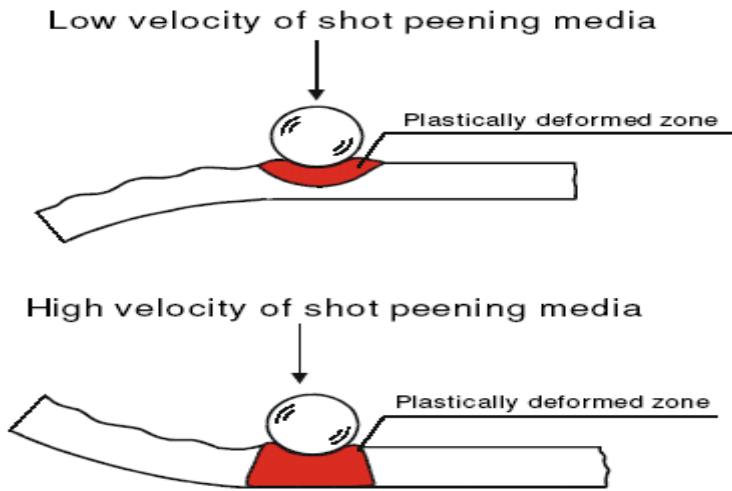
شکل ۲-۴۷. طرح شماتیک شکل دهی ابر مومسان ورقهای فلزی.

## ۱۶- فرایندهای شکل دهی کوبشی (Peen Forming):

این فرایند برای ایجاد کانتورهای کم عمق در ورقهای فلزی بزرگ و همچنین به منظور تخت نمودن قطعات کاربرد دارد. از مشخصه های بارز این تکنیک، شکل دهی ورق در محدوده الاستیک از طریق ایجاد تغییر شکلهای موضعی پلاستیک است.

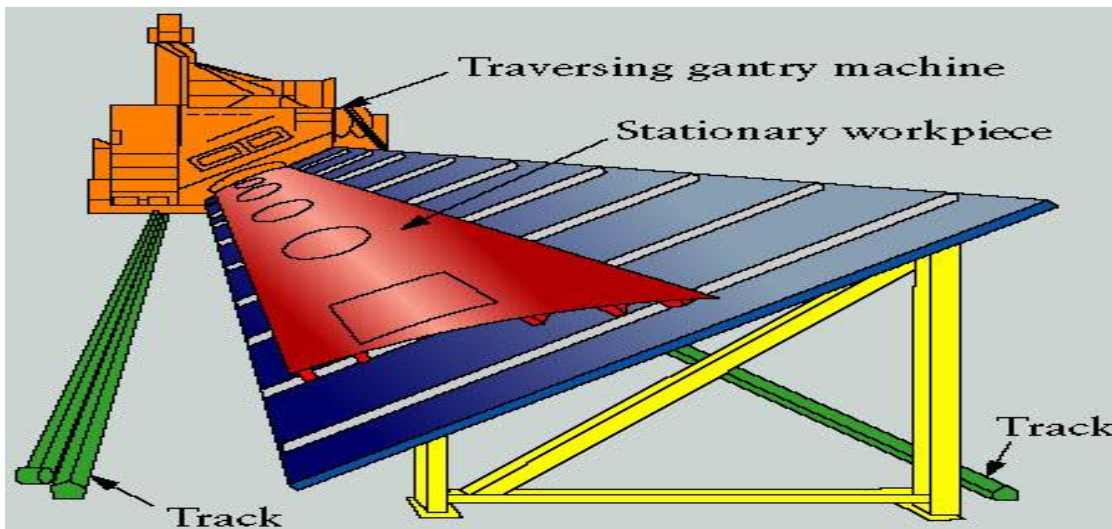


مطابق شکل ۲-۴۸ گوی های سخت با انرژی های مختلف (بسته به جرم و سرعت آنها) به سطح ورق برخورد نموده و فرایند شکل دهی تکمیل می گردد.



شکل ۲-۴۸. طرح شماتیک فرایندهای شکل دهی کوبشی.

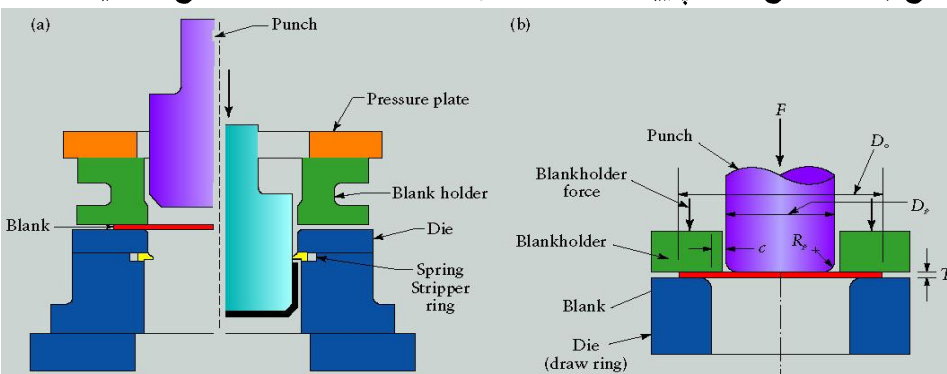
از مزایای این فرایند می توان به عدم وجود ابزار شکل دهی در آن، عدم نیاز به عملیات حرارتی و عدم ایجاد تنشهای کششی پسماند سطحی اشاره نمود. گرچه این فرایند دارای انعطاف پذیری ویژه ای است اما هزینه تجهیزات آن می تواند بالا باشد. شکل ۲-۴۹ یک ورق فلزی بزرگ بوسیله ماشین شکل دهی کوبشی را نشان می دهد. همانگونه که از شکل نمایان است ورق ثابت بوده، ماشین شکل دهی در طول آن حرکت نموده و شکل مورد نظر را ایجاد می نماید. بدنه هواپیما از متداولترین قطعاتی است که با این روش تولید می گردد.



شکل ۲-۴۹. شکل دهی یک ورق فلزی بزرگ بوسیله ماشین شکل دهی کوبشی.

### ۱۷- فرایندهای کشش عمیق (Deep-drawing Process):

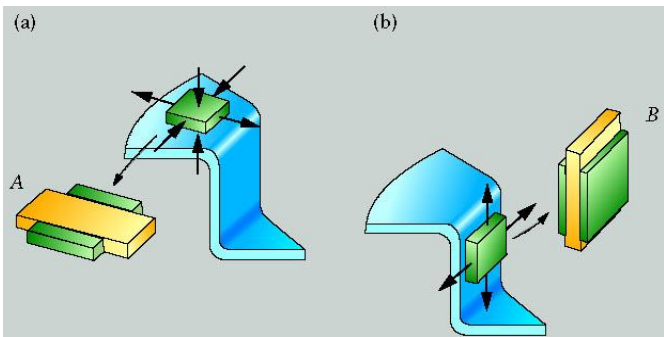
شکل دهی یک استوانه لوله ای شکل ته بسته از یک پولک (بلانک) مدور و یا قطعاتی مثل منشور یا جعبه از بلانکهای مناسب را کشش عمیق می گویند. این فرایند نخستین مرحله در تولید قوطیهای آلومینیومی انواع نوشیدنیها می باشد. از مزایای کشش عمیق می توان به صافی سطح بالا و سطح تنش پایین آن اشاره نمود. در شکل ۲-۵۰-a طرح شماتیک و در



شکل ۲-۵۰-b متغیرهای مهم این فرایند ارائه شده اند.

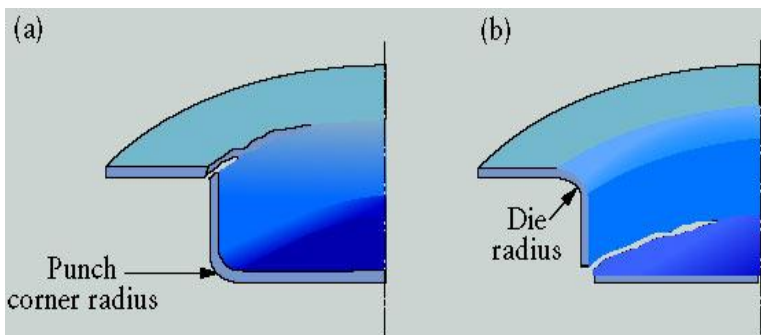
شکل ۲-۵۰. (a) طرح شماتیک فرایند کشش عمیق (b) متغیرهای مهم فرایند

در شکل دهی این قطعات، بخشی از بلانک که در زیر سنبه است تغییر شکل محسوسی نخواهد داشت و قسمت عمده تغییر شکل در دیواره استوانه (ظرف صنعتی) رخ می دهد. شکل a-۵۱-۲ وضعیت تنش در ناحیه فلانجی شکل زیر ورق گیر را نشان می دهد. با حرکت سنبه، سیلان ماده به درون حفره ماتریس ایجاد شده و از این رو در این ناحیه تنش های کششی شعاعی و تنش های فشاری محیطی وجود دارد. شکل b-۵۱-۲ به ناحیه دیواره ظرف می پردازد، ناحیه ای که در آن ورق تحت کشش دو محوره (خالص) قرار می گیرد.



شکل ۲-۵۱. (a) وضعیت تنش در ناحیه فلانجی شکل (b) وضعیت تنش در دیواره ظرف.

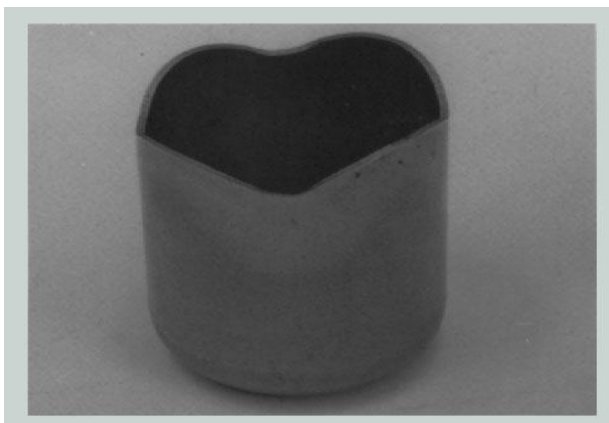
از مباحث مهم در کشش عمیق بحث نسبت کشش یا DR (Drawing Ratio) است که به صورت نسبت قطر بلانک اولیه به قطر ظرف (محصول کشش عمیق) تعریف شده است. بیشترین مقدار نسبت کشش را حد نسبت کشش یا L.D.R) (Limiting Drawing Ratio) می گویند که مقداران برای فلزات معمولی تقریباً ۲ بوده اما در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی تا ۳ نیز گزارش شده است. عامل محدود کننده نسبت کشش در واقع پارگی ورق در ناحیه دیواره ظرف است. عواملی نظیر شعاع لبه سنبه، شعاع لبه ماتریس، نیروی ورق گیر، روانکار و ضخامت ورق بر مقدار نسبت کشش تاثیر دارند اما این نسبت بیش از هر چیز به جنس ماده وابسته است. شکل ۲-۵۱ تاثیر شعاع لبه سنبه و شعاع لبه ماتریس بر ایجاد ترک و نهایتاً وقوع شکست در یک محصول کشش عمیق را بررسی می کند.



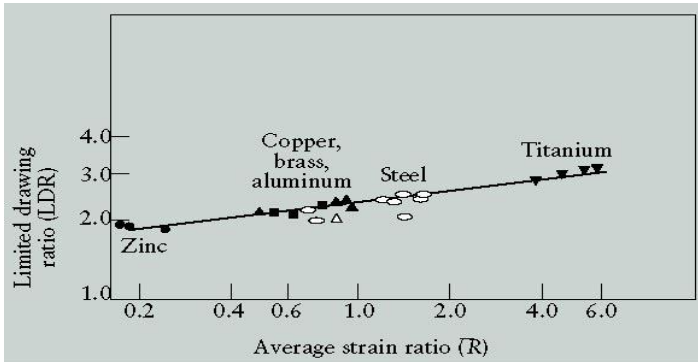
مقدار متوسط شعاع لبه ماتریس ۵ تا ۱۰ برابر ضخامت ورق در نظر گرفته می شود. شکل a-۵۱-۲ به حالتی می پردازد که شعاع لبه ماتریس کمتر از مقدار پیشنهادی انتخاب شده است. ترک نشان داده شده در شکل b-۵۲-۲ می تواند در نتیجه کوچک بودن بیش از حد شعاع لبه سنبه ایجاد شود.

شکل ۲-۵۲. تاثیر شعاع لبه سنبه و شعاع لبه ماتریس بر ایجاد ترک در کشش عمیق.

ضریب کار سختی ماده و ناهمسانگردی دو عامل مهم و موثر بر حد نسبت کشش می باشند. ناهمسانگردی به دو صورت در ورق مشاهده می گردد، یکی ناهمسانگردی صفحه ای است که به تغییر در خواص ورق در صفحه آن گفته می شود و البته تاثیری در حد نسبت کشش نداشته، صرفاً موجب کنگره ای (گوشواره ای) شدن ورق در کشش عمیق می شود. شکل ۲-۵۳ کنگره ای شدن یک محصول کشش عمیق را نشان می دهد.



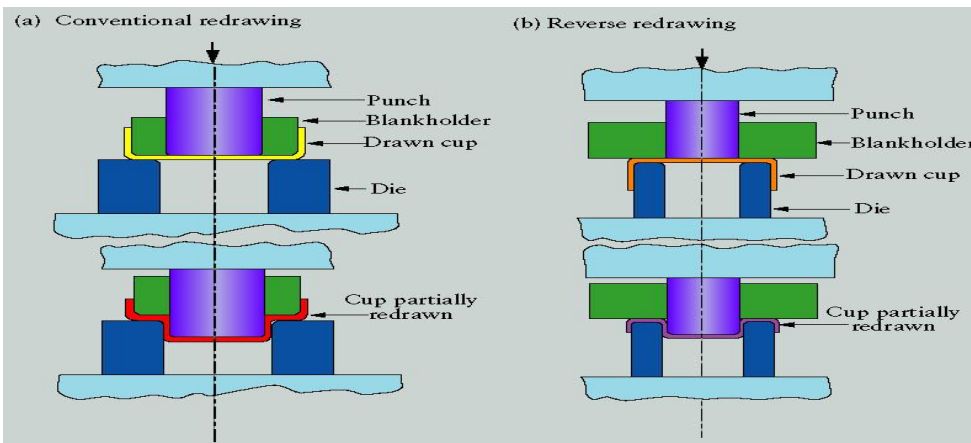
شکل ۲-۵۳ کنگره ایی شدن یک ظرف صنعتی در نتیجه ناهمسانگردی صفحه ایی ورق.



نوع دیگر ناهمسانگردی، ناهمسانگردی عمودی نام دارد که عبارت است از تغییر در مقاومت ورق در راستای ضخامت آن. هر چه مقدار ناهمسانگردی عمودی بیشتر باشد حد نسبت کشش افزایش خواهد یافت. در شکل ۲-۵۴ تا ۲ تا نثر ناهمسانگردی عمودی ورق برحد نسبت کشش بررسی شده است.

شکل ۲-۵۴. تا نثر ناهمسانگردی ورق برحد نسبت کشش برای چند جنس مختلف ورق فلزی.

چنانچه به نسبتهای کشش بیشتری نیاز باشد از فرایندهای کشش مجدد (Redrawing Operations) استفاده می شود. کشش مجدد به دو صورت مستقیم (سنتی) و معکوس وجود دارد. در این تکنیک با توجه به اینکه ورق در یک مرحله تحت تنش قرار گرفته است ناگزیر مقداری افت در حد نسبت کشش وجود خواهد داشت که معمولاً از طریق عملیات حرارتی مناسب جبران



می شود. شکل ۲-۵۵-a طرح شماتیک

کشش مجدد مستقیم و شکل ۲-۵۵-b

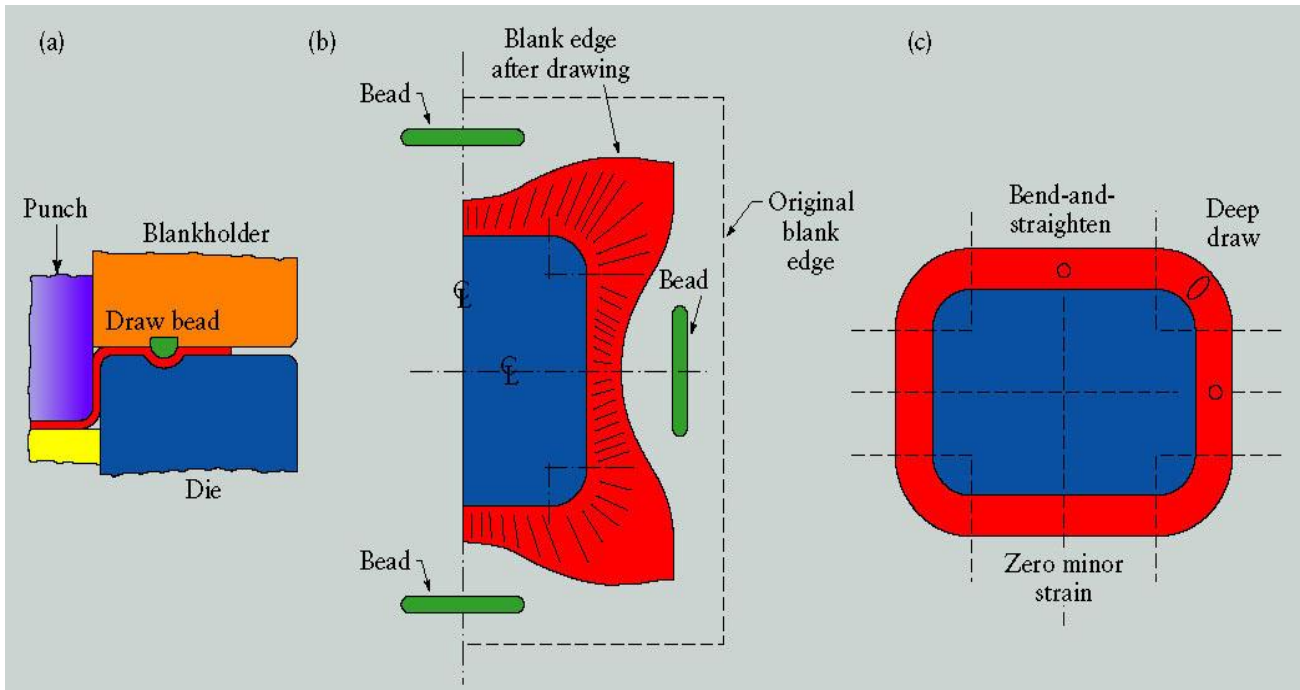
کشش مجدد معکوس را ارائه می کند.

شکل ۲-۵۵. طرح شماتیک فرایندهای کشش

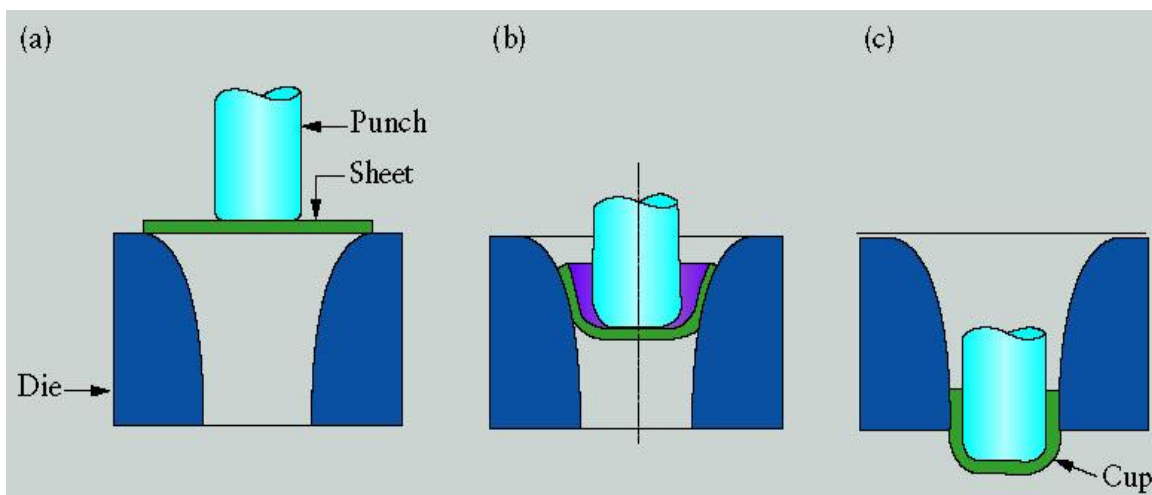
مجدد

از دیگر پارامترهای تعیین کننده در کشش عمیق، ورق گیر و مباحث مربوط به آن است. ورق گیر از چین و چروک ایجاد شده به دلیل تنش های فشاری محیطی در ورق پیشگیری می کند. نیروی ورق گیر با ضخامت ورق نسبت معکوس دارد. اگر این نیرو بیش از مقدار بهینه باشد احتمال پارگی و اگر کمتر از آن باشد احتمال چین خوردگی ورق افزایش می یابد. ممکن است به منظور کنترل بهتر جریان فلز از زائده هایی موسوم به مهره کشش (Draw Bead) استفاده گردد. شکل ۲-۵۶ به این مطلب می پردازد.

