

فصل اول: طراحی فرآیند ساخت

کارگاه آموزشی طراحی فرآیند ساخت

طراحی فرآیند ساخت



طراحی فرآیند ساخت عبارت از تعیین جزئیات فرآیندهای لازم برای تبدیل نقشه طراحی مهندسی به عصول نهایی میباشد.

دانشکده مهندسی
مکانیک دانشگاه صنعتی
امیرکبیر

مقدمه

پس از اتمام مرحله طراحی یک محصول، نوبت به تصمیم‌گیری در مورد نحوه ساخت آن می‌رسد و در این راه اولین وظیفه طراح عبارت از طراحی فرآیند ساخت می‌باشد. طراحی فرآیند نوعی نقشه راه است که باید برای تغییر شکل مواد خام به قطعات تمام شده، دنبال بشود. این امر با آنالیز هر یک از جزئیات نقشه قطعه، با در نظر گرفتن شرایطی که برای ساختن آن صورت می‌گیرد، آغاز می‌شود.

طراحی فرآیند ساخت در قالب یک سری فرم‌های مشخص که تحت عنوان برگه‌های فرآیند^۱ شناخته می‌شوند، انجام می‌شود. برگه فرآیند عبارت از لیستی است که عملیات‌های ساخت و ماشین آلات مرتبط با هر عملیات در فرآیند ساخت، در آن قید شده است. بنابراین طراحی فرآیند ساخت یک مرحله اساسی در روند توسعه یک محصول بوده و تنها پس از تدوین نهایی آن است که می‌توان ابزار تولیدی از قبیل جیگ‌ها، فیکسچرها، ابزارهای خاص و غیره را طراحی کرد.

با گذشت زمان که ماشین آلات و فرآیندهای نوین ساخت توسعه می‌بایند، طراحی فرآیند نیز دچار تغییراتی می‌شود. بنابراین طراحی فرآیند یک فعالیت دینامیک می‌باشد. از طرف دیگر توجه روز افزون به کاهش هزینه‌ها نیز این نیاز را فراهم کرده که طرح‌های ساخت به طور مستمر به روزرسانی شوند تا در نهایت هزینه‌ها کاهش یابند.

۱-۱- طراحی فرآیند ساخت

طراحی فرآیند ساخت عبارت از فعالیتی در یک مجموعه تولیدی است که هدف از آن، این است که تعیین کند چه فرآیند ماشین‌کاری و چه پارامترهایی برای تبدیل یک قطعه کار از فرم اولیه آن (قطعه خام) به یک فرم نهایی که توسط یک نقشه مهندسی تعیین شده، بایستی مورد استفاده قرار بگیرد. طراحی فرآیند یک وظیفه معمول در کارگاه‌های تولیدی کوچک و همچنین صنایع و کارخانجات بزرگ می‌باشد.

اجرای طراحی فرآیند ساخت مشتمل بر طی نمودن مراحل زیر می‌باشد:

- انتخاب فرآیندها و ابزار
- انتخاب ماشین ابزار و سایر تجهیزات ساخت
- تعیین توالی عملیات‌ها
- گروه‌بندی عملیات‌ها
- انتخاب تجهیزات نگه دارنده قطعه و سطوح مبنا
- انتخاب وسایل اندازه‌گیری
- تعیین ترانس‌های تولیدی
- تعیین شرایط ماشینکاری مناسب
- تعیین زمان‌های ماشین‌کاری و زمان‌های غیرماشینکاری (زمان تنظیم، زمان بازرسی) برای هر عملیات

• ویرایش برگه فرآیند

در نهایت کلیه اطلاعات فوق در قالب یک مجموعه که طرح فرآیند ساخت نامیده می‌شود، مستند خواهد شد. طرح فرآیند ممکن است تحت عناوینی از قبیل برگه عملیاتی^۱، نقشه راه^۲ و یا برگه طرح ریزی عملیات^۳ نیز نامیده شود. این چنین طرحی در واقع دربردارنده دستورالعمل و نحوه ساخت قطعه مورد نظر می‌باشد. در شکل (۱) نمونه‌ای از برگه‌های عملیاتی نشان داده شده است.

| PART NUMBER : 610 415 3426 | | | | MATERIAL: FG 200 | | | | | |
|----------------------------|--------------------|----------------|--|-------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| PART NAME | PIN | | | Tool Tip Tool holder | Cutting Speed m/min | Spindle Speed rpm | Feed/ Feed Rate | Set Up Time min | Process Time min |
| 01 | HOC CC Drill | CNC LATHE | | | | | | | |
| 02 | Drill | CNC LATHE | | | | | | | |
| 03 | Face & Turn | CNC LATHE | | | | | | | |
| 04 | Grooving | CNC LATHE | | | | | | | |
| 05 | HOC | CNC LATHE | | | | | | | |
| 06 | HOC | CNC GRINDER | | | | | | | |

HOC: HOLD ON CHUCK
CC : CENTRE DRILL

شکل (۱) نمونه‌ای از برگه‌های عملیاتی.

۱-۲- سیستم سنتی طراحی فرایند ساخت

در سیستم‌های سنتی ساخت، طرح فرآیند توسط مهندس طراح فرآیند تدوین می‌شود. این امر نیازمند صرف زمان قابل ملاحظه بوده و علاوه بر آن نیازمند صرف مطالعات دقیق به منظور تفسیر نقشه و مسیر راه برای هر قطعه جدید می‌باشد. در عین حال، هر مهندس نظرات خاص خود را در زمینه بهترین شرایط تولیدی دارد. به همین ترتیب توالی عملیات‌های پیشنهادی توسط مهندسین مختلف نیز متفاوت خواهد بود. طراحی فرآیند ساخت کارا نیازمند استفاده از طراحان فرآیند با تجربه می‌باشد.