شکل ۲-۵۶. (a) طرح شماتیک مهره کشش. (b) نمایش جریان کنترل شده فلز با استفاده از مهره کشش. (c) شکل گیری نواحی مدور در کشش عمیق.



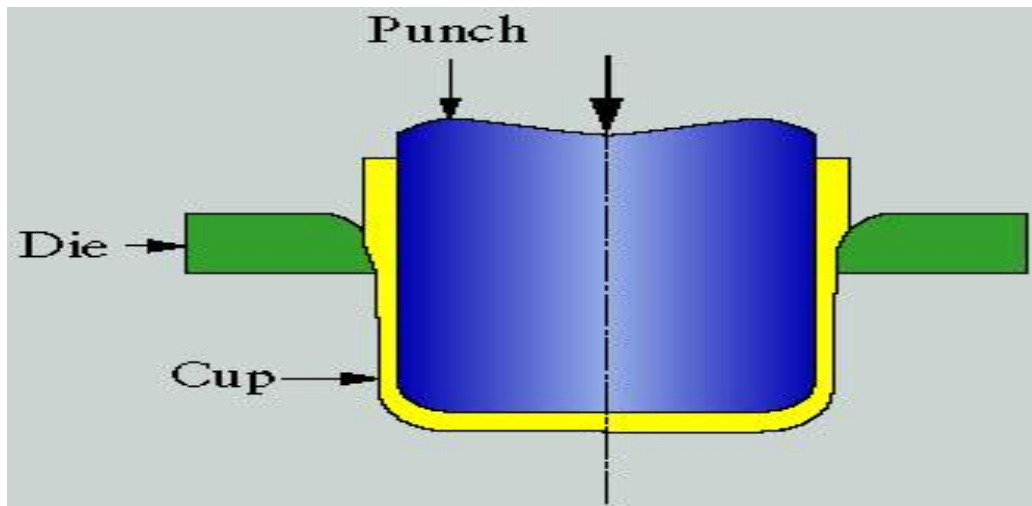
در مواردیکه نسبت کشش کم یا ضخامت ورق زیاد باشد می توان کشش بدون ورق گیر انجام داد. در این موارد از قالبهای ویژه ایی استفاده می شود. یک نمونه معروف این قالبها، قالبهای تراتریکس (Tractrix Di) می باشد. در واقع در این قالب، حفره ماتریس دارای منحنی پروفیل خاصی است که امکان جریان مناسب ورق و در نتیجه ان کشش بدون ورق گیر را فراهم می کند. طرح شماتیک کشش بدون ورق گیر در قالبهای تراتریکس در شکل ۲-۵۷ ارائه شده است.



شکل ۲-۵۷  
طرح شماتیک  
کشش بدون ورق  
گیر در قالبهای  
تراتریکس

### ۱۸- فرایندهای اطوکاری (Ironing Process):

طرح شماتیک این فرایند در شکل ۲-۵۸ ارائه شده است. محصولات کشش عمیق معمولاً دارای ضخامت یکسان نیستند. در واقع تولید ظروف با ضخامت یکسان نیروی زیادی را طلب می کند که در کشش عمیق مقرون به صرفه نیست. بنابراین به منظور کاهش ضخامت و یکنواخت کردن دیواره محصولات کشش عمیق از اطوکاری استفاده می شود.



شکل ۲-۵۸. طرح شماتیک فرایند اطوکاری.

نیروی وارده به ابزار در اطوکاری کم است و به علاوه صافی سطح بسیار خوبی در قطعات ایجاد می کند. به همین دلیل است که محصولات اکستروژن را نیز بعضاً اطوکاری می کند.

## فرآیندهای شکل دهی حجمی

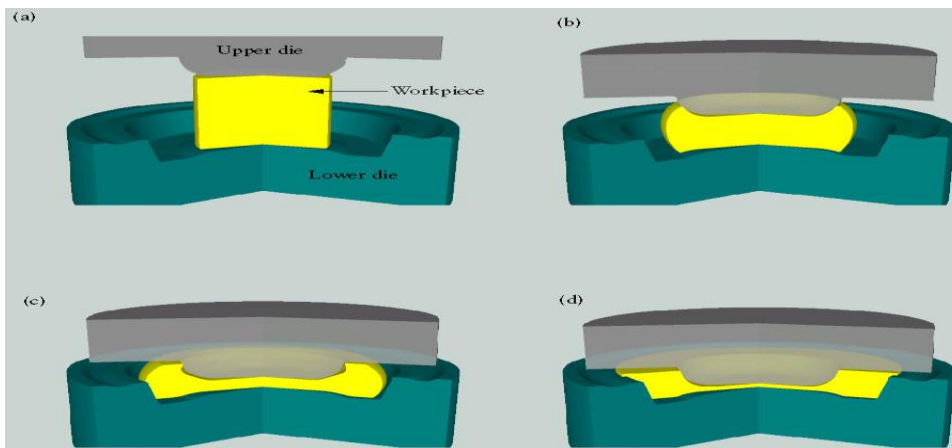
### ۱- مقدمه:

در فرآیندهای شکل دهی حجمی ماده ورودی عموماً یک تختال، شمشال یا میله است. مشخصه اساسی این دسته فرایندها آن است که نسبت مساحت به حجم در ناحیه تغییر شکل به طور قابل توجهی تحت تاثیر تنشهای فشاری بزرگ افزایش می یابد. فرآیندهای شکل دهی حجمی خصوصیات متمایز زیر را دارا هستند:

- قطعه کار ( ماده اولیه) تحت تاثیر تغییر شکلهای پلاستیک شدید قرار می گیرد که در نتیجه آن تغییرات عمده ای در شکل یا مقطع عرضی آن ایجاد می شود.
  - نسبت حجمی از ماده که تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد به مراتب بیشتر از حجم ماده ای است که دچار تغییر شکل الاستیک می شود. از این رو بازگشت الاستیک در اینگونه فرایندها غیر محسوس و قابل چشم پوشی است.
- از سال ۱۹۹۸ به بعد پیشرفتهای چشمگیری در زمینه فرایندهای شکل دهی حجمی به وقوع پیوسته که از آن جمله میتوان به ابداع فرایندهای نوین نظیر فرایندهای شکل دهی تدریجی، تهیه مواد ورودی جدید، کنترل بهتر بر ریزساختار از طریق فرایندهای ترمومکانیکی خاص و توسعه تدریجی ابزارهای پیشرفته به منظور پیشگویی کیفیت سطح و ریز ساختارهایی ماده اشاره نمود.
- مهمترین فرایندهای شکل دهی حجمی عبارتند از آهنگری، آهنگری دوار، اکستروژن ( روزنرانی)، نورد کاری و کشش. در این بخش اساس تمامی فرایندهای شکل دهی حجمی ارائه و به فراخور توضیحاتی ارائه می گردد

### ۲- فرایندهای آهنگری ( Forging process):

اساساً آهنگری فرایند کارگرمی است که در آن جریان فلز تحت تاثیر تنش های فشاری بزرگ اتفاق می افتد. در این روش، قطعه کار به وسیله مجموعه ای از قالبها و ابزارهای متوالی شکل داده می شود. مطابق شکل ۱-۳ در فرایند آهنگری، غالباً فلز در دمایی بالاتر از دمایی تبلور مجدد تحت تراکم قرار گرفته و بدین سان شکل و نقش و نگارهای محفظه قالب را به خود می گیرد.



شکل ۱-۳. در فرایند آهنگری ماده اولیه حرارت دیده، تحت فشار قالب به گونه ای جریان می یابد که شکل محفظه قالب را به خود می گیرد.

اهنگري پيشينه تاريخي زيادي دارد و يكي از قديمترين روشهاي شكل دهی فلزات به شمار مي رود. تجهيزات و ادوات اين

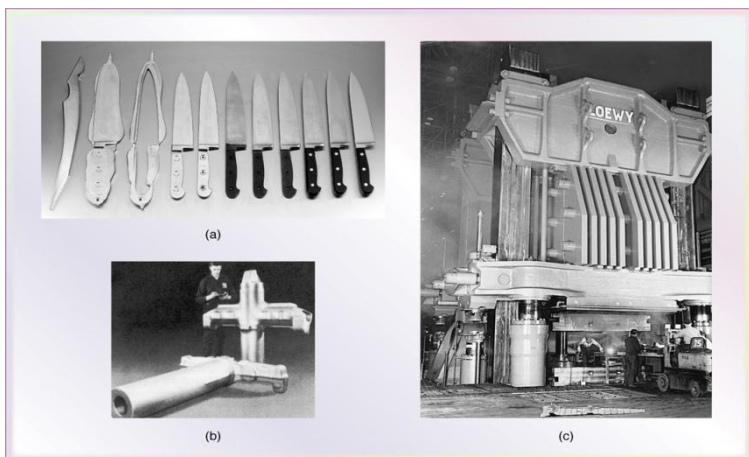
تكنيك در ابتدا چيزي بيش از يك چکش و سندان نبوده است. مجموعه ابي از وسايل ساده كه در کنار بهره گيري از حرارت ايش، به منظور ساخت نعل اسب، شمشير و نظائر آنها به كار مي رفتند. ( شكل ۳-۲ )



شكل ۳-۲. توليد نعل اسب بارز ترين روش اهنگري سنتي است.

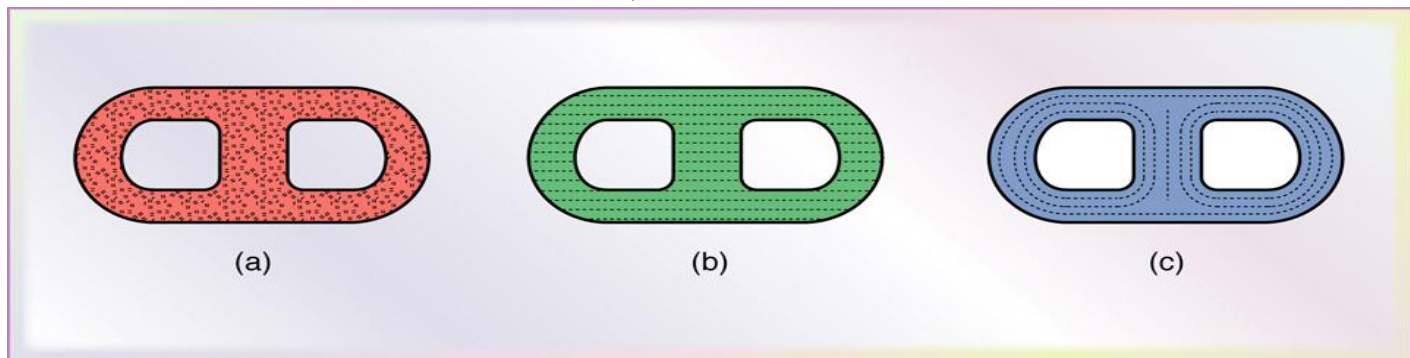
بايد توجه نمود امتياز بزرگ شكل دهی فلزات در درجه حرارتهاي بالاتر از درجه حرارت تبلور مجدد، وجود سيستمهاي لغزشي متغير، کاهش مقاومت تسليم در درجه حرارت بالا و نيز عدم وجود پديده کرنش سختي به علت خاصيت خود بازپختي مي باشد. بنابراين مي توان گفت از انجا كه ايجاد تغيير شكل زياد در نتيجه کاهش مقاومت تسليم و افزايش چکش خواري در دماهاي بالا امكان پذير است، فرايندهاي اهنگري داغ متداولترند. بايد توجه داشت اگرچه در فرايندهاي اهنگري سرد سطح بالاتري از نيرو مورد نياز است مزيت عمده اين روشها افزايش استحکام در نتيجه پديده کرنش سختي مي باشد.

مطابق شكل ۳-۳ فرايند اهنگري در گستره بزرگي از صنعت ايفاي نقش مي كند. امكان ساخت قطعات نزديك به شكل نهايي ( net shape ) و نيز توانايي توليد قطعات پيچيده نظير جعبه دنده هاي صنايع زميني، دسته شاتون و محورهاي با هندسه خاص، اهنگري را در رديف کاربردي ترين روشهاي توليد قرار داده است.



شكل ۳-۳. (a) طرح شماتيك مراحل مختلف اهنگري يك چاقو. b ( توليد برخي اجزائ هوابيما c ) نماي كلي يك پرس هيدروليک ۵۰۰۰۰ تن در فرايند اهنگري.

همانگونه كه در قبل نيز اشاره شد برتري عمده روشهاي شكل دهی فلزي ( مخصوصا اهنگري ) بر ساير روشهاي توليد ، حصول خواص مكانيكي بهتر در نتيجه ايجاد ريز ساختار مناسب مي باشد. در واقع از انجا كه ريز ساختار ماده تابعي از روش توليد قطعه مي باشد مي توان نقش روش توليد را در ايجاد خواص مكانيكي مطلوب برجسته دانست. شكل ۳-۴ طرح شماتيك دانه بندي و ريز ساختار حاصل از سه روش مختلف توليد را ارائه مي كند. شكل a-۳-۴ مربوط به ريخته گري بوده، شكلهاي b-۴-۳ و c-۳-۴ به ترتيب به ريز ساختار حاصل از ماشينكاري و اهنگري مي پردازند.

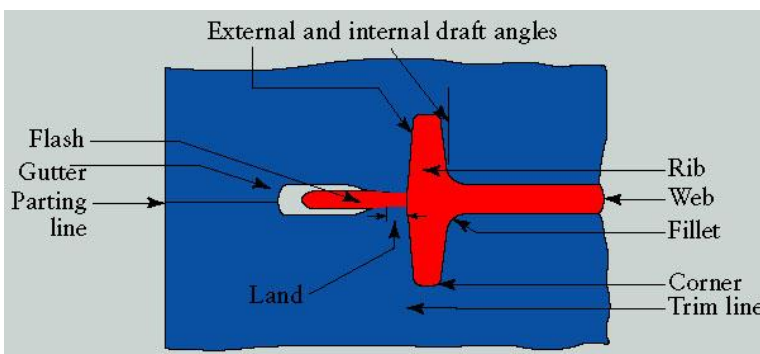


شكل ۳-۴ طرح شماتيك دانه بندي و ريز ساختار حاصل از a) ريخته گري b) ماشينكاري c) اهنگري

اگرچه هر يك از اين فرایندها امتیازات و محدودیتهای خاص خود را به لحاظ خواص داخلی، خارجی، دقت ابعادی، کیفیت سطح و اقتصاد تولید را دارند اما فرایند اهنگری از آنجا که به ریز ساختار منظم و غیرممتقاطع می انجامد خواص مکانیکی بهتری را ایجاد میکند. در واقع دستیابی به استحکام و انعطاف پذیری بالا که در نتیجه وجود امکان کنترل جریان فلز حاصل می شود، مهمترین امتیاز تولید به شیوه اهنگری محسوب می گردد. در کنار این ویژگیها، فرایندهای اهنگری با دو محدودیت عمده مواجه هستند. نخست آنکه قالبهای اهنگری و به خصوص قالبهای اهنگری داغ بسیار گران و پرهزینه اند. دومین محدودیت

Material	Temperature Range (°C)	اهنگری و فرایند های وابسته این است که اجزای موفق آنها سطح بسیار بالایی از مهارت کارگاهی را طلب می کند. جدول ۱-۳ محدوده دمایی برای اهنگری داغ چند ماده متداول را ارائه می دهد.
Aluminum alloys	400-550	جدول ۱-۳. محدوده دمایی در اهنگری داغ.
Magnesium alloys	250-350	
Copper alloys	600-900	
Carbon and low alloy steels	850-1150	
Stainless steels	1100-1250	
Titanium alloys	700-950	
Iron based superalloys	1050-1180	
Tungsten alloys	1200-1300	

شکل ۳-۵ هنده و مشخصات متداول يك قالب اهنگری را ارائه می نماید.



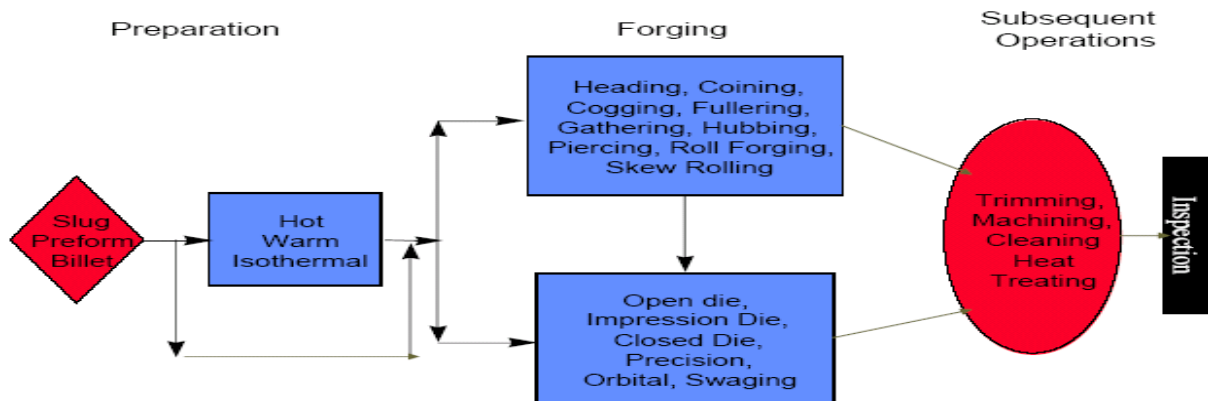
شکل ۳-۵ مشخصات استاندارد يك قالب اهنگری.

با توجه به آنچه گذشت می توان مراحل زیر را برای تولید به شیوه اهنگری متصور بود:

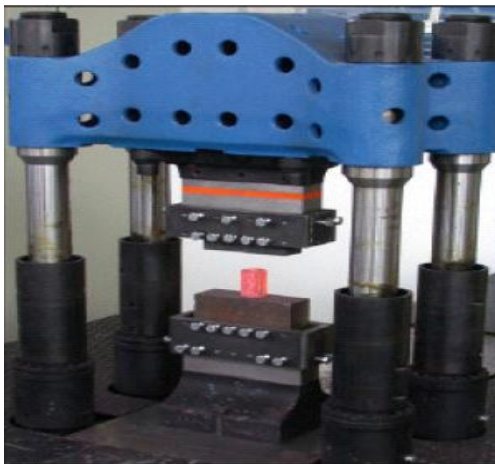
- آماده سازی ماده اولیه و تمیز کاری آن
- حرارت دادن قطعه کار ( اهنگری داغ)
- پوسته زدایی در صورت لزوم
- پیشگرم کردن و روغنکاری قالبها ( اهنگری داغ)
- اهنگری در قالبهای مناسب و با توالی صحیح
- بر داشتن ماده اضافی ( پلیسه یا فلش)
- تمیز کاری
- کنترل ابعادی
- کم کردن ابعاد در صورت لزوم
- ماشینکاری برای رسیدن به ابعاد نهایی
- عملیات حرارتی در صورت لزوم
- بازرسی و کنترل کیفیت



در تکنیک های آهنگری، مکانیزم های متنوعی جهت اعمال نیروهای فشاری وجود دارد. این تنوع به پیدایش روشهای مختلفی منجر شده است که میتوان آنها را بر اساس درجه و میزان مقاومتی که قالب در برابر جریان و سیلان فلز از خود نشان می دهد به صورتهای زیر دسته بندی میشوند

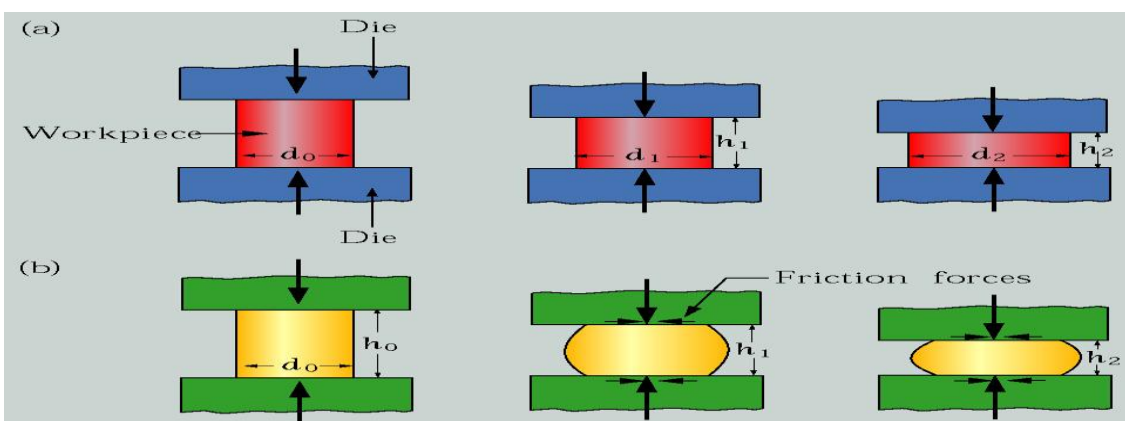


ساده ترین عمل آهنگری، آهنگری در قالب باز (open die forging) می باشد که تحت عنوان آهنگری در قالب تخت (flat die forging) یا پرچکاری (upsetting) نیز شناخته شده است. در این روش قطعه کار توسط دو قالب تخت تحت فشار قرار می گیرد به گونه ای که می تواند بدون هیچگونه محدودیت جانبی، موازی با فکهای قالب جریان یابد. شکل ۳-۶ یک قالب آهنگری باز در شرایط دمایی داغ را نمایش می دهد.