² - Operation Sheet

³ - Route Sheet

⁴ - Operation Planning Sheet

طراحی فرایند ساخت

دانش عبارت از انباشته شدن تجارب بشر می‌باشد. حتی در حال حاضر نیز بسیاری از فعالیت‌های طراحی فرآیند ساخت هنوز هم بر اساس تجربه طراحان زیبده استوار هستند. در عین حال این امر با مشکلاتی همراه می‌باشد:

- تجربه در طول یک بازه زمانی جمع می‌شود.
- تجربه ممکن است با دانش کنونی ما در تنافض باشد.
- چنانچه فرآیندی جدید باشد، هیچگونه تجربه‌ای در رابطه با آن در دسترس نخواهد بود.

بنابراین به دلیل مسایلی که در بالا به آن اشاره شد، ضروری است که به دنبال راههای کارآمدتری باشیم که بتوانند در فراهم آوردن یک بانک اطلاعاتی بهتر و اتخاذ تصمیمات مناسب تر، به سیستم‌های کامپیوتری کمک کنند.

۳-۱- سیستم‌های کامپیوتری طراحی فرایند ساخت

به دلیل مسایلی که در روش دستی تهیه فرآیند ساخت وجود دارد، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در جهت توسعه نرم افزارهای تدوین طرح فرآیند ساخت صورت گرفته است. در این مسیر عمدۀ تلاش‌ها بر این نکته معطوف بوده که با استفاده از یک سری اصول منطقی، ملاک‌ها و تجارب، وظیفه تدوین طرح فرآیند ساخت را به کامپیوتر محول کنند. چنین نرم افزاری قادر خواهد بود که بر اساس مشخصات قطعه مورد نظر، به صورت خودکار طرح فرآیند ساخت را تدوین کند. طرح تدوین شده توسط سیستم‌های کامپیوتری طرحی منطقی، پایدار و احتمالاً بهینه بوده و مزایای دیگری به شرح زیر خواهد داشت:

- سطح مهارت مورد نیاز برای طراحی فرآیند ساخت را کاهش می‌دهد.
- زمان و هزینه مورد نیاز برای طراحی فرآیند ساخت را کاهش می‌دهد.
- طرح فرآیند تدوین شده پایدارتر خواهد بود.
- افزایش بهره وری را به دنبال خواهد داشت.

در حالت کلی می‌توان رویکردهای موجود در زمینه طراحی فرآیند ساخت به کمک کامپیوتر را به دو دسته کلی سیستم‌های بازیاب^۵ و سیستم‌های مولد^۶ تقسیم‌بندی نمود.

۱-۳- طراحی فرآیند ساخت به کمک سیستم‌های بازیاب

یک سیستم بازیاب طراحی فرآیند ساخت از تشابه موجود بین قطعات مختلف، برای بازیابی طرح‌های موجود استفاده می‌کند. در حالت کلی یک طرح فرآیند که بتوان آن را برای خانواده‌ای از قطعات مورد استفاده

⁵ - Variant

⁶ - Generative

قرار داد، طرح فرآیند استاندارد نامیده می‌شود. یک طرح فرآیند استاندارد با شماره خانوادگی و یک کلیدواژه ذخیره می‌شود.

در حالت کلی یک سیستم بازیاب طراحی فرآیند ساخت، دو مرحله عملیاتی دارد:

- ۱- مرحله آماده سازی
- ۲- مرحله تولیدی

در طول مرحله آماده سازی، قطعات موجود کدبندی شده، دسته‌بندی می‌شوند و در قالب یک سری خانواده، گروه‌بندی می‌گردند. این فرآیند با خلاصه کردن طرح‌هایی که قبلًاً آماده شده برای قطعات موجود در هر خانواده آغاز می‌شود، شکل (۲).

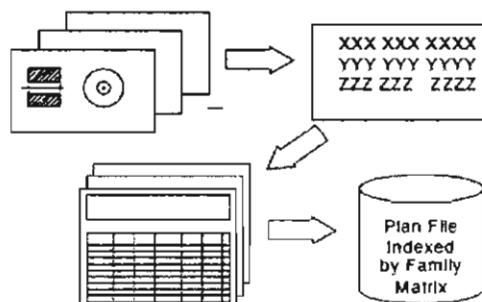


Fig. 9.9 Process Family Matrix

شکل (۲) نمایش روند مرحله آماده سازی.

مرحله دوم، مرحله عملیاتی است و وقتی که سیستم برای ساخت آماده باشد، اجرا می‌شود. در این مرحله قطعه ورودی کدبندی شده و سپس کد ایجاد شده برای یافتن خانواده قطعات مرتبط با آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از یافتن خانواده قطعه از شماره خانوادگی آن، برای بازیابی طرح فرآیند استاندارد مربوطه استفاده می‌شود، شکل (۳).

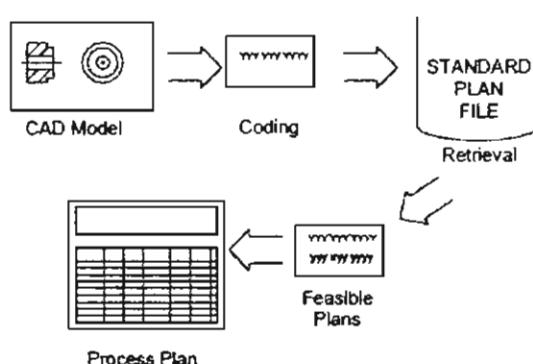


Fig. 8.10 Part Search and Retrieval

شکل (۳) نمایش روند مرحله عملیاتی.