شکل ۳-۶ یک قالب آهنگری باز

تکنیک آهنگری باز ارزان بوده و می توان انرا به منظور تولید تنوع وسیعی از قطعات ساده - نظیر چهارگوش و استوانه - در قالبهای یکسان به کار گرفت. البته باید توجه داشت فرایند پرچکاری بیشتر به عنوان پیش فرم و به منظور آماده سازی قطعه برای مراحل بعدی آهنگری مورد توجه قرار می گیرد. مهمترین محدودیت در این فرایند وقوع پدیده بشکه ای شدن (Barreling) می باشد که در نتیجه اصطکاک زیاد میان قطعه و فکهای قالب رخ می دهد. شکل ۳-۷-ا تغییر شکل ایده ال یک قطعه استوانه ای شکل توپر را میان قالبهای بدون اصطکاک و شکل ۳-۷-ب همان قطعه را در شرایط واقعی (وجود اصطکاک) نشان می دهد. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از کماتش، طول قطعه کار را معمولاً حداکثر تا سه برابر بیشتر از قطر آن در نظر می گیرند.

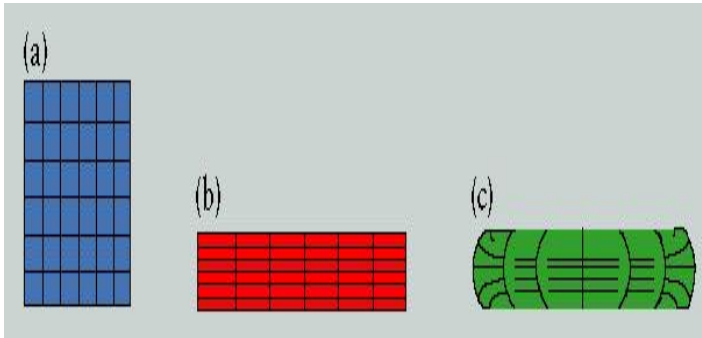


شکل ۳-۷. فرایند پرچکاری (a) شرایط ایده ال (بدون اصطکاک) (b) شرایط واقعی (وجود اصطکاک)



همانگونه که از شکل و توضیحات آن قابل استنباط است اصطکاک بین فکهای قالب و نمونه، بشکله ایی شدن قطعه را به دنبال دارد. در شکل ۸-۳ خطوط جریان دانه ها ارائه شده است. آنچه به طور مشخص قابل رویت است ناهمگنی بسیار زیاد و پدیده بشکله ایی شدن می باشد.

شکل ۸-۳. نمایش خطوط جریان دانه ها در فرایند پرچکاری.



شکل ۹-۳ تغییر شکل شبکه ایی در فرایند پرچکاری را نشان می دهد. ردپای پدیده بشکله ایی شدن به خوبی قابل پیگیری است.

شکل ۹-۳. (a) قبل از تغییر شکل (b) بعد از تغییر شکل بدون اصطکاک (c) بعد از تغییر شکل واقعی

یکی از اصطلاحات مهم در زمینه آهنگری، قابلیت آهنگری (Forgeability) می باشد که اکنون زمینه لازم برای بیان آن وجود دارد. قابلیت آهنگری یک ماده به توانایی و میزان شکل پذیری آن بدون ایجاد هرگونه ترک و واماندگی گفته می شود. متداولترین آزمایش برای قابلیت آهنگری، فرایند پرچکاری است. نمونه مورد نظر بین فکهای قالب تحت فشار قرار می گیرد و سطوح بشکله ایی شده آن از نظر ترک خوردگی بازرسی می شوند. آزمایشها نشان می دهند قابلیت آهنگری بیش از هر چیز به تنش تسلیم، قابلیت انعطاف و ضریب اصطکاک بستگی دارد. جدول ۳-۲ دسته بندی چند ماده بر اساس قابلیت آهنگری آنها نمایش را می دهد.

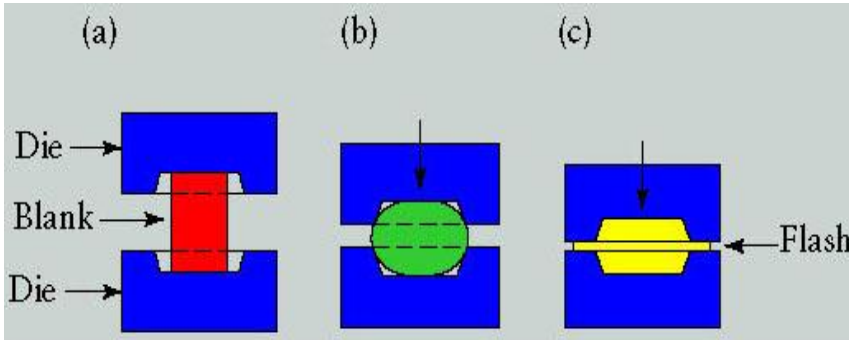
TABLE 14.3

### Classification of Metals in Decreasing Order of Forgeability

Metal or alloy	Approximate range of hot-forging temperatures (°C)
Aluminum alloys	400-550
Magnesium alloys	250-350
Copper alloys	600-900
Carbon- and low-alloy steels	850-1150
Martensitic stainless steels	1100-1250
Austenitic stainless steels	1100-1250
Titanium alloys	700-950
Iron-based superalloys	1050-1180
Cobalt-based superalloys	1180-1250
Tantalum alloys	1050-1350
Molybdenum alloys	1150-1350
Nickel-based superalloys	1050-1200
Tungsten alloys	1200-1300

جدول ۳-۲. دسته بندی چند ماده بر اساس قابلیت آهنگری

در حالت کلی می توان گفت فرایندهای آهنگری در قالب باز ارزان و اقتصادی اند، برای تولیدات کم حجم به کار گرفته شده و محدوده وسیعی از ابعاد را در بر می گیرند. در کنار این مزایا محدودیت هایی نیز به این فرایندها نسبت داده می شود که از آن جمله می توان به منحصر شدن توانایی آنها به تولید قطعات ساده، دقت ابعادی پایین، نرخ تولید کم و نیاز به مهارت ویژه کارگاهی اشاره نمود.

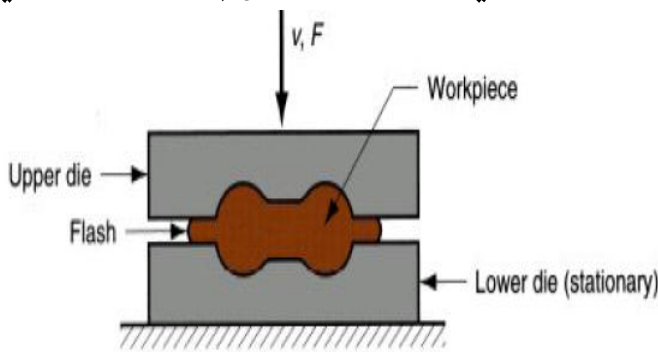


تکنیک قرینه فرایندهای آهنگری باز، آهنگری در قالب بسته (closed die forging) می باشد. مطابق شکل ۳-۱۰ در این فرایندها از قالبهایی با انتهای تقریباً بسته استفاده می گردد. معمولاً فرایندهای آهنگری بسته به بیش از یک قالب جهت شکل دهی کامل قطعه نیاز دارند.

شکل ۳-۱۰. شکل دهی در قالبهای متوالی به منظور دستیابی به شکل مطلوب قطعه ( آهنگری بسته )

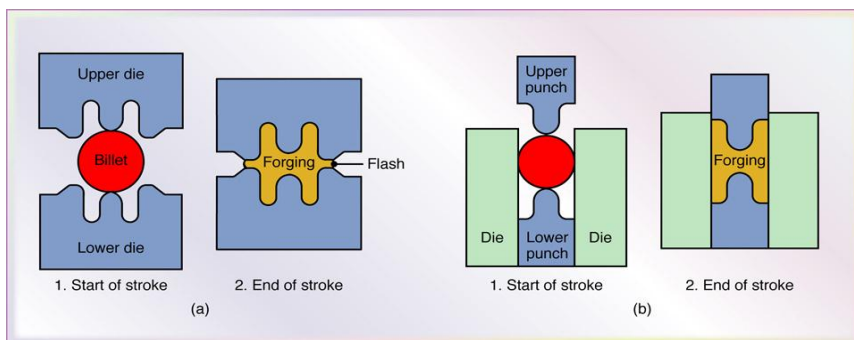
از مزایای آهنگری در قالب بسته می توان به بکارگیری خوب جریان ماده، خواص بهتر، صحت و تکرارپذیری مناسب، نرخ تولید بالاتر و قابلیت تکرار اشاره نمود. حال آنکه هزینه های بالای قالب و لزوم انجام ماشینکاری تکمیلی از محدودیت های این روش محسوب می شوند.

قالبهای آهنگری بسته، خود به دو صورت با فلش (Flash) و بدون فلش می باشند. فلش در واقع پلیسه یا اضافه برشی است که در مراحل پایانی دوره بری می گردد. نحوه شکل گیری فلش در شکل ۳-۱۱ ارائه شده است.



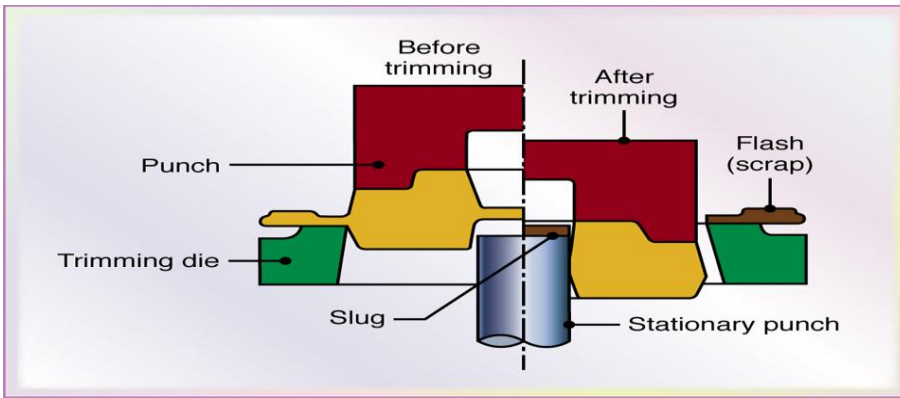
شکل ۳-۱۱. نحوه شکل گیری فلش

باید توجه داشت این اضافه برش یا فلش که در واقع ماده اضافی می باشد به منظور اطمینان از پر شدن کامل فضاهای قالب و حصول نقش و نگارهای ظریف قطعه در نظر گرفته می شود. (شکل ۳-۱۲)



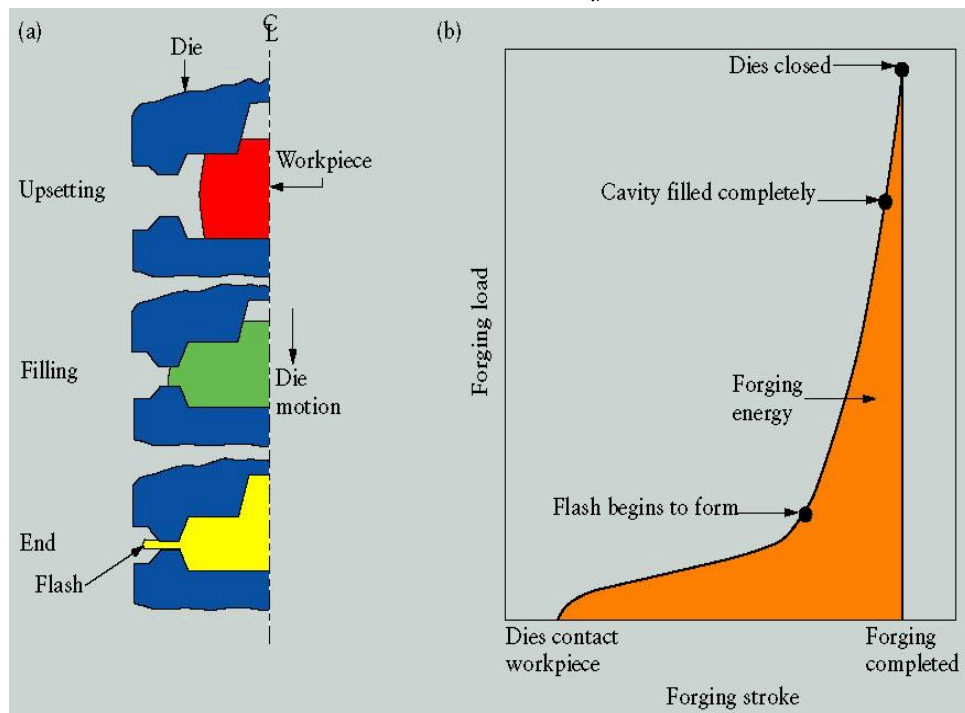
شکل ۳-۱۲. (a) آهنگری در قالب بسته با فلش (b) آهنگری در قالب بسته بدون فلش.

طرح شماتيك عمليات دوره بري به منظور تکميل قطعه و حذف پليسه ها در شکل ۳-۱۳ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۳ عمليات دوره بري پس از اهنگري

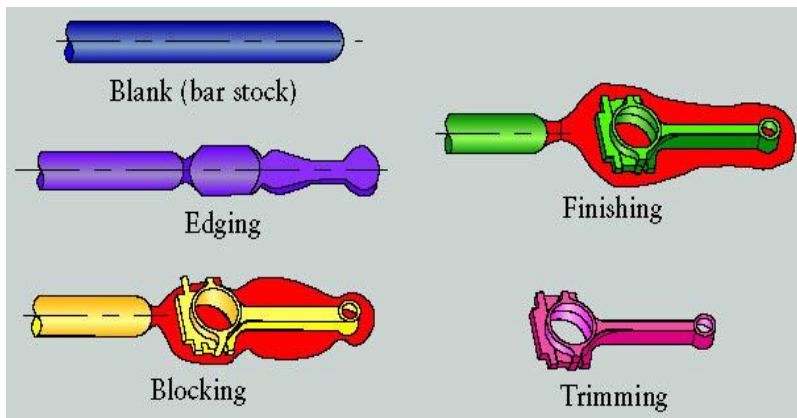
شکل ۳-۱۴ نمودار نیرو بر حسب کورس در اهنگري بسته را ارائه مي کند. با پيشروي نيمه بالايي قالب و فشرده شدن قطعه، به تدريج نیرو افزايش مي يابد. اين نیرو به تنش تسليم و هندسه قطعه، همچنين به سطح تماس ان با قالب بستگي دارد. با افزايش پيشروي وهمزمان با پر شدن حفره ها و نقش و نگارهاي قالب، اهنگ افزايش نیرو بيشتري مي شود. با بسته شدن قالب و شکل گيري فلش، بيشتري ميزان افزايش در نیرو مشاهده مي گردد.



شکل ۳-۱۴ نمودار افزايش نیرو بر حسب کورس در اهنگري بسته.

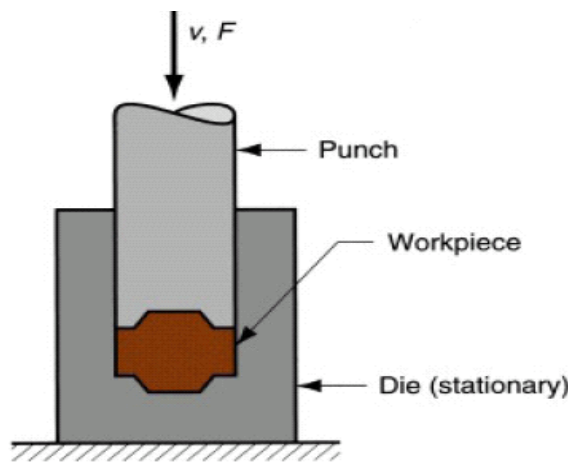
يکي از عواملی که تأثير زيادي در کاهش نیروهاي اهنگري دارد، روانکاري مي باشد. روانکاري مناسب از يك سو جريان ماده را به درون قالب بهبود بخشيده و از سوي ديگر خروج انرا از قالب تسهيل مي کند. روغن هاي معدني، صابون و سيليكاتها متداولترين روانکارها در اهنگري سرد هستند. در فرايندهاي اهنگري داغ از دي سولفيد موليبدن به عنوان روانکار استفاده مي شود.

شکل ۳-۱۵ مراحل مختلف و پيشفرم هاي توليد دسته شاتون را نمايش مي دهد. در مرحله لبه زني (Edging) جريان ماده به سمت دور شدن از کناره هاي قطعه و در مرحله انسداد (blocking) جريان ماده در جهت دور شدن از مرکز قطعه خواهد بود.



شکل ۳-۱۵. مراحل و پیش‌فرم‌های تولید دسته شاتون موتور احتراق داخلی.

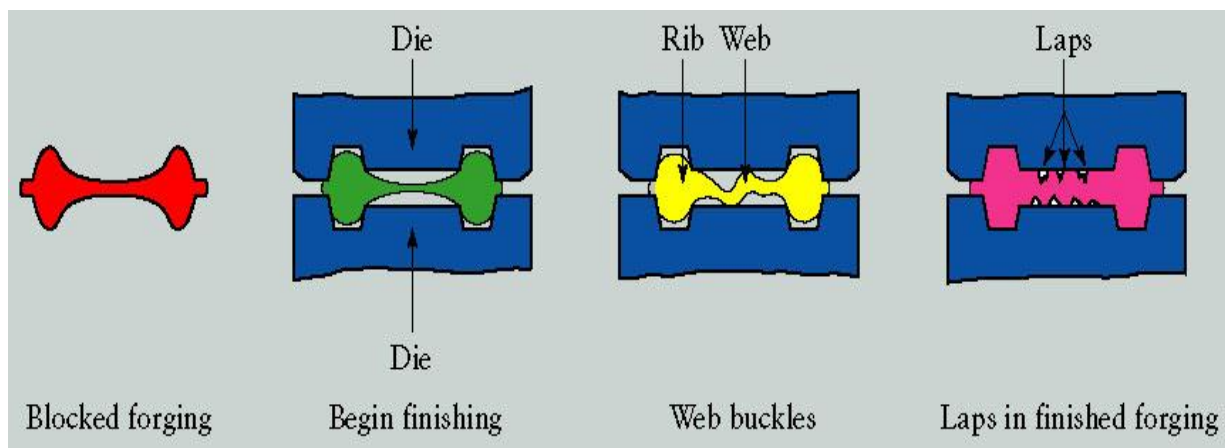
توسعه بیشتر فرایندهای آهنگری در قالب بسته به آهنگری دقیق (Precision forging) یا آهنگری بدون فلش منجر شد. در این روش بر اساس محاسبه دقیق جریان ماده به منظور پر کردن فضاهای قالب با کمترین میزان تولید پلیسه و فلش عمل می‌شود. در این تکنیک قالبها با جزئیات بیشتری ساخته می‌شوند تا عملیاتی‌های شکل دهی متعاقب حداقل گردند. بدین ترتیب معمولاً عملیات‌های ماشینکاری تکمیلی مورد نیاز نمی‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به خواص مکانیکی عالی، حداقل



مراحل شکل دهی و تolerانسهای بسته و از معایب آن میتوان به دشوار بودن کنترل جریان ماده، هزینه‌های بالا و نیروهای فزاینده آهنگری اشاره کرد. شکل ۳-۱۶ نمونه ایی شماتیک از آهنگری در قالب بسته بدون فلش را ارائه میکند.

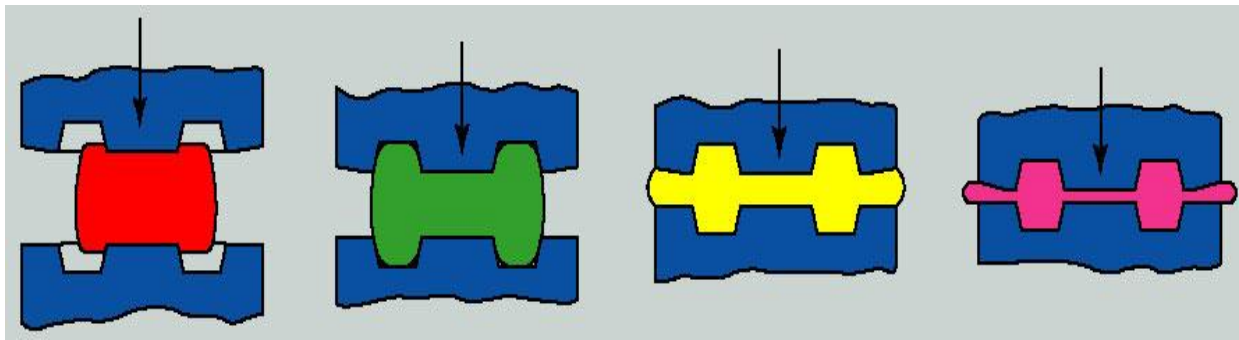
شکل ۳-۱۶. طرح شماتیک آهنگری در قالب بسته بدون فلش.

نمونه‌هایی از عیوب آهنگری که در اثر کمانش در میانه قطعه ایجاد می‌شوند در شکل ۳-۱۷ ارائه شده‌اند.



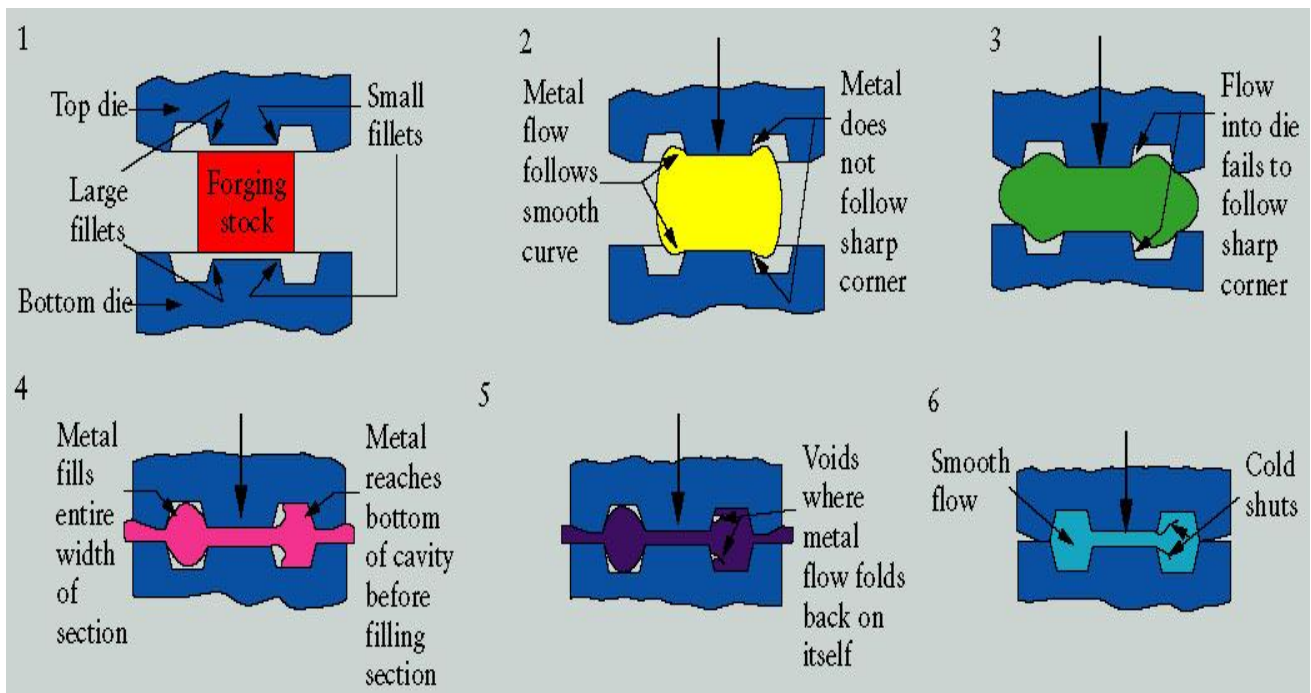
شکل ۳-۱۷. نمایش نمونه ایی از عیوب آهنگری.

حالت دیگری از عیوب داخلی آهنگری در نتیجه بزرگتر از اندازه بودن تختال اولیه رخ می‌دهند. با پر شدن ناگهانی حفره‌های قالب و ادامه فرایند شکل دهی، ماده ایی که در مرکز قالب متمرکز شده ناگزیر به سمت حفره‌های پر شده جریان یافته و مطابق شکل ۳-۱۸ به پیدایش عیب می‌انجامد.



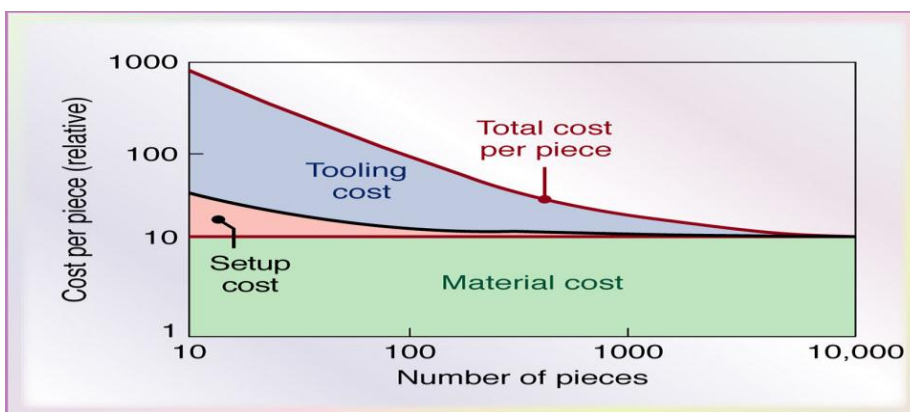
شکل ۱۸-۳ حالت دیگری از عیوب داخلی آهنگری .

در شکل ۱۹-۳ تاثیر شعاع گوشه قالب در شکل گیری عیوب آهنگری ارائه شده است.



شکل ۱۹-۳ تاثیر شعاع گوشه قالب در شکل گیری عیوب آهنگری

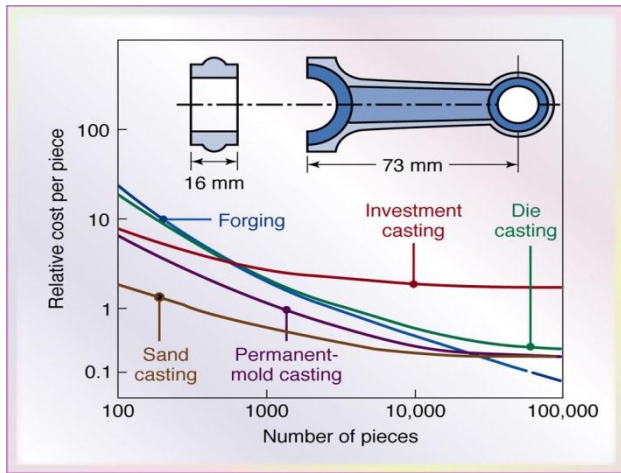
از آنجا که آهنگری یکی از کاربردی ترین روشهای شکل دهی فلزی است مباحث متعددی پیرامون اقتصاد آن وجود دارد. شکل ۲۰-۳ منحنی عمومی هزینه به ازای هر قطعه در آهنگری را ارائه می کند. همانگونه که از نمودار قابل استنباط است چنانچه همه قطعات با قالبهای یکسان تولید شوند با افزایش تعداد قطعات، هزینه های نصب و نیز هزینه های ابزار کاهش می یابند.



شکل ۲۰-۳ منحنی عمومی هزینه به ازای هر قطعه در آهنگری .

در شکل ۲۱-۳ نمودار مربوط به هزینه های تولید یک دسته شاتون به روشهای مختلف ریخته گری و آهنگری مقایسه شده است. به خوبی می توان دریافت

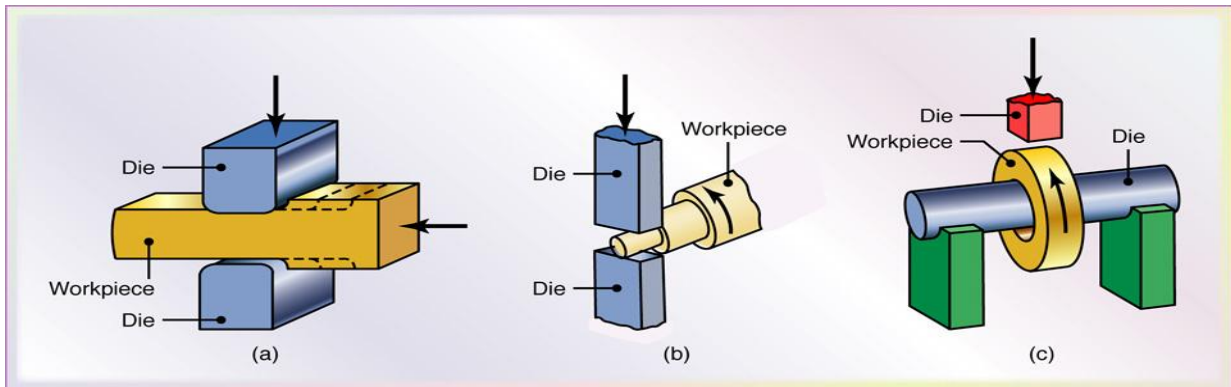
صرفنظر از خواص مکانیکی قابل حصول، به ازای حجمهای بالای تولید آهنگری اقتصادی تر است.



شکل ۳-۲۱ نمودار مربوط به هزینه های تولید یک دسته شاتون به روشهای مختلف.

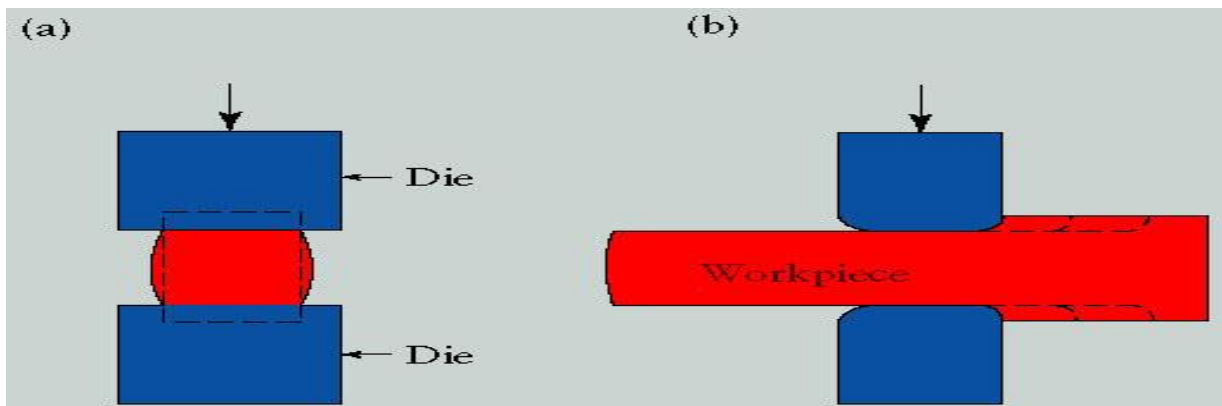
## ۲- فرایند های آهنگری پیش نورد ( Cogging Operation )

شکل ۳-۲۲ فرایند آهنگری پیش نورد را ارائه می کند. این فرایند از نوع فرایندهای آهنگری در قالب های باز می باشد. این تکنیک به منظور کاهش ضخامت میله ها، شمش ها و رینگ ها به کار گرفته می شود. معمولاً برای دستیابی به کاهش ضخامت مطلوب، لازم است فرایند چکش کاری قطعه بر روی یک سندان و در چند مرحله تکرار شود.



شکل ۳-۲۲. فرایند آهنگری پیش نورد. (a) بر روی یک شمش. (b) بر روی یک میله. (c) بر روی یک دیسک.

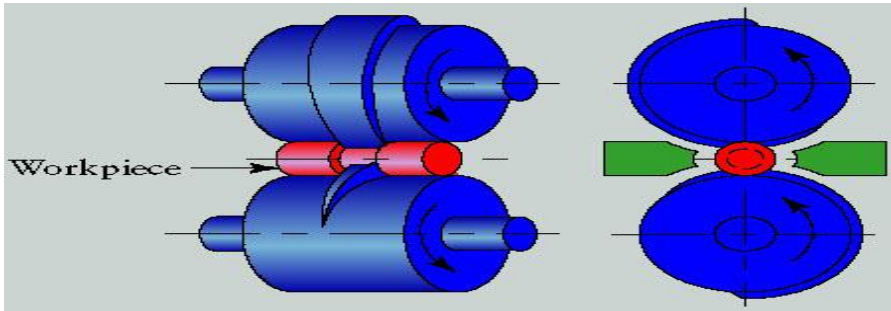
باید در نظر داشت با توجه به ماهیت فشاری این فرایند، پدیده بشکه ای شدن نیز قابل مشاهده است. شکل ۳-۲۳ به این مطلب می پردازد.



شکل ۳-۲۳. پدیده بشکه ای شدن در فرایند آهنگری پیش نورد بر روی یک شمش

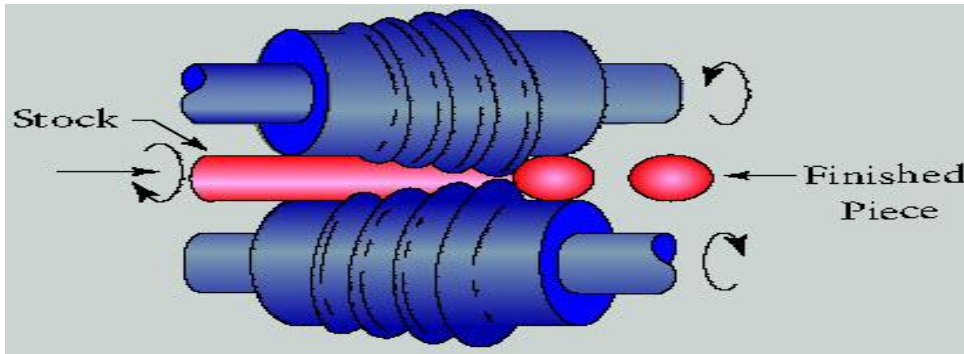
### ۳- فرایندهای آهنگری غلطکی (Roll Forging)

فرایند آهنگری غلطکی در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است. جهت گردش هر دو غلطک یکسان است. فرایند شکل دهی به وسیله گوه هایی که در محیط خارجی غلطکها تعبیه شده اند، کامل می شود. برخی فنرها و نیز چاقوها می توانند با این روش تولید شوند.



شکل ۳-۲۴. فرایند آهنگری غلطکی

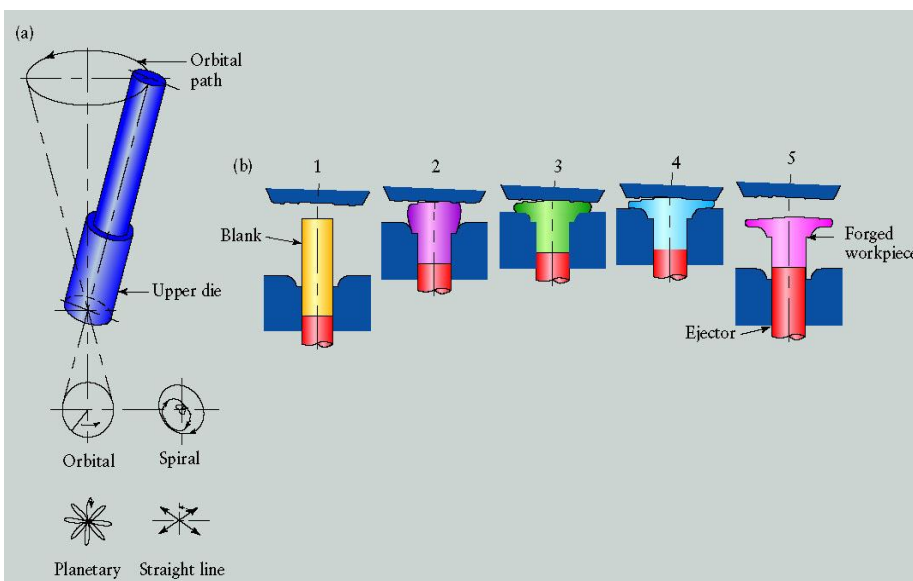
در شکل ۳-۲۵ طرح شماتیک فرایند آهنگری غلطکی مورب (skew-rolling) به منظور تولید ساچمه های فولادی بیرینگها ارائه شده است.



شکل ۳-۲۵. طرح شماتیک فرایند آهنگری غلطکی مورب

### ۴- فرایندهای آهنگری چرخشی (Orbital Forging Process)

این فرایند از نوع فرایندهای شکل دهی تدریجی می باشد. در واقع در این فرایندها پولک اولیه در چند مرحله کوتاه شکل دهی می گردد. از آنجا که قالب در هر لحظه در تماس با سطح ناچیزی از قطعه کار است، نیروی شکل دهی نسبت به سایر فرایندهای آهنگری کم است. این فرایند بیشتر برای قطعات استوانه ای کاربرد داشته، حلقه بیرینگها و برخی چرخ ها با این روش تولید می شوند. (شکل ۳-۲۶)

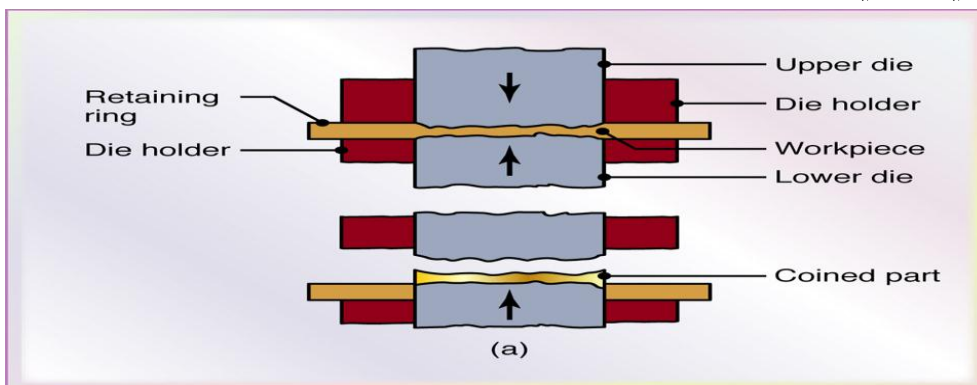


شکل ۳-۲۶. طرح شماتیک فرایندهای آهنگری چرخشی.



## ۵- فرایندهای سکه زنی (The Coining Process)

این فرایند بسیار شبیه فرایندهای اهنگری بدون فلش می باشد اما قدمت بیشتری دارد. شکل ۳-۲۷ طرح شماتیک این فرایند را نشان می دهد. لازم است حفره قالب کاملا بسته شود تا امکان تکمیل فرایند وجود داشته باشد. نکته قابل توجه این است که معمولا فشار و نیروهای اهنگری در این تکنیک بالا هستند.



شکل ۳-۲۷ طرح شماتیک فرایندهای سکه زنی.

سکه های قدیمی را با روشهای اهنگری در قالب باز می ساختند و بنابراین دقت و نقش و نگارهای کمتری را شامل می شدند. شکل ۳-۲۸ ابزار و سکه های تولید شده بوسیله آن در فرایندهای مدرن سکه زنی را نمایش می دهد.