۱-۳-۲- طراحی فرآیند ساخت به کمک سیستم‌های مولد

سیستم مولد در طراحی فرآیند ساخت به سیستمی اطلاق می‌شود که قادر است طرح فرآیند ساخت یک قطعه جدید را به صورت خودکار تدوین نماید. در چنین سیستمی طرح فرآیند تنها با استفاده از اطلاعات موجود و بدون دخالت انسانی تدوین می‌شود. بدین ترتیب پس از دریافت مدل طراحی، سیستم عملیات‌های مختلف و چیدمان آنها را برای قطعه مورد نظر آماده می‌کند. در این گونه سیستم‌ها ضروری است که دانش ساخت به نحوی در داخل یک بسته نرم افزاری کارآمد، گنجانده شود. در شکل (۴) نمونه‌ای از خروجی یک چنین سیستمی نشان داده شده است.

Table 9.1 Format of Manufacturing Sequence

| Serial Number | Machine | Operation Description/ Assembly Operations | Set Up Time | Production Time | Tool | Cutting Speed m/min | Feed/ Feed rate | rpm | Number of cuts/ Passes |
|---------------|-----------|---|-------------|-----------------|----------|------------------------|-----------------|------|---------------------------|
| 04 | CNC Lathe | Turning | - | 2 | P40 | 240 | 0.5mm/ rev. | 1400 | 4 |
| 05 | " | Drilling | - | 0.2 | BW Drill | 200 | 0.2mm/ rev. | 2200 | 1 |

شکل (۴) اطلاعات مربوط به خروجی یک سیستم کامپیوتری طراحی فرآیند ساخت.

فصل دوم: تفسیر نقشه های مهندسی

کارگاه آموزشی طراحی فرآیند ساخت

طراحی فرآیند ساخت



به طور کلی مهمترین پارامتر ورودی در سیکل طراحی فرآیند ساخت یک عضول عبارت از نقشه قطعه طراحی بوده و بنابراین اولین گام برای مهندس طراح فرآیند عبارت از تفسیر نقشه قطعه مورد نظر می‌باشد. از طرف دیگر تفسیر نقشه نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد نمادها و استانداردهای مهندسی مرتبط با هر دوی تلرانس‌های هندسی و ابعادی و هچنین جزئیاتی راجع به خواه غاییش پارامترهای صافی سطح می‌باشد.

دانشکده مهندسی
مکانیک دانشگاه صنعتی
امیرکبیر

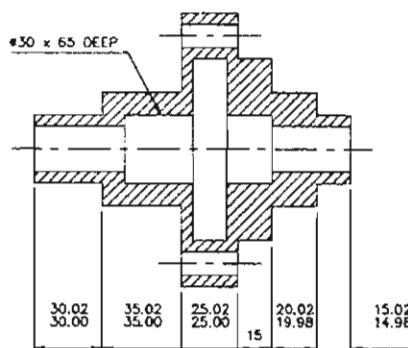
توصیف ویژگی های هندسی و ابعادی هر قطعه به واسطه نقشه آن صورت می‌گیرد؛ به بیان دیگر نقشه قطعه کار وسیله‌ای است برای بیان آنچه طراح در ذهن می‌پروراند و این اطلاعات را بی هیچ ابهامی در اختیار مهندس فرایند و دیگر کسانی که به نحوی در تولید قطعه نقش دارند، قرار می‌دهد. در این میان طراح برای بیان ریزه کاری های طرح خود از ابزاری نیرومند با عنوان اندازه گذاری و تلرانس دهی بهره می‌جويد.

اصلًا تولید یک قطعه با ابعادی دقیقاً منطبق با ابعاد نقشه غیر ممکن است و از این رو محدوده‌ای برای تغییرات مجاز هر بعد پذیرفته می‌شود، این تغییرات مجاز تلرانس نامیده می‌شود. بنابراین قطعات می‌توانند خطای ابعادی داشته باشند اما، این خطأ تا زمانی قابل قبول است که بعد مورد نظر همچنان در محدوده مجاز قرار داشته باشد. این محدوده مجاز باند تلرانسی نامیده می‌شود.

۱-۲- تلرانس های ابعادی

۱-۱- نحوه نمایش

در حالت کلی بیان مقدار تلرانس متناظر با یک بعد به دو روش صورت می‌گیرد: در حالت نخست مستقیماً حدود بالا و پایین بعد مورد نظر، عدد بزرگتر در بالا، نمایش داده می‌شوند، شکل (۱).



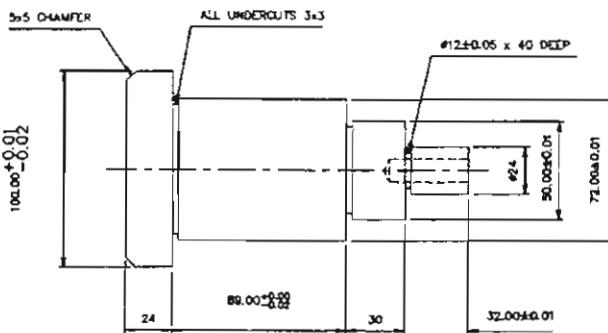
شکل (۱) محدوده تلرانس مستقیماً با حدود بالا و پایین بعد مورد نظر نشان داده شده.

در روش دیگر محدوده تغییرات مجاز بعد را با استفاده از یک مقدار عددی و دو حد تلرانسی نشان می‌دهند، شکل (۲). در رابطه با حالت اخیر تعاریف زیر مطرح می‌شوند:

تلرانس یک طرفه^۱؛ به حالت تلرانسی اطلاق می‌شود که در آن تغییرات نسبت به بعد مورد نظر فقط در یک جهت، کاهش یا افزایش، مجاز شمرده می‌شود.

^۱ - Unilateral Tolerance

تلرانس دو طرفه^۲؛ به حالت تلوانسی اطلاق می‌شود که در آن تغییرات نسبت به بعد مورد نظر در هردوی جهات، کاهش و یا افزایش، مجاز شمرده می‌شود. در صورتی که مقدار تغییرات در دو جهت یکسان باشد تلرانس را دو طرفه معادل و در غیر این صورت تلرانس را آزاد می‌گویند.



شکل (۲) محدوده تلرانسی با استفاده از یک مقدار عددی و دو حد تلرانسی نشان داده شده.

نکته قابل توجه آن است که در رابطه با ابعادی که با استفاده از تلرانس‌های دو طرفه بیان می‌شوند در صورتی که ابعاد اینچی باشد دقت حدود از لحاظ تعداد ارقام اعشار یکسان است اما در نقشه‌های میلیمتری این الزام وجود ندارد.

۲-۱-۲- حدود و انطباقات^۳

به طور کلی همه محاسباتی که با هدف طراحی ابعاد و تلرانس‌های قطعات مونتاژی انجام می‌شوند یک هدف واحد را دنبال می‌کنند و آن عبارت از برآورده کردن خواسته‌هایی است که از عملکرد بهینه قطعات در مجموعه‌ای مونتاژی انتظار می‌رود. به بیان دیگر در مرحله نخست باید نحوه انطباق قطعات با یکدیگر مشخص باشد که این مساله مستقیماً به کارکرد موردنظر از انطباق مربوط می‌شود. پس از تعیین نوع انطباق می‌توان از دو سیستم عمده برای نشان دادن نحوه انطباق قطعات با یکدیگر استفاده کرد که در ادامه این بخش نحوه کاربرد و اصول مربوط به این سیستم‌ها بحث خواهد شد.

(۱) سیستم سوراخ مبنا

در این سیستم اندازه سوراخ ثابت نگه داشته شده و با تغییر در اندازه میله انواع مختلف انطباق حاصل می‌گردد. این سیستم از نقطه نظر ملاحظات اقتصادی نسبت به سیستم میله مبنا از ارجحیت بیشتری برخوردار می‌باشد. به بیان دیگر در سیستم سوراخ مبنا تنها با استفاده از یک ابزار تک لبه می‌توان اندازه میله را تغییر داده و انواع مختلفی از انطباقات را به دست آورد.

² - Unilateral Tolerance

³ - Limits and Fits

(۲) سیستم میله مبنا

در این سیستم اندازه میله ثابت نگه داشته شده و با تغییر در قطر سوراخ انواع مختلفی از انطباق حاصل می گردد. همچنین سیستم سوراخ مبنا به دلیل آنکه برای تغییر اندازه سوراخ به ابزارهای مختلف نیاز دارد، روشی بسیار پرهزینه می باشد. در عین حال، از این سیستم در مواردی که مجموعه ای از انطباقات در طول یک شفت بلند مورد نیاز بوده و یا در مواردی که درجه حرارت می تواند بر سوراخ هایی با اندازه بزرگتر تاثیر بگذارد، استفاده می شود.

صرف نظر از سیستم مبنای انتخابی، کلاس انطباقی که یک قطعه بر اساس آن ساخته می شود بستگی به کارکرد آن در مجموعه مونتاژی مورد نظر خواهد داشت. در حالت کلی، سه نوع اصلی انطباق وجود دارد:

الف- انطباق آزاد^۴: در این نوع انطباق اندازه میله به گونه ای ترانس گذاری می شود که در همه حالات از قطر سوراخ کوچکتر باشد. به بیان دیگر حد بالایی میله همواره کوچکتر از حد پایینی سوراخ بوده و لذا لقی به وجود آمده در این حالت امکان گردش میله در داخل سوراخ را فراهم می کند. از این نوع انطباق در یاتاقان های لغزشی و همچنین در مواردی که لازم است که یک قطعه در امتداد قطعه دیگر حرکت لغزشی داشته باشد، استفاده می گردد.

ب- انطباق پرسی^۵: در این نوع انطباق اندازه میله به گونه ای ترانس گذاری می شود که در همه حالات از قطر سوراخ بزرگتر باشد. به بیان دیگر حد بالایی میله همواره بزرگتر از حد پایینی سوراخ بوده و لذا تداخل به وجود آمده در این حالت امکان هر گونه گردش میله در داخل سوراخ را سلب می کند. بنابراین در این حالات برای جفت کردن قطعات از اعمال فشار و یا کاربرد درجه حرارت استفاده می شود. این نوع انطباق منجر به یک مونتاژ دائمی قطعات شده و از جمله کاربردهای آن می توان به انطباق پرسی بوشها و کوپلینگ ها اشاره کرد.

ج- انطباق عبوری^۶: در این نوع انطباق اندازه میله به گونه ای ترانس گذاری می شود که با فقط به میزان محدودی با سوراخ تداخل داشته باشد. میزان این تداخل به اندازه ای است که قطعات با حداقل فشار مونتاژ شده و یا از هم جدا می شوند. کاربردهای نمونه این نوع انطباق شامل بسته هایی از قبیل خارها، پین ها و همچنین قطعاتی است که برای مقاصد موقعیتی بر هم منطبق شده اند.

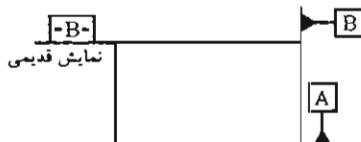
۲-۲- ترانس های هندسی

۱-۲-۲- مفاهیم پایه

^۴- Clearance Fit^۵- Interference Fit^۶- Transition Fit

۷ مینا

عبارت از یک نقطه، محور و یا صفحه بوده که به عنوان مبدأ برای اندازه‌گذاری موقعیت یا دیگر مشخصه‌های هندسی اجزای یک قطعه به کار می‌رود. محل مینا، با حرفي که درون یک کادر مربعی نوشته می‌شود و با یک مثلث توپر به یک قسمت از قطعه کار وصل می‌شود، مشخص می‌گردد، شکل (۳).