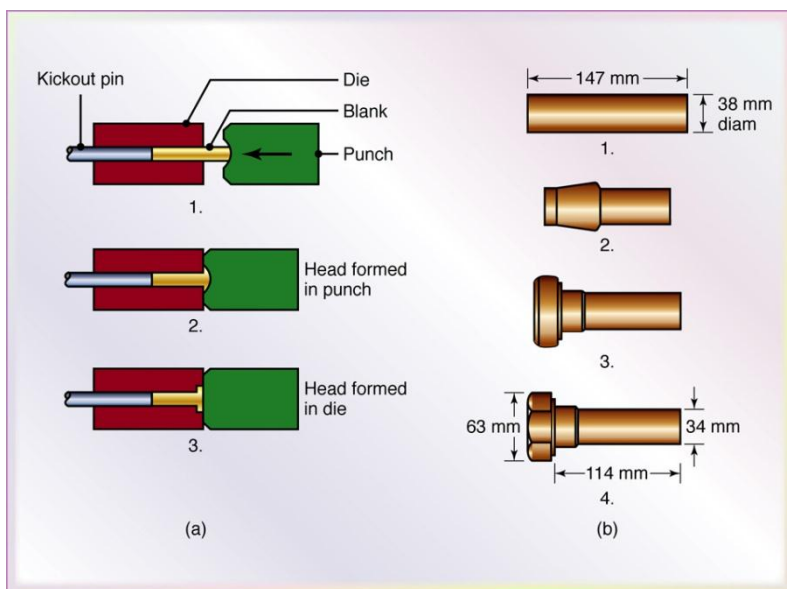


شکل ۳-۲۸ ابزار و سکه های تولید شده بوسیله آن ( فرایندهای مدرن سکه زنی )

## ۶- فرایندهای اهنگری کله زنی ( Heading )

همانگونه که در شکل ۳-۲۹ نمایش داده شده است این فرایند بیشتر برای تولید ابزار و ادوات اتصالات موقت نظیر کلگی پیچ کاربرد دارد. ترتیب مراحل و عملیات های مورد نیاز نیز ارائه شده است.

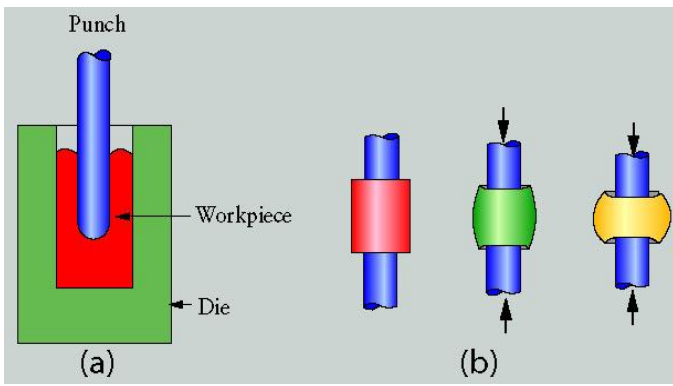
شکل ۳-۲۹ (a) طرح شماتیک فرایند کله زنی (b) ترتیب مراحل شکل دهی قطعه .



## ۷- فرایندهای اهنگری سوراخ زنی ( Piercing Operations )

نام این فرایند دقیقا متناسب با نوع عملیات آن است یعنی اساسا برای سوراخ زنی و ایجاد سوراخ کاربرد دارد. این تکنیک در حیطه فرایندهای اهنگری با قالب بسته مورد توجه قرار می گیرد. ( شکل ۳-۳۰ )

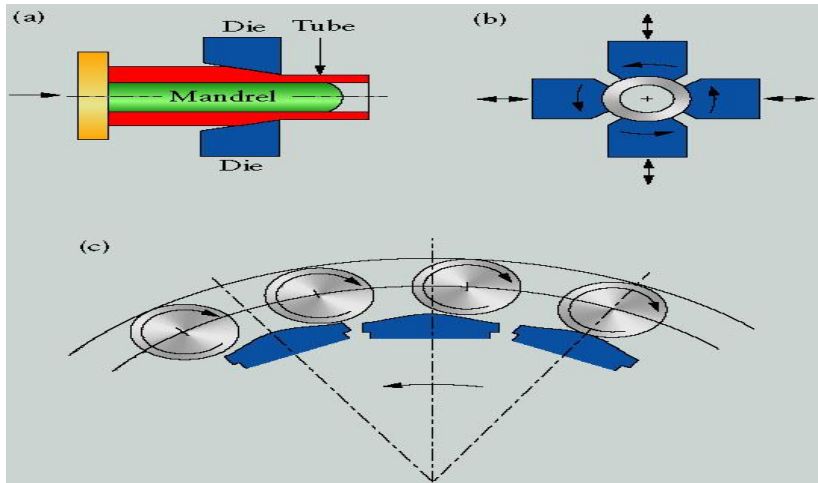
شکل ۳-۳۰. فرایندهای سوراخ زنی.



۸- فرایندهای آهنگری دوار (Swaging)

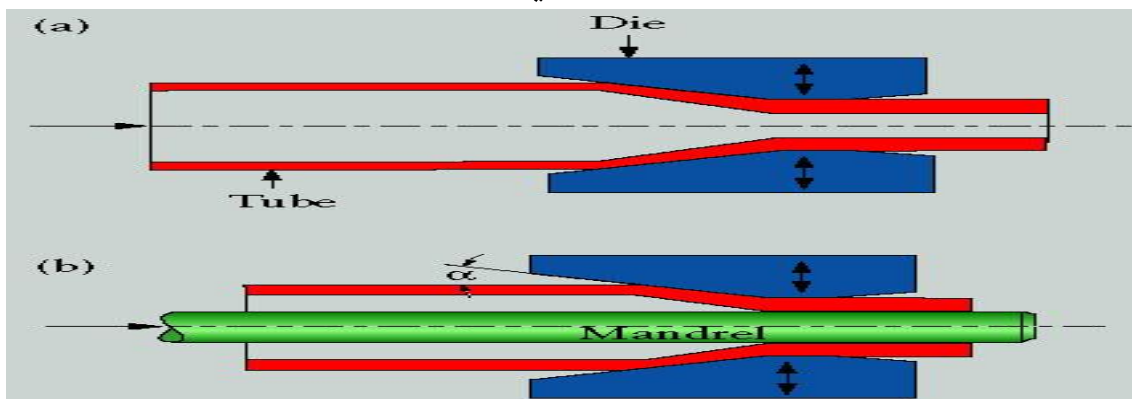
آهنگری دوار نوعی فرایند شکل دهی سرد محسوب می شود. در این تکنیک ممکن است از قالبهای دو یا چند تکه استفاده شود. لقمه های قالب در محیط خارجی قطعه موقت دهی می شوند و با اعمال نیروهای شعاعی (ضربات شعاعی) موجب

کاهش سطح مقطع میله ها و لوله ها می گردند. فرکانس این ضربات به نوع ماشین آهنگری دوار و به کاربرد آن، همچنین به تعداد لقمه های قالب بستگی دارد. مکانیزم این فرایند در شکل ۳-۳۱ ارائه شده است.



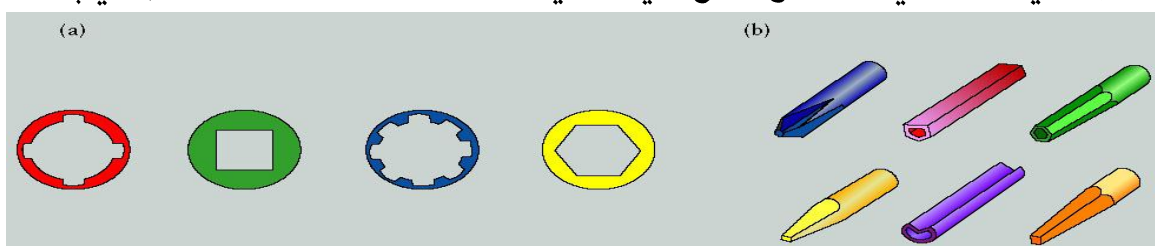
شکل ۳-۳۱. طرح شماتیک فرایندهای آهنگری دوار. (a) نمای جانبی (b) نمای روبرو (c) نمایش لقمه های قالب چکش های شعاعی و مکانیزم اعمال ضربه.

در شکل ۳-۳۲ طرح شماتیک کاهش قطر یک میله در فرایند آهنگری دوار نشان داده شده است.



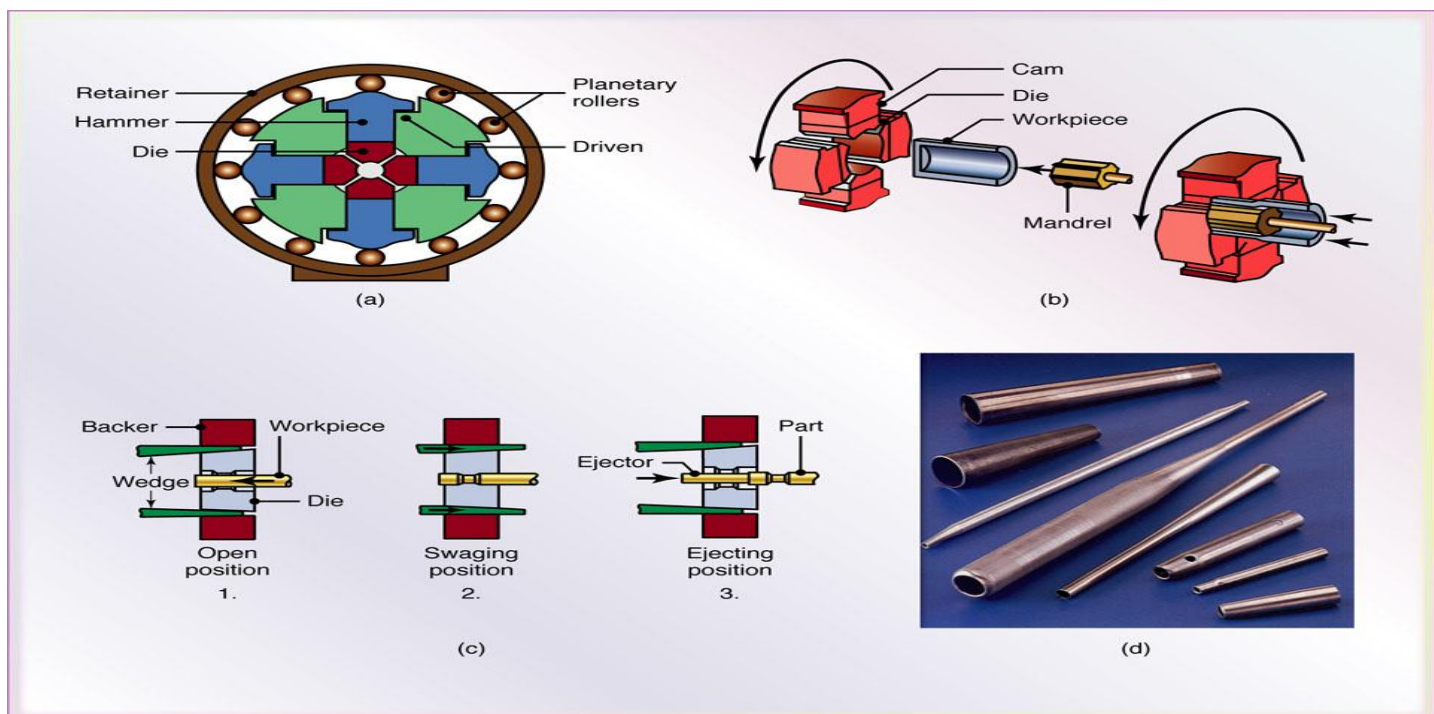
شکل ۳-۳۲. طرح شماتیک کاهش قطر میله (a) بدون استفاده از سنبه (b) با استفاده از سنبه

با استفاده از سنبه های مختلف می توان سطح مقطع های متفاوتی ایجاد نمود. شکل ۳-۳۳ به این مطلب می پردازد.



شکل ۳-۳۳. (a) سطح مقطع های قابل تولید در فرایند آهنگری دوار (b) سنبه های فرایند.

تقریباً همه فلزات را می توان با این تکنیک شکل دهی نمود. فلزات قیمتی، فولادهای کم کربن، کربن متوسط، الیاژی و زنگ نزن، الیاذهای آلومینیوم همچنین برنج، برنز، نیکل و تنگستن را می توان تا میزان ازدیاد طول ۱۰ درصد شکل داد. در واقع با توجه به ثابت بودن حجم، هر مقدار کاهش قطر ناگزیر به مقداری افزایش طول می انجامد که جزئی امتیازات این روش محسوب می شود. زیرا به عنوان مثال ازدیاد طول ۱۰ درصد به معنای ۱۰ درصد صرفه جویی در ماده مصرفی نیز هست. اخیراً و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به ازدیاد طول ۴۰ درصد نیز دست یافته اند. از دیگر امتیازات این فرایند می توان به حداقل تولید پلیسه، امکان شکل دهی قطعه در کمترین زمان ممکن (حتی در ۱۵ ثانیه)، قابلیت حصول درجه بالایی از کار سرد، افزایش استحکام، تولید قطعات با تلرانسهای بسته و کیفیت سطح خوب اشاره کرد. مجموعه این امتیازات موجب شده تا فرایند آهنگری دوار توجه صنعت خودروسازی را به خود جلب کند. امروزه بسیاری قطعات حساس خودرو نظیر جعبه فرمان و شافت فرمان را با این روش تولید نموده و به امتیازات بزرگی چه در زمینه افزایش ایمنی و چه در بحث کاهش وزن خودرو دست یافته اند. شکل ۳-۳۴ طرح شماتیک دیگری از این فرایند را نشان میدهد. در قسمت a مکانیزم عملکرد، در قسمت b چگونگی تولید پروفیل های داخلی با استفاده از سنبه، در قسمت c چگونگی تولید یک شافت فرمان در قسمت d چند شافت فرمان واقعی ارائه شده اند.

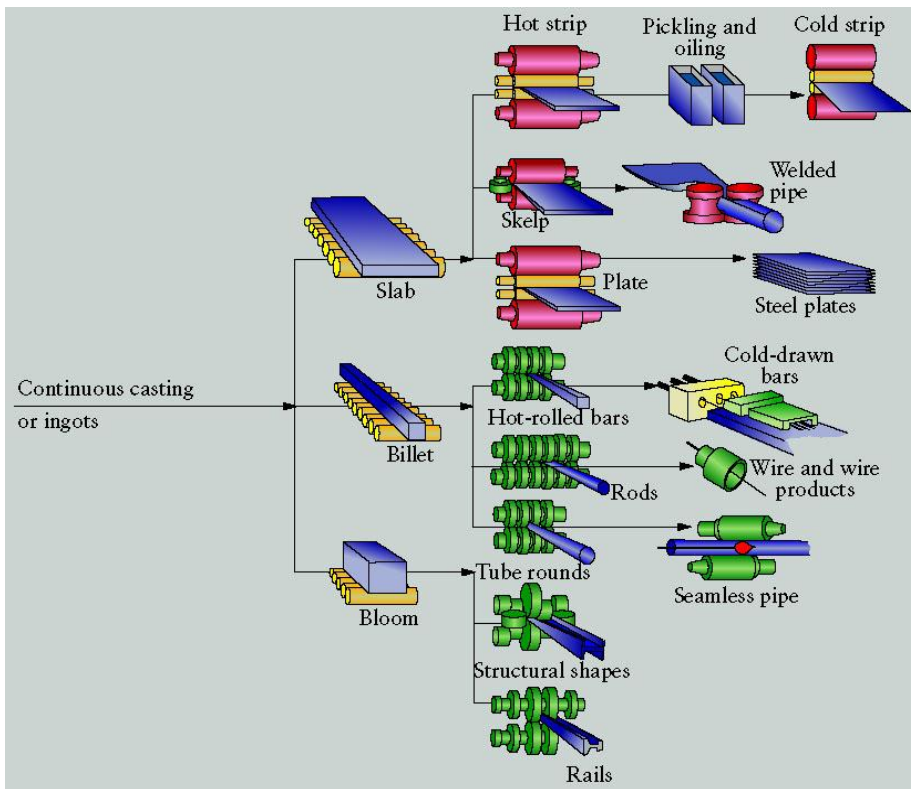


شکل ۳-۳۴. (a) مکانیزم عملکرد (b) چگونگی تولید پروفیل های داخلی (c) مراحل تولید یک شافت فرمان (d) چند شافت فرمان.

## ۹- فرایندهای نورد کاری (Rolling Processes)

تغییر شکل پلاستیک یک فلز در نتیجه عبور آن از بین غلطکهای استوانه ای دوار را نورد می گویند. در نتیجه این فرایند ضخامت قطعه کار در اثر اعمال نیروی فشاری غلطک هایی که در خلاف جهت یکدیگر دوران می کنند، کاهش می یابد. نورد یکی از کاربردی ترین روشهای شکل دهی در صنعت است که ماده اولیه آن به یکی از سه صورت زیر می باشد:

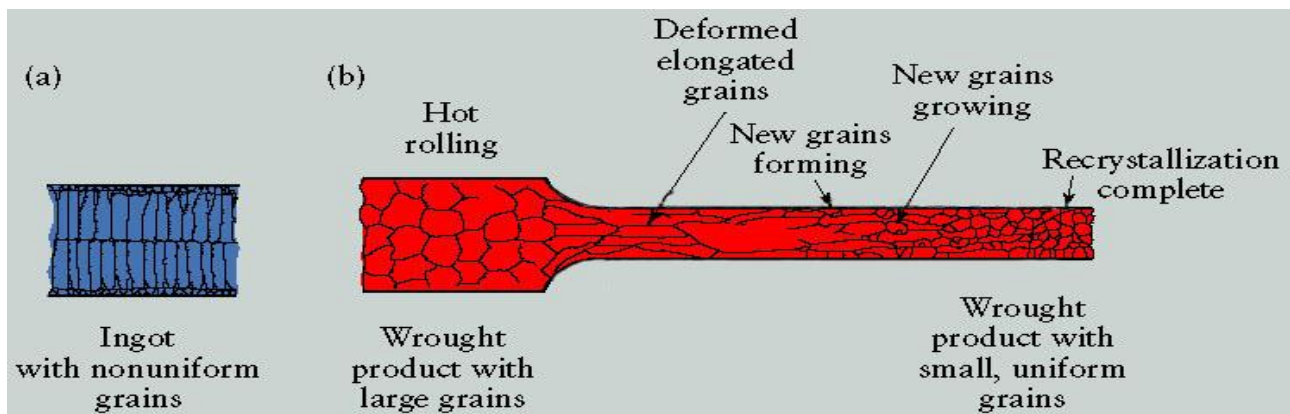
- شمشه (bloom) عبارت است از قطعه ایی با سطح مقطع مربع شکل به ابعاد شش اینچ در شش اینچ یا بیشتر.
- شمشال (billet) عبارت است از قطعه ایی با سطح مقطع مربع شکل به ابعاد یک و نیم اینچ در یک و نیم اینچ.
- تختال (slab) عبارت است از قطعه ایی با سطح مقطع مستطیل شکل به ابعاد ده اینچ در ضخامت یک و نیم اینچ.



شکل ۳-۳۵ طرح شماتیک انواع فرایندهای نورد کاری تخت و حجمی را ارائه می کند. همچنین انواع مواد ورودی به فرایند نورد نیز به تصویر کشیده شده اند.

شکل ۳-۳۵. طرح شماتیک انواع فرایندهای نورد کاری

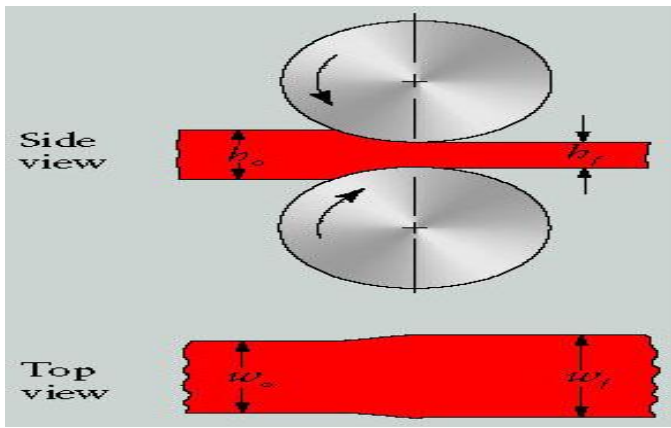
به منظور انجام نوردکاری گرم، قطعه مورد نظر را تا درجه حرارت مشخصی در کوره گرما می دهند. این درجه حرارت برای فولادها نزدیک به ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. امتیاز بزرگ نوردکاری گرم ریز شدن ساختار کریستالی فلز ریخته شده اولیه و امکان کنترل ساختار و دانه بندی فلز می باشد که در نتیجه تسریع در فرایند شکل دهی را به دنبال خواهد داشت. شکل ۳-۳۶ طرح شماتیک تغییر در ساختار دانه بندی یک فلز ریخته شده را ارائه می کند. همانگونه که قابل استنباط است نورد گرم راه مناسبی برای کاهش اندازه دانه ها به منظور بهبود استحکام و چکش خواری می باشد.