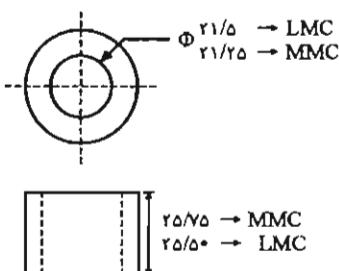
شکل (۳) محل های مینا، نقاط، محورها یا سطوح دقیقی هستند که قسمت های مختلف قطعه کار نسبت به آنها سنجیده می‌شوند.

توصیف گرهای شرایط مادی

در مواردی که لازم است عملیات کترلی بر روی یک فیچر اندازه صورت بگیرد، مشخصاً لازم است که تعیین شود که تحت چه شرایط مادی این عملیات کترل انجام می‌گردد. به عنوان مثال ناحیه تلرانسی محدود کننده موقعیت و یا وضعیت محور یک سوراخ بسته به اینکه سوراخ در ماکزیمم اندازه مجاز و یا در مینیمم آن قرار دارد، می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال چنانچه قطر سوراخ ماکزیمم مقدار مجاز خود را داشته باشد، ناحیه تلرانسی که می‌توان برای تغییرات تلرانس هم محوری قطعه جفت شونده با آن در نظر گرفت، افزایش خواهد یافت. در رابطه با شرایط مادی سه حالت زیر متصور است:

شرایط حداقل جرم^۴

شرایطی است که در آن، ابعاد قطعه، در محدوده تلرانسی، به گونه‌ای تعیین شده که قطعه دارای بیشترین جرم باشد. مثلاً قطر سوراخ‌ها در حداقل ممکن و قطر شفت در حداقل ممکن در نظر گرفته می‌شود. شرایط حداقل جرم را با نماد M که داخل یک دایره درج شده، نشان می‌دهند، شکل (۴).



شکل (۴) نمایش شرایط حداقل جرم و شرایط حداقل جرم در مورد یک استوانه توخالی.

^۷-Datum

^۸-Maximum Material Condition (MMC)

شرایط حداقل جرم^۹

شرایطی است که در آن، ابعاد قطعه، در محدوده تلرانسی، به گونه‌ای تعیین شده که قطعه دارای کمترین جرم باشد. مثلاً قطر سوراخ‌ها در حداکثر ممکن و قطر شفت در حداقل ممکن در نظر گرفته می‌شود. شرایط حداقل جرم را با نماد L که داخل یک دایره درج شده، نشان می‌دهند.

شرایط مستقل از اندازه^{۱۰}

چنانچه شرایطی مانند شرایط حداقل جرم برای یک بعد در نقشه درج نشده باشد، شرایط مستقل از اندازه حاکم خواهد بود.

اصل استقلال تلرانسی^{۱۱}

در نظر گرفتن تلرانس ابعادی و تلرانس هندسی به صورت همزمان، در هنگام آنالیز خطای تلرانس، بسیار پیچیده است. سازمان بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها در استاندارد ISO 8015 توضیح می‌دهد که اصل استقلال تلرانسی پایه‌ای ترین اصل در تلرانس‌گذاری به شمار می‌رود. این اصل بیان می‌کند که: «هر گونه شرایطی برای تلرانس‌گذاری هندسی یا ابعادی که بر روی یک نقشه مشخص شده است بایستی به صورت مستقل در نظر گرفته شود، مگر آنکه نوعی رابطه خاص مثل شرایط ماقریزم ماده، ذکر گردد».

۲-۲-۲- کاربرد تلرانس‌های وضعی و هندسی

نماد تعیین محل مبنا از یک کادر چهار گوش تشکیل شده است که داخل آن حرف مربوط به محل مبنا درج شده است. برای این نماد، از کلیه حروف انگلیسی به جز I و O استفاده می‌شود. نماد قدیمی مربوط به محل مبنا، یک حرف انگلیسی با دو خط تیره کوچک در داخل یک کادر مستطیلی نمایش داده می‌شود.

کادر تلرانس وضعی و هندسی برای نمایش میزان تلرانس هندسی، مثلاً تلرانس فرم یا موقعیت، نسبت به یک محل مبنا به کار می‌رود. در این کادر چند خانه وجود دارد که یکی از آنها نماد هندسی مربوطه، دیگری میزان عددی تلرانس و در خانه دیگر محل‌های مبنا درج می‌گردد. این کادر با یک خط فلش دار به قسمتی از قطعه کار یا خط اندازه‌گذاری آن قسمت وصل می‌شود. حروف مربوط به محل‌های مبنا در خانه‌های سمت راست

^۹-Least Material Condition (LMC)

^{۱۰}-Regardless of Feature Size Condition (RFC)

^{۱۱}-Principle of Tolerance Independence

طرزی فریند ساخت.

کادر قرار می‌گیرند و به ترتیب اولویت از چپ به راست خوانده می‌شوند. معمولاً محل‌های مبنای، سه صفحه عمود بر هم در نظر گرفته می‌شود، شکل (۵).

شکل (۵) نمونه‌ای از کاربرد کادر تلرانس هندسی.

۱-۲-۲-۲- تلرانس هندسی فرم

تلرانس‌های فرم، گروهی از تلرانس‌های هندسی هستند که برای کترول ویژگی‌هایی نظیر تخت بودن، مستقیم بودن، گرد بودن و استوانه‌ای بودن به کار می‌روند، شکل (۶).



شکل (۶) نمادهای مربوط به تلرانس‌های فرم.

تلرانس‌های فرم، تغییرات مجاز یک قسمت از قطعه کار را به تنهایی (نه نسبت به قسمت دیگر) نشان می‌دهند. تلرانس‌های فرم هنگامی استفاده می‌شوند که تغییرات فرم، کمتر از مقدار مجاز تلرانس ابعادی باشد.