شکل ۳-۳۶ طرح شماتیک تغییر ساختار دانه بندی در نوردکاری گرم.

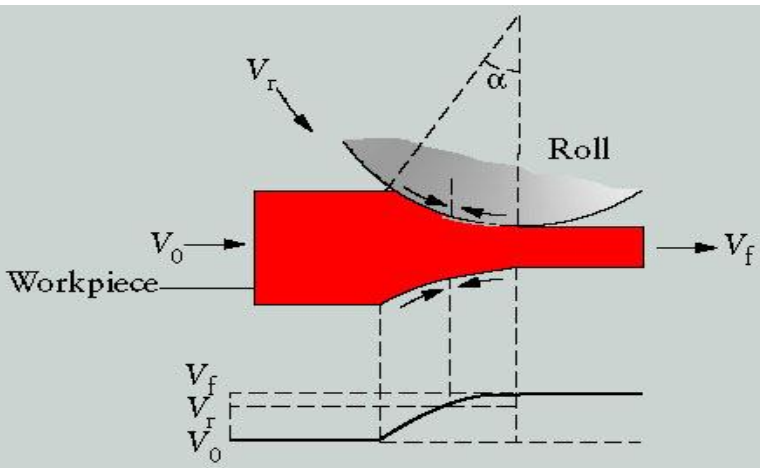
شکل ۳-۳۷ طرح شماتیک تغییر شکلی که در حین فرایند نوردکاری اتفاق می افتد را نشان می دهد. با عبور فلز از درون غلطک ها ضخامت آن بطور محسوسی کاهش یافته و به قطعه نازکتری تبدیل می شود. کاهش ضخامت در هر پاس شکل دهی به ضریب اصطکاک بین فلز و غلطک، قطر غلطک و امکان اعمال نیروی کششی از جلو برای خارج کردن قطعه کار بستگی دارد. در نورد گرم حداکثر کاهش در هر پاس تا حدود ۱۳ درصد مشاهده شده است حال آنکه در نورد سرد حداکثر کاهش ضخامت به دلیل ضریب اصطکاک پایین تر و نیروی جدا کننده بزرگتر الزاما کمتر است. باید توجه داشت در نتیجه این کاهش ضخامت، طول قطعه افزایش خواهد یافت اما گستردگی آن از پهلو (نمای سر) بسیار اندک است.

شکل ۳-۳۷ طرح شماتیک تغییر شکل در فرایند نوردکاری.



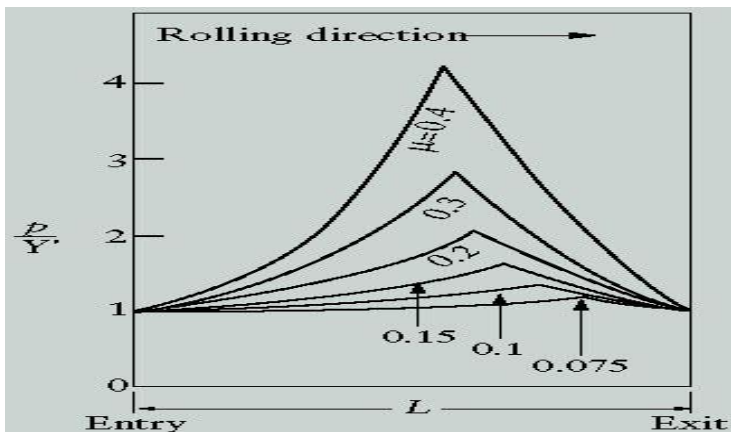
فلز بوسیله نیروی اصطکاک از درون غلطکهای نورد کشیده می شود. در واقع نیروی اصطکاک موجب حرکت لایه های سطحی قطعه کار نسبت به لایه های داخلی آن می شود. باید توجه داشت مثلاً هنگام ۵۰ درصد کاهش در ضخامت، قطعه کار غلطک ها را تقریباً با دو برابر سرعت ورودی، ترک می کند. از این رو می توان دریافت تنها یک نقطه وجود خواهد داشت که در آن سرعت قطعه کار با سرعت غلطک ها یکسان است. این نقطه را نقطه بدون لغزش یا نقطه خنثی (neutral point) می

گویند. همانطور که در شکل ۳-۳۸ بوسیله پیکانها نشان داده شده است در هر دو طرف این نقطه نوعی سرعت نسبی وجود دارد. سرعتهای نورد تقریباً به ۱۵۰۰ متر در دقیقه میرسد.



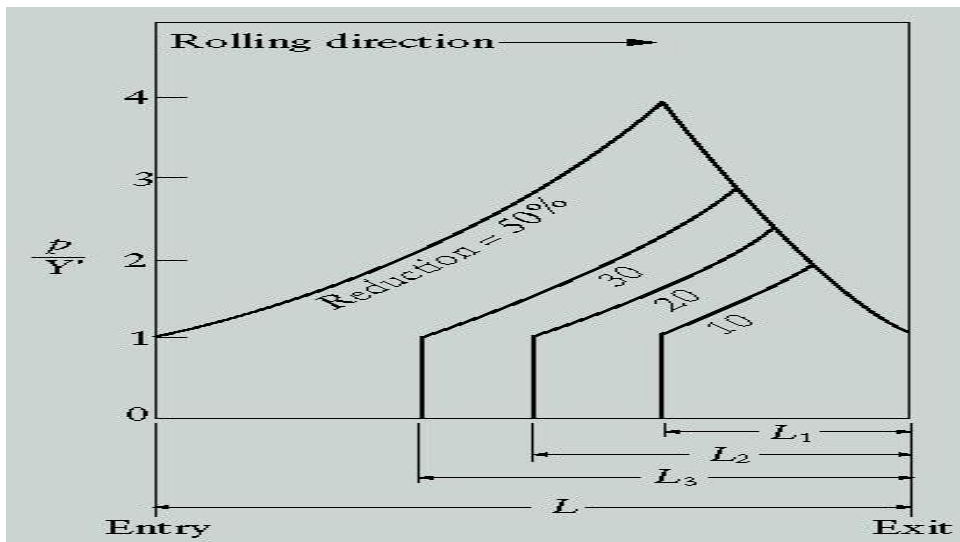
شکل ۳-۳۸. نمایش سرعت های نسبی در فرایند نورد کاری.

. در شکل ۳-۳۹ توزیع فشار نورد کاری در طول فاصله نورد به عنوان تابعی از ضریب اصطکاک ارائه شده است. نکته قابل توجه اینجاست که با افزایش اصطکاک نقطه خنثی به ورودی نزدیکتر می شود.



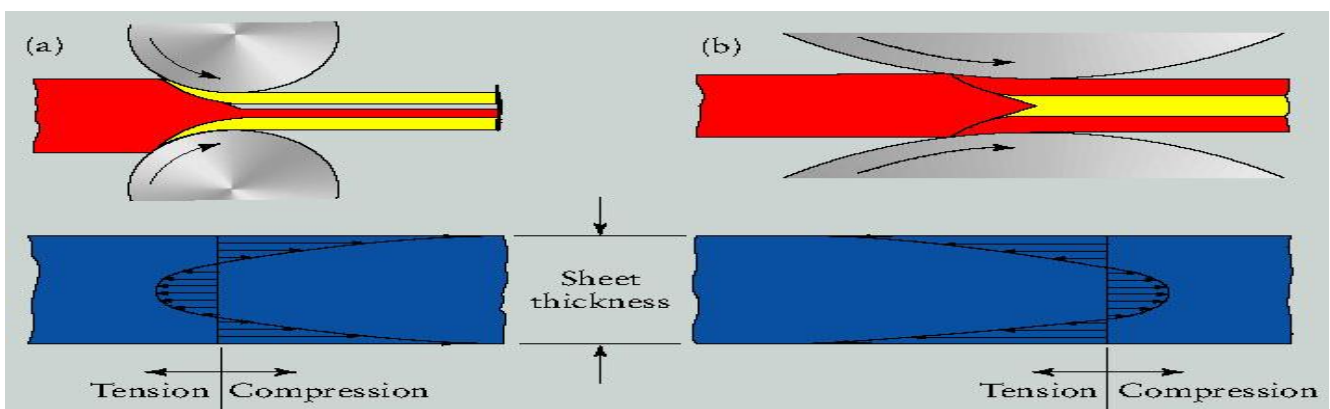
شکل ۳-۳۹ توزیع فشار نورد کاری در طول فاصله نورد به عنوان تابعی از ضریب اصطکاک

باید توجه داشت در نورد سرد حداقل ضخامتی که می تواند نورد شود حدود ۱/۵۰ قطر غلطک و در نورد گرم حدود ۱/۲۰۰ قطر غلطک است. در شکل ۳-۴۰ توزیع فشار نورد کاری در طول فاصله نورد به عنوان تابعی از کاهش ضخامت نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۰ توزیع فشار نورد کاری در طول فاصله نورد به عنوان تابعی از کاهش ضخامت.

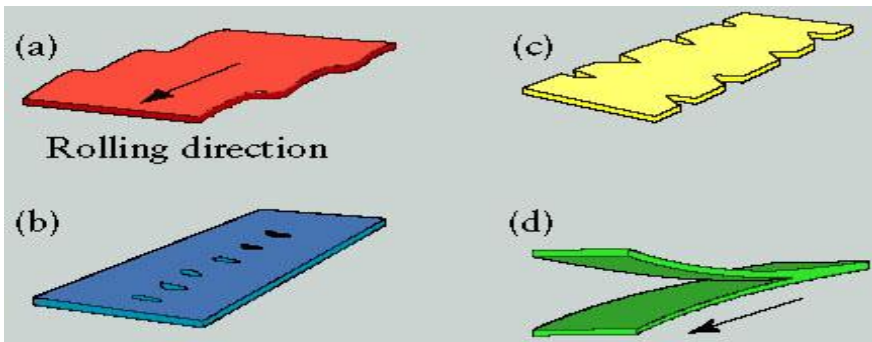
ماهیت تنشهای باقیمانده پس از نوردکاری به شکل منطقه تغییر شکل بستگی دارد. اگر میزان کاهش سطح مقطع زیاد بوده یا نسبت قطر غلطک به ضخامت آن بزرگ باشد، تغییر شکل نسبتاً یکنواخت صورت می‌گیرد و تنشهای پسماند ناچیزند. با فاصله گرفتن از این شرایط، یعنی با افزایش میزان کاهش در ضخامت یا کوچک شدن قطر غلطک، در سطح قطعه تنشهای کششی باقیمانده با امتداد محوری و در عمق آن فشار ایجاد می‌شود. حال با برعکس شدن موضوع، الگوی معمول تنشهای باقیمانده نیز کاملاً بر عکس می‌شود. در این حالت در سطح قطعه تنشهای فشاری و در عمق آن تنشهای کششی پسماند وجود خواهد داشت. تاثیر شعاع غلطک در نوع تنشهای کششی یا فشاری پسماند در شکل ۳-۴۱ بررسی شده است. باید توجه داشت به طور کلی وجود هر نوع تنش باقیمانده در فراورده نامطلوب است، زیرا این تنشها حد کشسانی فراورده را کاهش می‌دهند و سبب می‌شوند در حین عملیات ماشینکاری بعدی، تمایل به تابیدگی پیدا کند. الگوهای تنش باقیمانده معمول با کشش سطحی بسیار نامطلوب اند. زیرا احتمال بروز خستگی و خوردگی را افزایش می‌دهند.



شکل ۳-۴۱. تاثیر شعاع غلطک در تنشهای پسماند. (a) غلطکهای کوچک یا کاهش کم در ضخامت. (b) غلطکهای بزرگ یا کاهشهای زیاد در ضخامت.

باید توجه داشت نوردکاری فلزات در برخی شرایط می‌تواند به ایجاد آسیبهای مختلف منجر شود. نمونه ایی از عیوب متداول در نورد کاری تخت در شکل ۳-۴۲ ارائه شده اند. قسمت a عیب موسوم به موج دار شدن کناره را نمایش می‌دهد. در هنگام نوردکاری تخت چگالی ماده به ویژه در حوالی خط مرکزی کاهش می‌یابد. این افت چگالی از ایجاد تخلخل در مقیاس میکروسکوپی به ویژه در نزدیکی اخالها، یا از ذرات سخت فاز دوم ناشی می‌شود و بر حسب نوع ماده تغییر می‌کند. در وضعیت های بحرانی ممکن است حفره ها در نتیجه آسیب پیش رونده به هم ملحق شوند و در طول خط مرکزی ترکهای سهمی

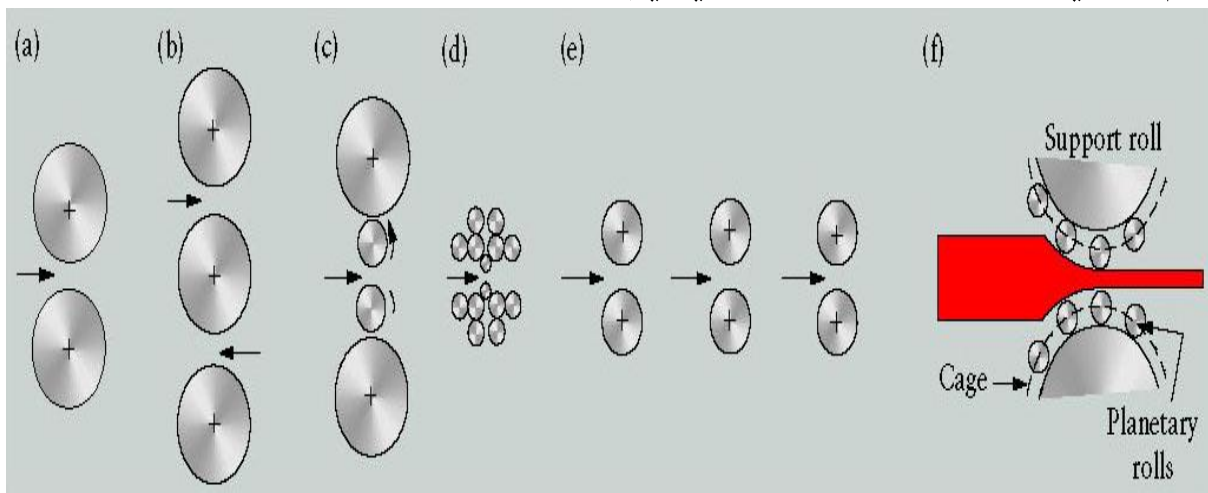
شکل تشکیل دهند. این عیب در قسمت b نمایش داده شده است و برای توصیف آن از اصطلاحاتی نظیر ترکهای نوک پیکانی، ترکیبگی خط مرکزی و شکافتگی هسته استفاده می کنند. در قسمت c عیب معروف به ترکیبگی کناره نشان داده شده است. تنش های باقیمانده زیاد همراه با آسیب خط مرکزی می توانند سبب شکافتگی خود به خود یا دهان سوسماری شدن ماده در هنگام خروج از منطقه تغییر شکل شوند. این عیب در قسمت d ارائه شده است.



شکل ۳-۴۲. عیوب متداول در نورد کاری تخت. (a)

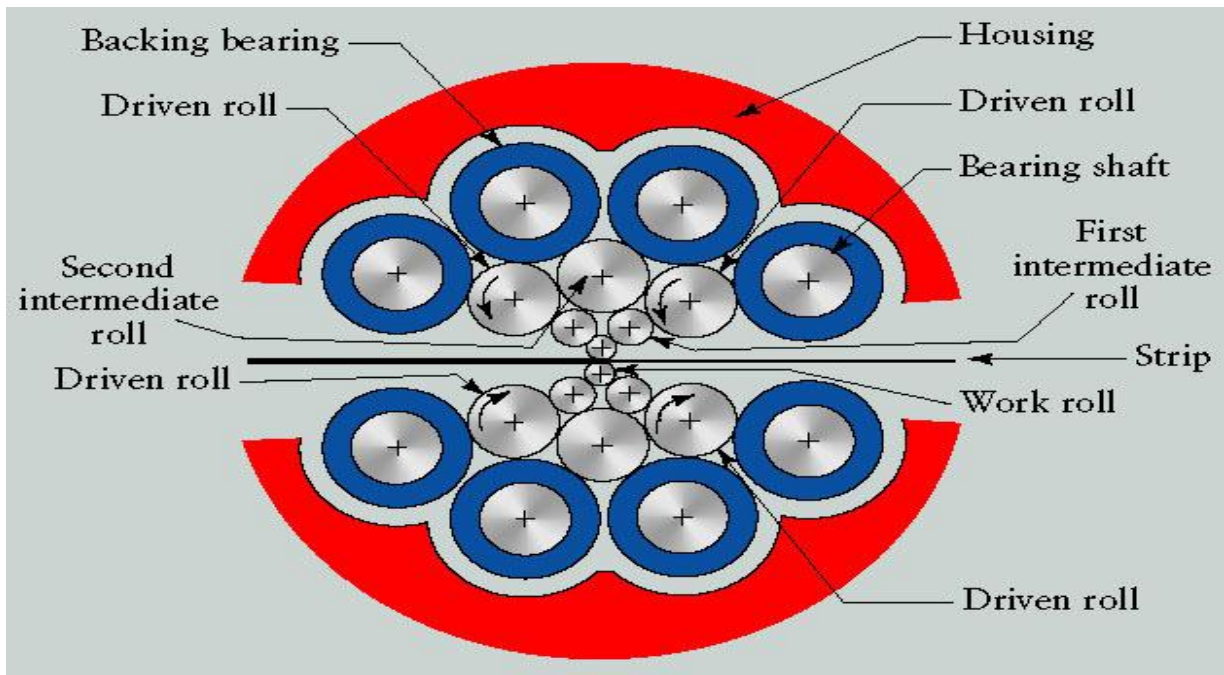
موج دار شدن کناره (b) ترکیبگی خط مرکزی (c) ترکیبگی کناره (d) عیب دهان سوسماری

ارایش های نمونه غلطکها در فرایندهای نوردکاری در شکل ۳-۴۳ ارائه شده اند. در قسمت a نوردکاری با دو غلطک عمودی نمایش داده شده است. این ارایش غلطکها اجازه می دهد جهت نوردکاری معکوس شود. قسمت b نوردکاری با سه غلطک عمودی برگشت پذیرا ارائه می کند. چنین چیدمانی به غلطک کاری افقی در یک جهت ثابت می انجامد. قسمت c به نوردکاری با چهار غلطک عمودی می پردازد. در این شیوه دو غلطک کوچک توسط دو غلطک بزرگ چرخانده می شوند. چیدمان موسوم به نوردکاری خوشه ایی در قسمت d بررسی شده است. در اینجا غلطک های کوچک توسط مجموعه غلطکهای محرک پشتی به چرخش در می آیند. نوردکاری با چیدمان پشت سر هم در قسمت e ارائه شده است. در این چیدمان مجموعه ایی از غلطکها پشت سر هم قرار می گیرند. قسمت f به نورد ستاره ایی می پردازد.