(الف) تخت بودن

تخت بودن معیاری برای سنجش تغییرات نقاط یک سطح است که عمود بر آن سطح اندازه گیری می‌شود. تلرانس هندسی تخت بودن با دو صفحه موازی هم تعریف می‌شود که فاصله آنها به اندازه باند تلرانسی است و تمام نقاط سطح باید بین این دو صفحه قرار داشته باشند، شکل (۷).



شکل (۷) تلرانس هندسی تخت بودن

(ب) مستقیم بودن

طراحی فرآیند ساخت

تلرانس هندسی مستقیم بودن تعیین می کند که تا چه اندازه یک سطح به یک خط راست نزدیک است. این تلرانس، منطقه‌ای به عرض برابر با باند تلرانس در راستای یک خط راست را تعریف می کند، شکل (۸).



شکل (۸) تلرانس هندسی مستقیم بودن.

(ج) تلرانس گرد بودن

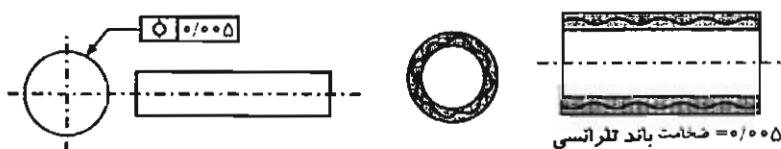
تلرانس هندسی گرد بودن در قطعات دور مانند استوانه یا مخروط و در یک سطح مقطع عمود بر محور دوران سنجیده می شود. این تلرانس منطقه‌ای محدود بین دو دایره هم مرکز را تعریف می کند که سطح محصور بین آنها عمود بر محور دوران قطعه قرار می گیرد و تمام اجزای سطح در این مقطع، باید در منطقه تلرانسی تعریف شده قرار گیرند. این تلرانس تنها در یک سطح مقطع از قطعه کار بررسی می شود، شکل (۹).



شکل (۹) تلرانس هندسی گرد بودن.

(د) استوانه ای بودن

تلرانس هندسی استوانه‌ای بودن یک سطح به این معنا است که به صورت ایده‌آل تمام نقاط واقع روی آن در فاصله‌ای مساوی نسبت به یک محور مرکزی قرار داشته باشند. بنابراین تلرانس هندسی استوانه‌ای بودن، قطر یک استوانه را در تمام طول آن مورد سنجش و ارزیابی قرار می دهد. منطقه تلرانسی، فضای بین دو استوانه هم مرکز با قطعه کار است که فاصله آنها به اندازه میزان تلرانس باشد و تمام سطح قطعه کار باید در این فضای قرار داشته باشند، شکل (۱۰).



شکل (۱۰) تلرانس هندسی استوانه ای بودن.

۲-۲-۲-۲-۲-۲-تلرانس‌های هندسی شکل

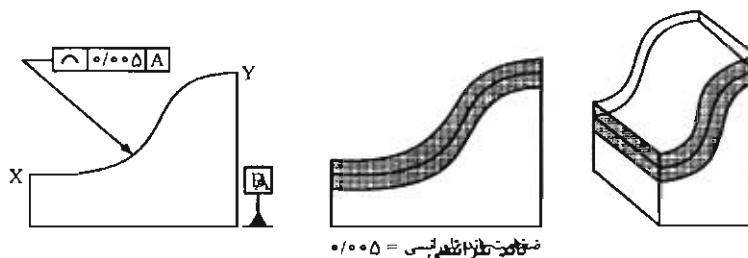
تلرانس‌های هندسی شکل، سطح شکل دار یک قطعه را کنترل می‌کنند. تلرانس‌های شکل همچنین می‌توانند شکل سطح مقطع یک قطعه را نیز کنترل نمایند. این تلرانس، محدوده‌ای به عرض مشخص که در راستای شکل مورد نظر قرار گرفته است را تعریف می‌کند که هر نقطه از سطح قطعه کار باید در این محدوده قرار بگیرد، شکل (۱۱).



شکل (۱۱) نمادهای تلرانس هندسی شکل.

(الف) تلرانس شکل یک خط

این تلرانس یک منطقه تلرانسی دو بعدی را تعریف می‌کند که در طول قطعه کار (و یا در طول سطح مقطع یک قطعه کار) قرار می‌گیرد، شکل (۱۲).



شکل (۱۲) تلرانس هندسی شکل یک خط.

(ب) تلرانس شکل یک سطح

تلرانس‌های هندسی شکل یک سطح، یک منطقه تلرانسی سه بعدی را تعریف می‌کند که تمام طول و عرض قطعه کار را پوشش می‌دهد. برای سنجش صحیح‌تر این تلرانس‌ها، معمولاً لازم است یک سطح مبنا نیز در نظر گرفته شود.

۳-۲-۲-۲-۲-۳- تلرانس‌های هندسی وضعیت

تلرانس‌های هندسی وضعیت، برای کنترل دقیق توازنی، تعامد و زاویه یک قسمت از قطعه کار نسبت به یک یا چند محل مبنا به کار می‌روند. سه نوع تلرانس هندسی وضعیت وجود دارد، شکل (۱۳).



شکل (۱۳) نمادهای تلرانس هندسی وضعیت.

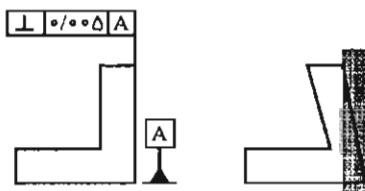
(الف) تلرانس دقت زاویه‌ای

تلرانس دقت زاویه‌ای برای بررسی وضعیت یک سطح یا محور از قطعه کار که با زاویه خاصی نسبت به یک محل مبدأ قرار گرفته است، به کار می‌رود. این زاویه باید به جز 90° باشد. تلرانس دقت زاویه‌ای با استفاده از دو سطح یا دو خط موازی با فاصله‌ای خاص تعریف می‌شود. خط، سطح یا محور مورد بررسی باید در این محدوده قرار بگیرد. تلرانس دقت زاویه‌ای محور یک سوراخ با استفاده از یک فضای استوانه‌ای که قطر آن به اندازه باند تلرانس است، تعریف می‌شود، شکل (۱۴).