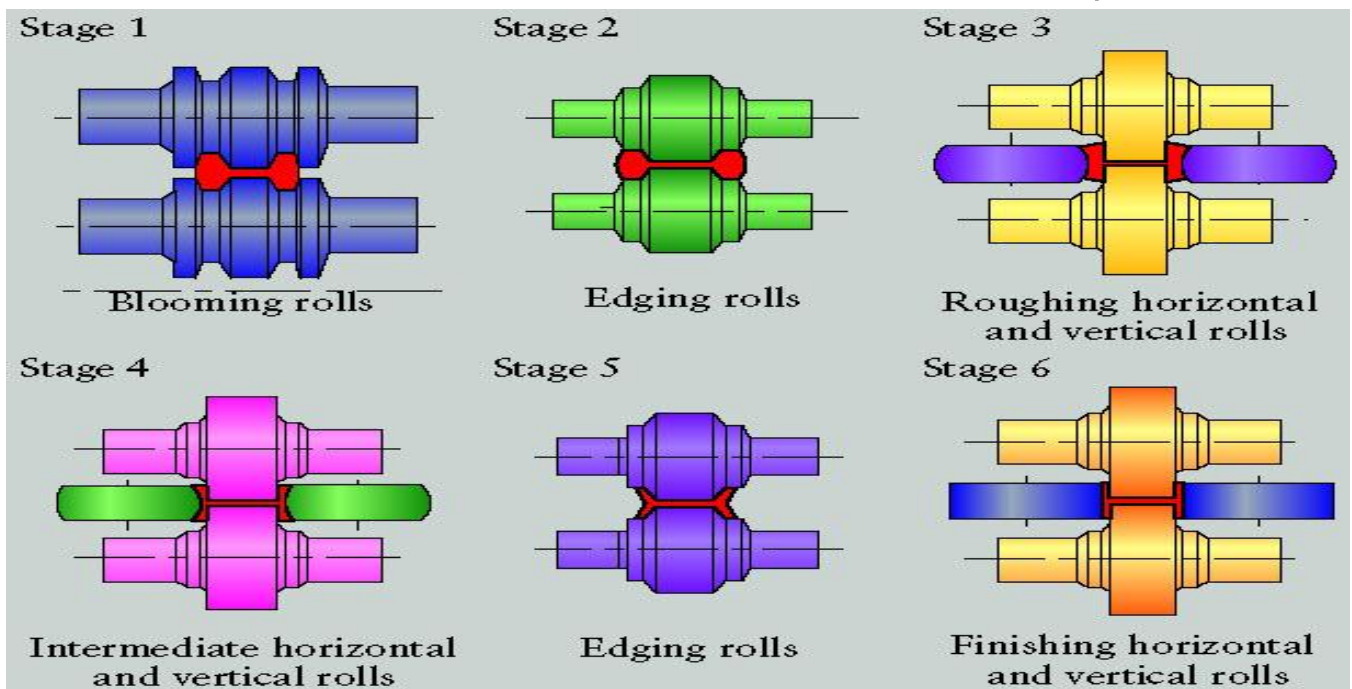
شکل ۳-۴۳. (a) نوردکاری با دو غلطک عمودی (b) نوردکاری با سه غلطک عمودی برگشت پذیر (c) نوردکاری با چهار غلطک عمودی (d) نوردکاری خوشه ایی (e) نوردکاری با چیدمان پشت سر هم (f) نورد ستاره ایی.

طرح شماتیک و توضیحات بیشتر در مورد نورد خوشه ایی در شکل ۳-۴۴ ارائه شده است. این چیدمان صلبیت بسیار زیادی داشته و بیشتر برای نورد کاری ورقهای ضخیم مواد استحکام بالا کاربرد دارد.



شکل ۳-۴۴. طرح شماتیک نورد خوشه ایی.

شکل ۳-۴۵ طرح شماتیک و مراحل مختلف تولید یک مقطع H شکل را در فرایند های نورد حجمی نشان می دهد. سازه های دیگر نظیر کانالها و مقاطع تیرها نیز با این روش قابل تولید اند.

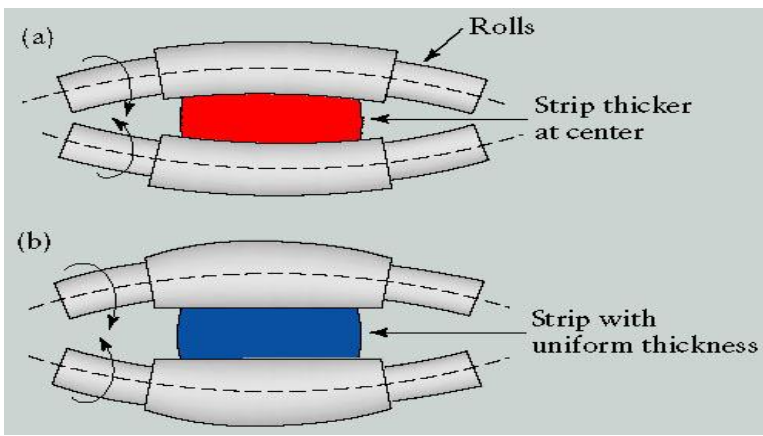


شکل ۳-۴۵. طرح شماتیک و مراحل مختلف تولید یک مقطع H شکل در فرایند های نورد حجمی.

### ۱۰- فرایند نورد خمکاری ( Roll Bending )

طرح شماتیک و اغراق امیز فرایند نورد خمکاری در شکل ۳-۴۶ ارائه شده است.

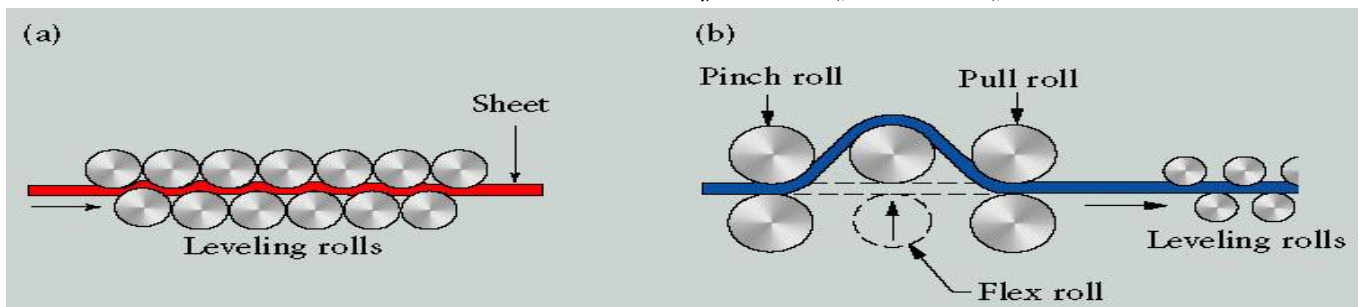




شکل ۳-۴۶. طرح شماتیک فرایند نورد خمکاری. (a) قطعه با ضخامت بیشتر در میانه (b) قطعه با ضخامت یکنواخت.

برخی فرایندها برای تخت کردن و میزان نمودن محصولات نورد به کار می روند.

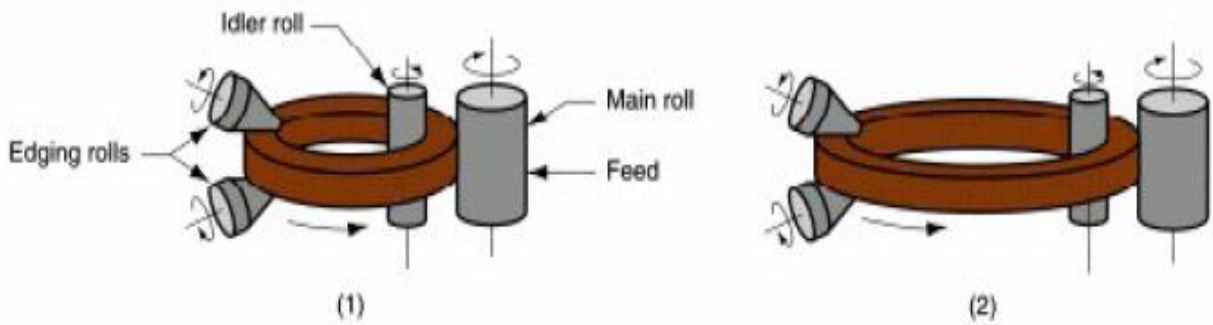
شکل ۳-۴۷ طرح شماتیک فرایندهای نورد ترازکاری را نشان می دهد.



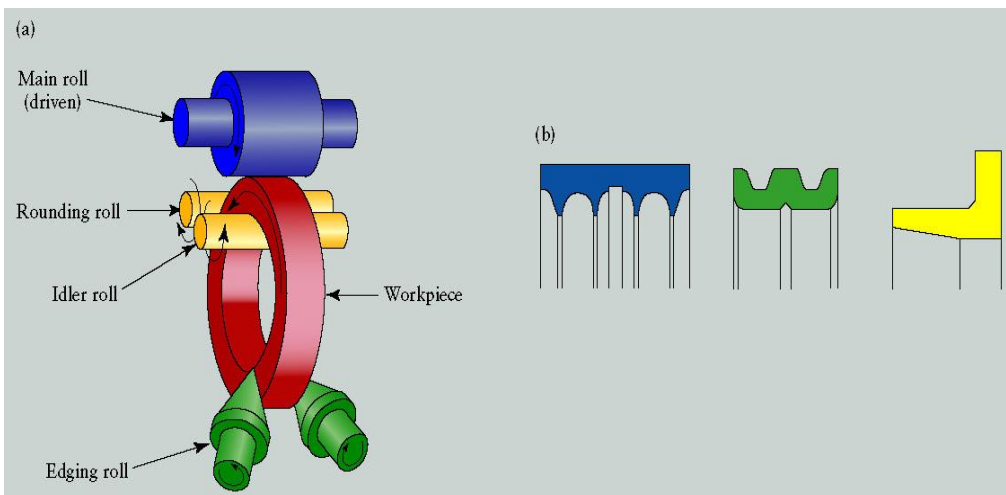
شکل ۳-۴۷ طرح شماتیک فرایند نورد ترازکاری.

### ۱۱- فرایندهای نورد حلقوی ( Ring-Rolling )

یکی از مهمترین فرایندهای نوردکاری، نورد حلقوی ( Ring-Rolling ) می باشد. نورد حلقوی فرایند تغییر شکلی است که در آن یک حلقه با ضخامت دیواره زیاد، تحت عملیات نورد قرار می گیرد. در نتیجه این فرایند، ضخامت حلقه کاهش می یابد. بدیهی است که با کاهش ضخامت حلقه، قطر آن افزایش خواهد یافت. طرح شماتیک این فرایند در شکل ۳-۴۸ ارائه شده است.



شکل ۳-۴۸ طرح شماتیک فرایند نورد حلقوی. (a) قبل از نورد (b) بعد از نورد.



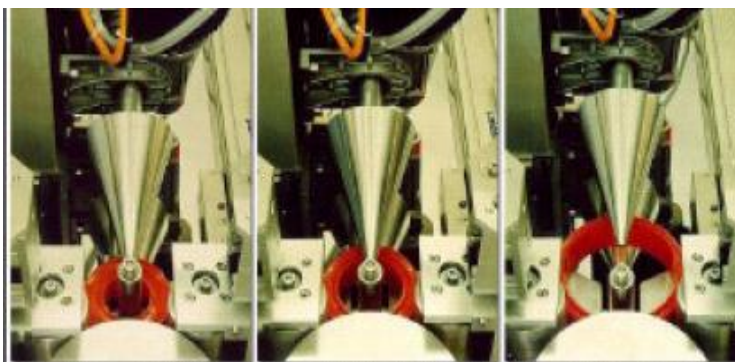
طرح دیگری از فرایند نورد حلقوی به همراه برخی هندسه های قابل تولید بوسیله آن در شکل ۳-۴۹ نشان داده شده است.

شکل ۳-۴۹ (a) فرایند نورد حلقوی (b) هندسه های قابل تولید.

نورد حلقوي به دو صورت داغ و سرد انجام مي شود. فرايندهاي نورد حلقوي داغ بيشتر براي قطعات حجيم مورد استفاده قرار مي گيرند. حال آنکه مطابق انتظار، فرايندهاي نورد حلقوي سرد بيشتر به منظور شكل دهی رينگهاي كوچك کاربرد دارند. شكلهاي ۳-۵۰ و ۳-۵۱ به ترتيب نمونه هايي واقعي از فرايندهاي نورد حلقوي داغ و سرد را نمايش مي دهند. تفاوت اندازه قطعات به صورت محسوسي نمايان است.



شكل ۳-۵۰. فرايند نورد حلقوي داغ



شكل ۳-۵۱. فرايند نورد حلقوي سرد.

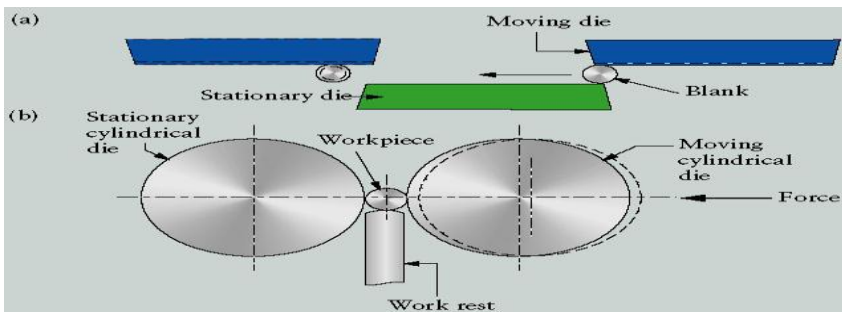
اين فرايند براي توليد طوقه بلبرينگها و رولربرينگها ( مطابق شكل ۳-۵۲ ) ، همچنين چرخهاي فولادي قطار، مخازن تحت فشار و ادوات دوار ماشين الات به كار ميرود.



شكل ۳-۵۲. توليد طوقه بلبرينگها و رولربرينگها.

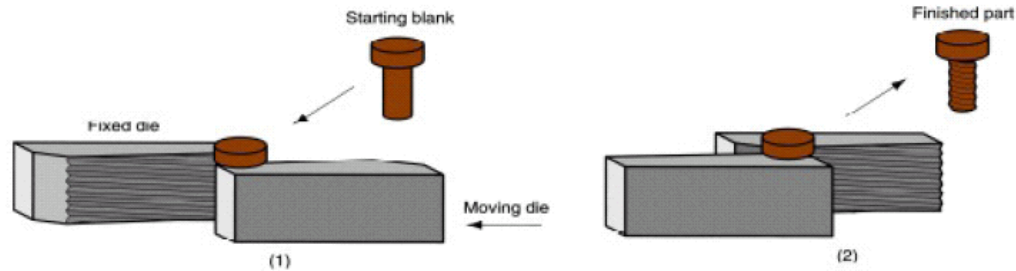
## ۱۲- فرايندهاي نورد رزوه زني (Thread-Rollin Processes)

نورد رزوه زني نوعي فرايند شكل دهی حجمي است که به منظور ايجاد رزوه روي قطعات استوانه ابي شکل و از طريق نورد انها بين دو قالب مورد استفاده قرار مي گيرد. همانگونه که در شكل ۳-۵۳ نشان داده شده است قالبها ممکن است تخت يا غلطي باشند. نورد رزوه زني يك تکنیک تجاري متداول براي توليد انبوه پيچ ها مي باشد.



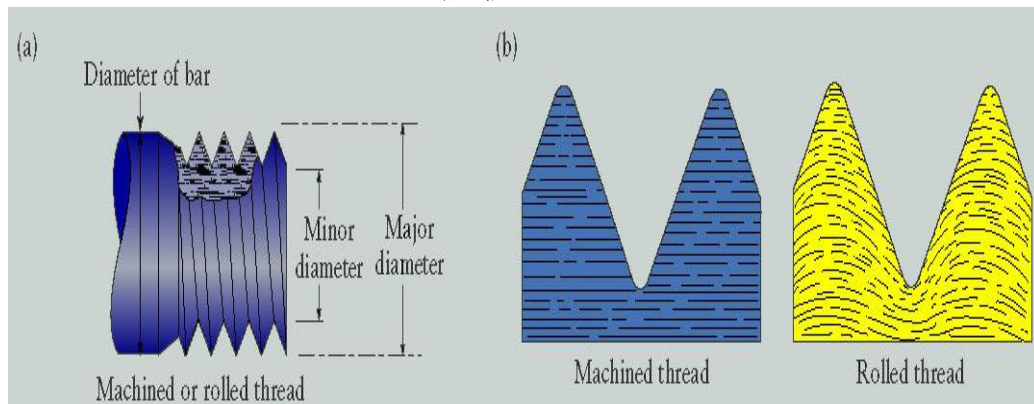
شکل ۳-۵۳. فرایندهای نورد رزوه زنی (a) قالب تخت (b) قالب غلطکی

شکل ۳-۵۴ نحوه تولید یک پیچ در قالبهای نورد رزوه زنی تخت را نشان می دهد.



شکل ۳-۵۴ (a) قبل از رزوه زنی (b) پس از رزوه زنی

رزوه زنی در این فرایند در مقایسه با رزوه زنی از طریق ماشینکاری امتیازاتی اساسی دارد که از آن جمله می توان به نرخ تولید بالاتر، به کاربردن بهتر ماده اولیه (صرفه جویی) و ایجاد دنده های مقاوم تر در نتیجه کارسختی اشاره نمود. شکل ۳-۵۵ قسمت b مقایسه ای میان خطوط جریان دانه ها در رزوه زنی از طریق ماشینکاری و رزوه زنی بوسیله نورد را ارائه می دهد. بر خلاف رزوه های ماشینکاری شده، رزوه های نورد شده دانه بندی منظم و ساختار یکنواخت و غیر متقاطع دارند که در نتیجه فرایند کار سرد اعمال شده بوده و به بهبود خواص مکانیکی می انجامد.

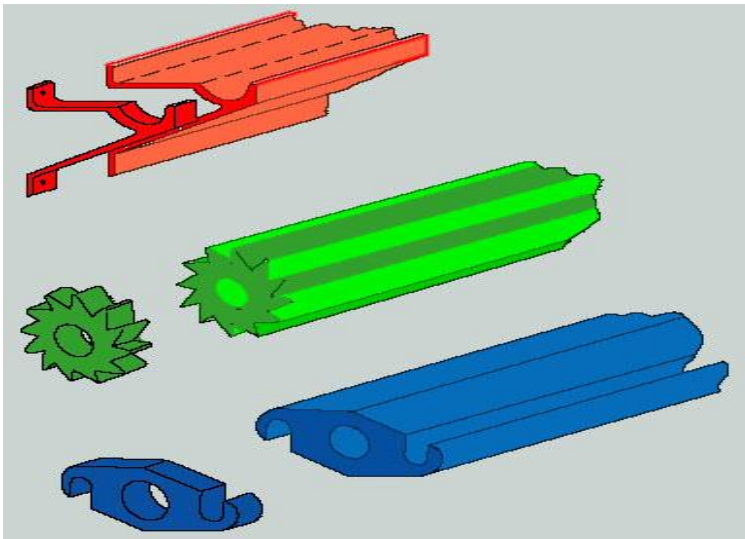


شکل ۳-۵۵ (a) طرح شماتیک یک پیچ (b) مقایسه خطوط جریان دانه ها.

### ۱۳- اکستروژن یا روزنرانی ( Extrusion )

اکستروژن یک فرایند شکل دهی فشاری است که در آن قطعه کار چنان تحت فشار قرار می گیرد تا در فضای خالی قالب جریان یابد و شکل مورد نظر در مقطع عرضی آن ایجاد گردد. در واقع اکستروژن تکنیکی است که در آن می توان قطعات و شکلهایی را تولید کرد که احتمالاً با هر روش ساخت دیگر غیرممکن می باشد. تعدادی از میله ها، لوله ها و هندسه های پیچیده اکستروژن شده در شکل ۳-۵۶ ارائه شده اند.