شکل (۱۴) تلرانس هندسی دقت زاویه‌ای.

(ب) تلرانس هندسی تعامد

تلرانس هندسی تعامد یک منطقه تلرانسی را تعریف می‌کند که عمود بر یک محل مبدأ یا یک محور قرار می‌گیرد. این منطقه تلرانسی محدود به دو خط یا دو صفحه موازی و یا منطقه استوانه‌ای است. تمام نقاط واقع بر روی خط، سطح یا محور مورد بررسی، باید در این منطقه تلرانسی قرار گیرد، شکل (۱۵).

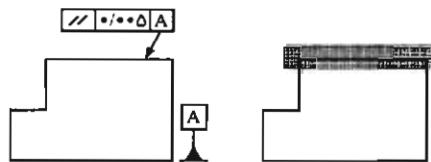


شکل (۱۵) تلرانس هندسی تعامد.

(ج) تلرانس هندسی توازی

تلرانس هندسی توازی مشخص می‌کند که یک جزء از یک خط یا سطح تا چه حد با یک محور یا صفحه مبدأ موازی است. تلرانس توازی یک منطقه تلرانسی را تعریف می‌کند که بین دو خط موازی با یک محل مبدأ قرار

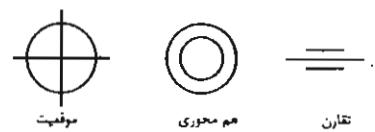
می‌گیرد. فاصله بین این دو خط به اندازه میزان تلرانس است و تمام اجزاء سطح یا خط باید در این منطقه قرار بگیرد، شکل (۱۶).



شکل (۱۶) تلرانس هندسی توازی.

۴-۲-۲-۲-۲-۲-۲ تلرانس‌های هندسی موقعیت

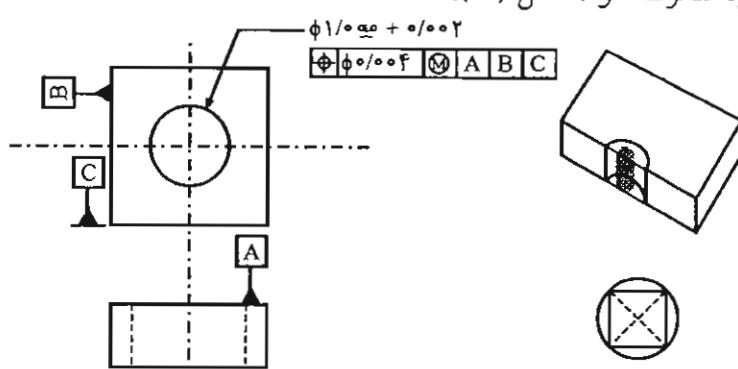
برای بررسی دقیق موقعیت یک شکل یا یک قسمت از قطعه کار از تلرانس هندسی موقعیت استفاده می‌شود. این تلرانس‌ها یک منطقه را تعریف می‌کنند که مرکز، محور مرکزی یا صفحه مرکزی یک شکل، می‌توانند در منطقه جایه‌جا شوند (نسبت به موقعیت حقیقی یا تئوریک). تلرانس‌های موقعیت از سه تلرانس هندسی موقعیت، هم محوری و تقارن تشکیل شده‌اند، شکل (۱۷).



شکل (۱۷) نمادهای تلرانس هندسی موقعیت.

(الف) تلرانس هندسی موقعیت

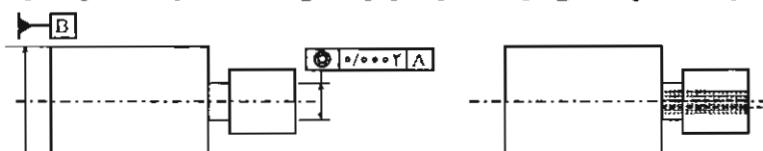
در اندازه‌گذاری یک نقشه، اندازه اصلی، موقعیت حقیقی یا تئوریک یک شکل را نسبت به یک محل مبنا یا یک شکل دیگر بیان می‌کند. تلرانس هندسی موقعیت نشان می‌دهد که این شکل تا چه حد می‌تواند نسبت به موقعیت تئوریک خود منحرف شود، شکل (۱۸).



شکل (۱۸)

(ب) تلرانس هم محوری

ارتباط بین محورهای دوران دو یا چند شکل استوانه‌ای را تعریف می‌کند. تلرانس هندسی هم محوری به صورت یک منطقه استوانه‌ای تعریف می‌شود. محور مرکزی این منطقه استوانه‌ای بر محور مبنای منطبق است،



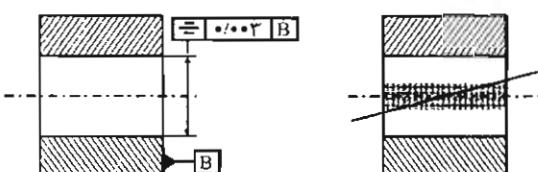
شکل (۱۹).

شکل (۱۹) تلرانس هم محوری.

با توجه به اینکه ارزیابی این تلرانس‌ها بر روی قطعات به صورت عملی، کار دشواری است، معمولاً از تلرانس هندسی لنگی به جای تلرانس‌های موقعیت استفاده می‌شود.

(ج) تقارن

تقارن به این معنا است که شکل قطعه کار در هر دو طرف صفحه مرکزی یا صفحه مبنای، یکسان و مساوی باشد. بنابراین تلرانس هندسی تقارن، یک منطقه را تعریف می‌کند که سطوح متقارن قطعه کار در این منطقه، با صفحه یا محور مبنای تعریف شده، هم‌استتا باشد، شکل (۲۰).