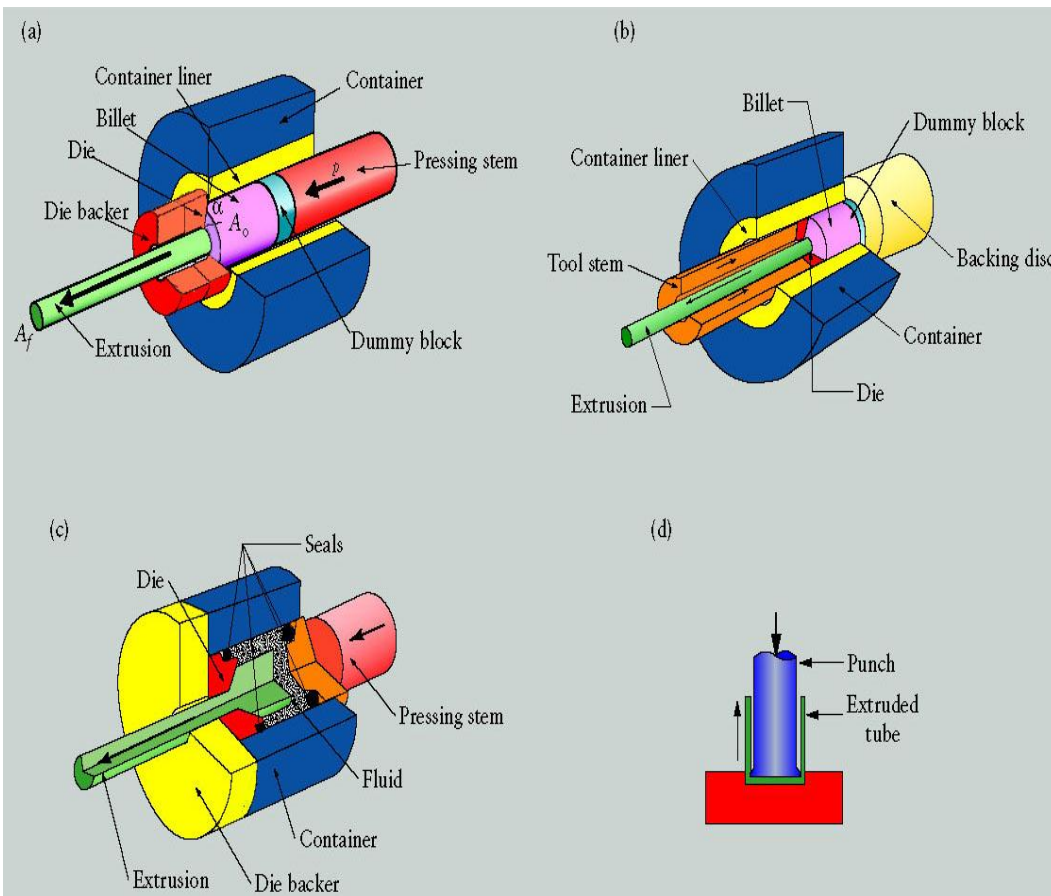
شکل ۳-۵۶. مثالهایی از محصولات اکستروژن شده



در اکستروژن، یک شمشال با مقطع مدور را وارد استوانه ای جدار ضخیم نموده و تحت فشار قرار می دهند. سپس این فلز تحت تاثیر نیروی زیاد وارد محفظه شکل دهی شده و نهایتاً شکل مطلوب را به خود می گیرد. آلومینیوم، روی، سرب و قلع به صورت متداول اکستروژن می شوند. بعضی فولادها نیز قابلیت

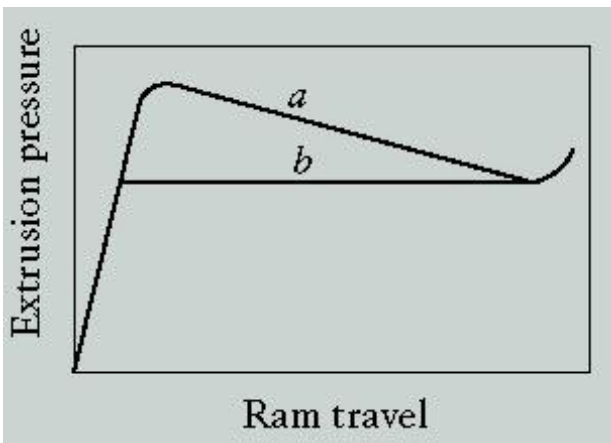
اکستروژن شدن را دارا هستند اما محدودیت عمده در اکستروژن فولاد، دماهای بالای مورد نیاز برای شکل دهی است که مواد پوششی ویژه ای را برای قالب و حدیده می طلبد. فولاد گرم را اکستروژن در شیشه پودر شده نورد میکنند و اجازه می دهند تا شیشه ذوب شده و به صورت یک ماده روانکار از سائیده شدن حدیده جلوگیری کند. در شکل ۳-۵۷ طرح شماتیک

انواع فرایندهای اکستروژن نشان داده شده است.



شکل ۳-۵۷. طرح شماتیک انواع فرایندهای اکستروژن.  
 (a) اکستروژن مستقیم  
 (b) اکستروژن غیر مستقیم  
 (c) اکستروژن هیدرواستاتیک  
 (d) اکستروژن ضربه ای.

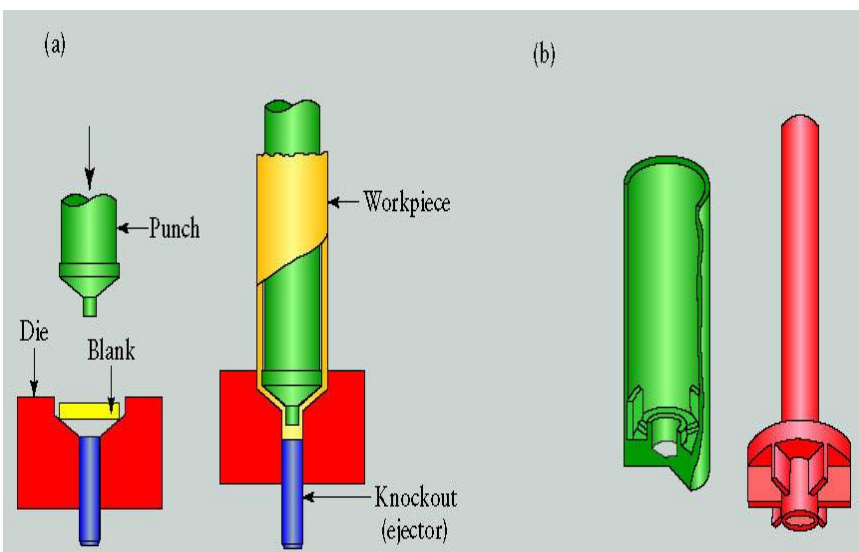
در اکستروژن مستقیم جهت حرکت ماده هم جهت با کوبه پرس می باشد. در این تکنیک شمشال نسبت به دیواره سیلندر می لغزد. در نتیجه این عمل نیروی اصطکاکی بزرگی ایجاد می شود که فشار مورد نیاز سنبه را بطور قابل توجهی افزایش می دهد. قطعه کف بند فولادی ( dummy block ) برای محافظت از سنبه در مقابل آسیبهای ناشی از فشار و گرما به کار می رود. اکستروژن غیر مستقیم در مقایسه با اکستروژن مستقیم نیروی به مراتب کمتری را نیاز دارد. در این روش جهت جریان ماده در خلاف جهت کوبه پرس می باشد. در واقع در اکستروژن غیر مستقیم، از آنجا که شمشال نمی لغزد بنابراین بخش عمده



ایبی از اصطکاک دیواره جانبی کم می شود. نمودار فشار بر حسب پیشروی کوبه پرس در شکل ۳-۵۸ ارائه شده است. همانگونه که قابل استنباط است فشار در اکستروژن مستقیم بالاتر است.

شکل ۳-۵۸. نمودار فشار بر حسب پیشروی کوبه پرس در اکستروژن (a) اکستروژن مستقیم (b) اکستروژن غیر مستقیم.

در اکستروژن هیدرواستاتیک اصطکاک دیواره جانبی با جدایش شمشال از هر دو دیواره سیلندر و سنبه و اعمال نیرو از طریق سیال هیدرولیک حذف می شود. مطابق شکل ۳-۵۹-a به منظور کاهش هزینه های تولید ظروف جدار نازک مثل لوله های

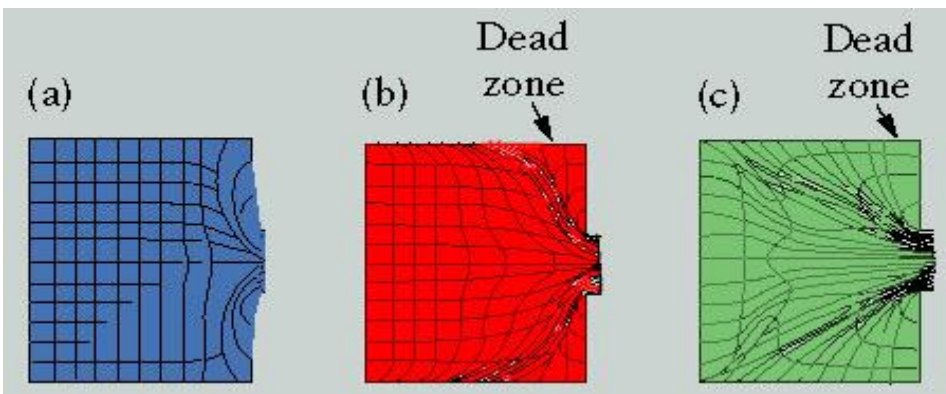


خمیرندان اکستروژن ضربه ایی را مورد استفاده قرار می دهند. در اکستروژن ضربه ایی که معمولاً به صورت سرد انجام می شود، قطعه فلزی را در یک حدیده قرار داده و سپس با حرکت سریع سنبه آنرا متراکم می کنند. فلز فضایی حدیده را پر می کند و انگاه بین دیواره حدیده و سنبه جریان یافته ، یک لوله جدار نازک را بوجود می آورد. نمونه هایی از هندسه های قابل تولید در اکستروژن ضربه ایی در شکل ۳-۵۹-b نشان داده شده اند.

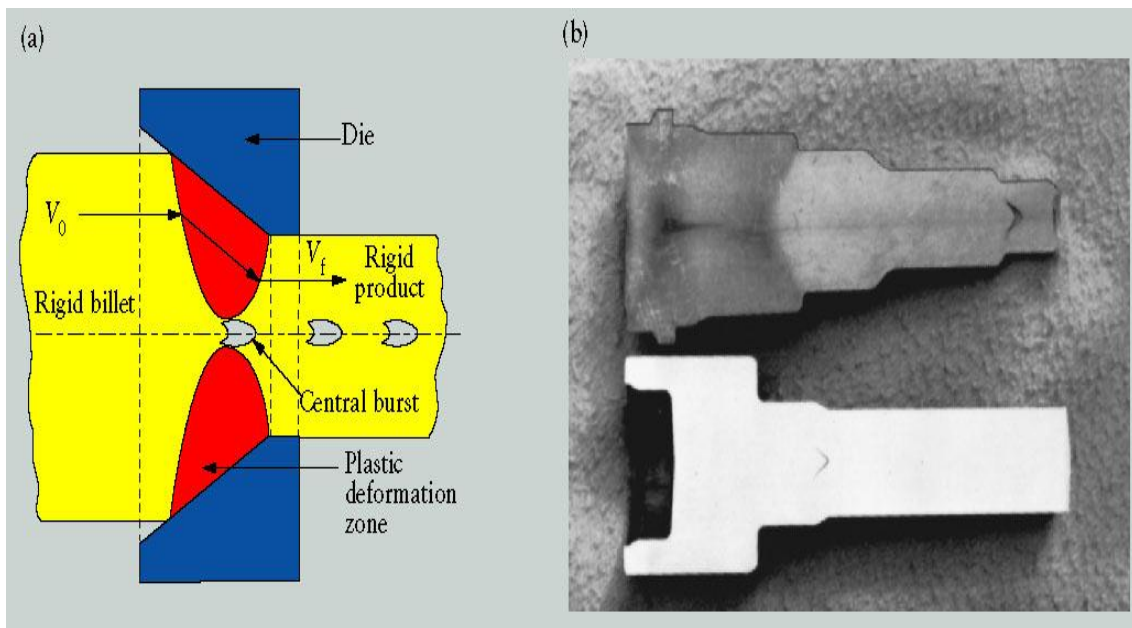
شکل ۳-۵۹-a) اکستروژن ضربه ایی (b) نمونه هایی از هندسه های قابل تولید .

در اکستروژن سرد میتوان به کیفیت سطح عالی و خواص مکانیکی مناسب دست یافت. در واقع اکستروژن سرد موجب ایجاد ساختار ریز دانه مترکم که دارای درجه بالایی از دانه های موازی با محور اکستروژن است می گردد. در نتیجه خواص کششی بسیار عالی در جهت محور اکستروژن قابل حصول است. جنس ماده اکستروژن و روغنکاری نقش بسیار مهمی در چگونگی جریان فلز یازی می کنند. با افزایش اصطکاک تغییر شکل فلز غیر یکنواخت می شود. حالتیهای مختلفی از جریان ماده در اکستروژن مستقیم در شکل شماتیک ۳-۶۰ نشان داده شده اند.

شکل ۳-۶۰. حالتیهای مختلف جریان ماده در اکستروژن مستقیم.

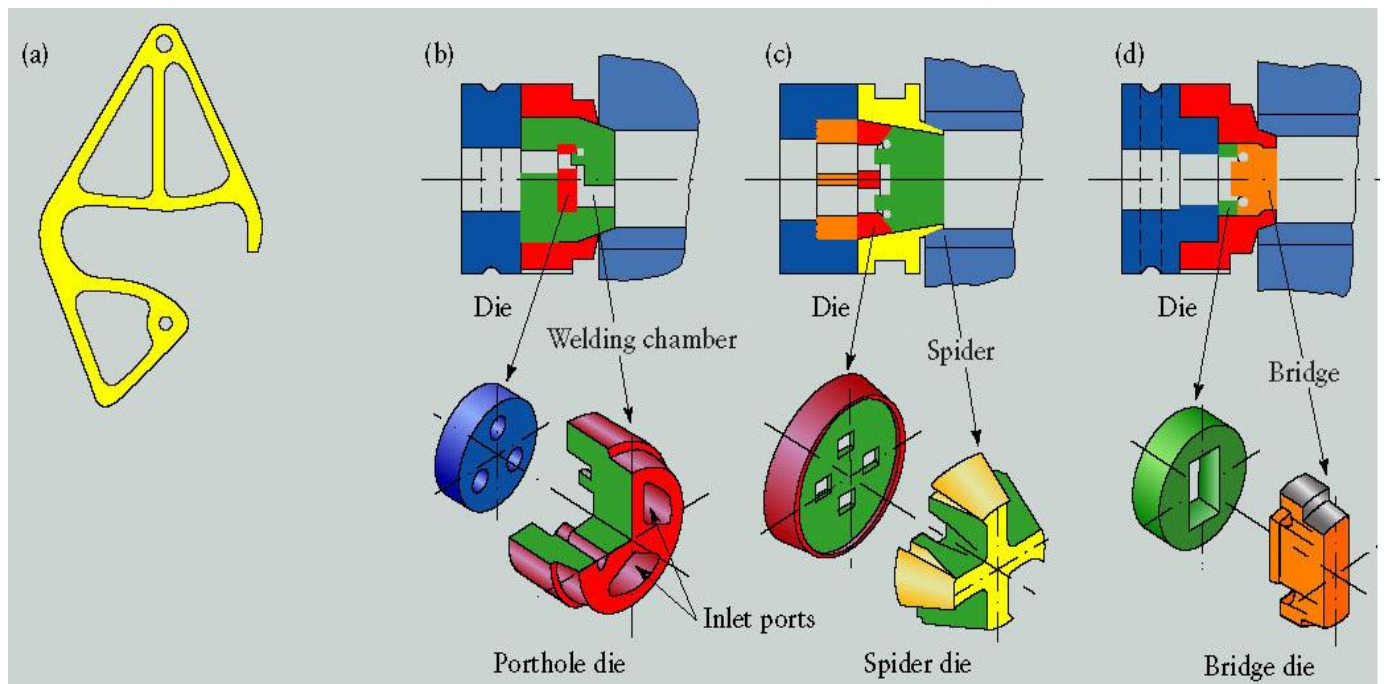


در اکستروژن مستقیم حرکت مرکز شمشال به طرف سوراخ حدیده سریعتر از حرکت ماده به طرف جداره ها است. در نتیجه نزدیک انتهای اکستروژن سطح خروجی، شمشال از درون حدیده شروع به جریان می کند و نقصی ایجاد می کند که در شکل ۳-۶۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶۱. نمایش نقص موسوم به عیب اکستروژن

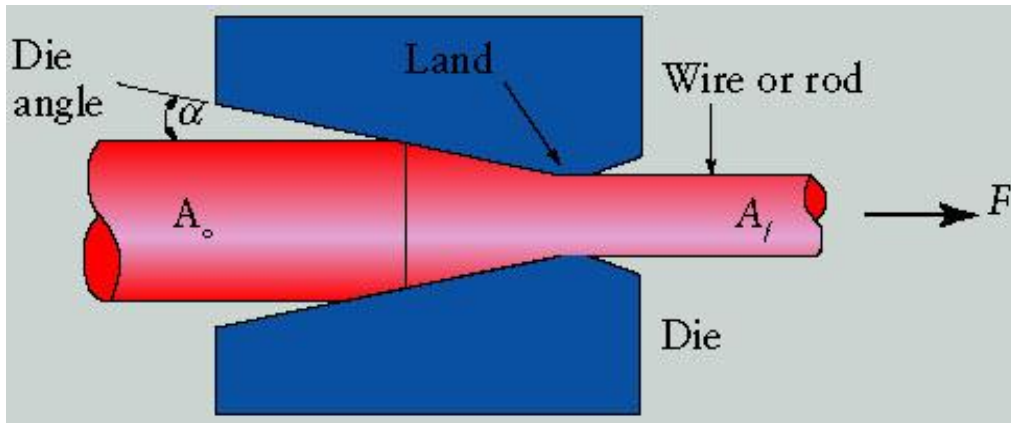
طرح شماتیک تولید چند نمونه شکل پیچیده در فرایند اکستروژن در شکل ۳-۶۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۶۲. طرح شماتیک تولید چند نمونه شکل پیچیده در فرایند اکستروژن

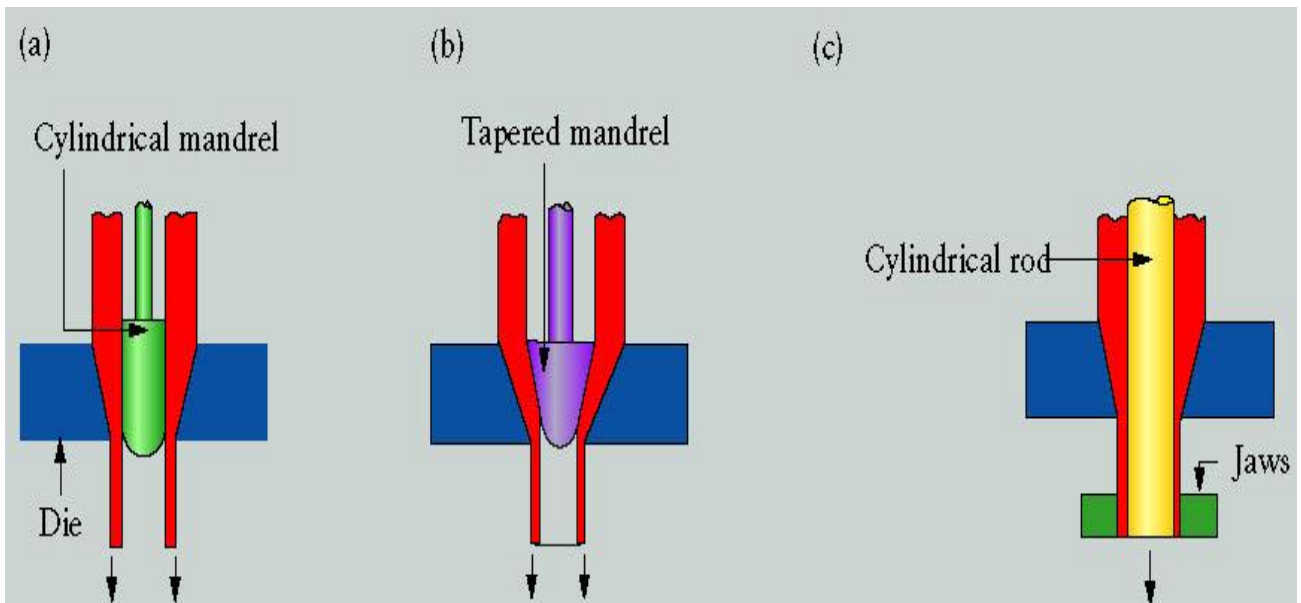
#### ۱۴- کشیدن (Drawing)

کشیدن فرایندی است که برای تولید مفتولهای فلز ورقی و قطعات ورقی انحنا دار مرکب به کار می رود. لوله های بدون درز، ماهی تابه ها، ظروف حلبی، قطعات سقف اتومبیل و پوکه های فشنگ نمونه هایی از قطعات تولیدی در این فراینداند. طرح شماتیک و مهمترین متغیرهای فرایند کشیدن در شکل ۳-۶۳ ارائه شده اند.



شکل ۳-۶۳. طرح شماتیک و مهمترین متغیرهای فرایند کشیدن

طرح شماتیک فرایند کشیدن لوله ها در شکل ۳-۶۴ ارائه شده است.



شکل ۳-۶۴. طرح شماتیک فرایند کشیدن لوله ها.

ای کاش یاد بگیریم که زیر بارهای خمشی و پستی

زندگی نقطه تسلیم را بالا بگیریم و مقاومت

سگست را حد اکثر کنیم تا چرخ دنده های زندگیمان

از لهیدگی و تداخل در امان باشد.

[WWW.USS.VCP.IR](http://WWW.USS.VCP.IR)