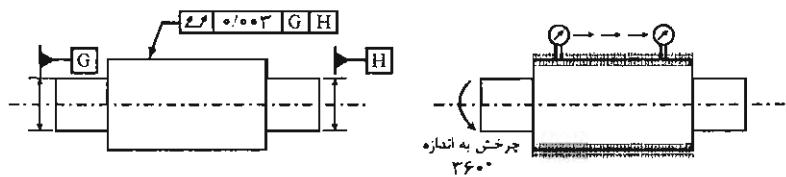
شکل (۲۰) تلرانس هندسی تقارن.

۵-۲-۲-۵- تلرانس‌های هندسی لنگی

در حالت کلی دو نوع تلرانس لنگی وجود دارد: لنگی موضعی و لنگی کلی. این تلرانس‌ها نشان‌دهنده میزان لنگی سطح یک قطعه کار دوار نسبت به یک محور مبنای باشد که بر روی سطح جانبی یا سطح پیشانی قطعه کار سنجیده می‌شود.

(الف) تلرانس لنگی کلی

تلرانس لنگی کلی میزان گرد بودن، مستقیم بودن، دقت زاویه‌ای و میزان استوانه‌ای بودن یک قطعه کار را در حالی که حول یک محور در حال گردش است، تعیین می‌کند. تمام نقاط سطح قطعه کار باید در منطقه تلرانسی مجاز قرار گرفته باشند، شکل (۲۱).

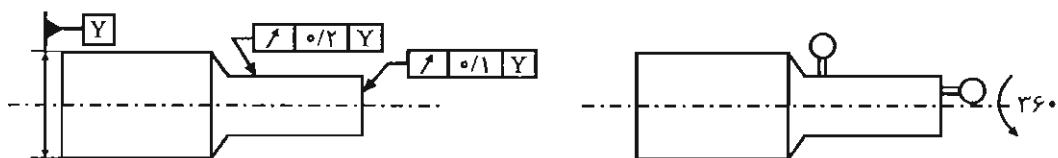


شکل (۲۱) تلرانس لنگی کلی.

(ب) لنگی موضعی

تلرانس لنگی موضعی، در چند موضع یا چند قطعه کار مورد سنجش قرار می‌گیرد. سنجش تلرانس واقعی قطعه کار با اندازه‌گیری حداقل جابجایی عقوبه ساعت اندیکاتور انجام می‌شود، در حالی که میله حس کننده ساعت در چند موضع به قطعه کار تکیه کرده و قطعه کار به اندازه حداقل 360° چرخانده می‌شود،

شکل (۲۲).



شکل (۲۲) تلرانس لنگی موضعی.

۲-۲- پرداخت سطح^{۱۲}

امروزه تکنولوژی مدرن امروزه نه تنها در زمینه کنترل دقت ابعادی بلکه همچنین در زمینه کنترل بافت سطح قطعات نیز به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای نائل شده و استاندارد‌هایی نیز در این زمینه تدوین شده است.

۲-۳-۱- معنای بافت سطح

پیش از هرچیز لازم است که موضوع اندازه‌گیری کاملاً مشخص شود. در حالت کلی هر سطح از سه مؤلفه اصلی شکل کلی^{۱۳}، اعوجاج^{۱۴} و زبری^{۱۵} تشکیل شده است. شکل کلی سطح می‌تواند تخت، محدب و یا مقعر باشد، شکل (۲۳).

¹²-Surface Finish

¹³-Surface Form

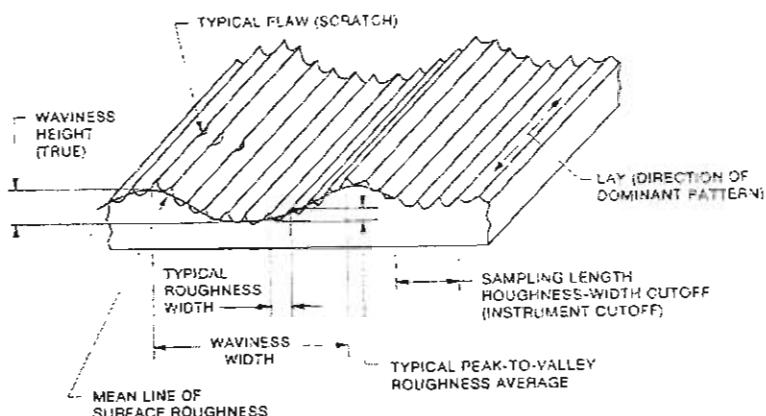
¹⁴-Waviness

¹⁵-Surface Roughness



شکل (۲۳) شکل کلی سطح می تواند (الف) مقرر، (ب) تخت و یا (ج) محدب باشد.

برای روشن شدن تفاوت بین مؤلفه های سطح یک میدان فوتبال را در نظر بگیرید. حالت ایده آل آن است که شکل کلی چنین سطحی کاملاً تخت و هموار باشد. در عین حال چنین سطحی در عمل وجود نداشته و سطوحی که در واقعیت وجود دارند در بهترین حالات از یک سری امواج تشکیل شده اند. به این قبيل پستی و بلندی ها اعوجاج می گویند. اکنون اگر مطالعه سطح به طولی از آن که فقط شامل یک طول موج باشد، محدود گردد، حاصل مطابق شکل (۲۴) خواهد بود. در این حالت مشاهده می شود که سطح مورد نظر نه تنها هموار نبوده بلکه از یک سری پستی و بلندی های با فواصل کوچک تشکیل شده که به آن زیری می گویند.



شکل (۲۴) نمایش مشخصه های اصلی بالات سطح

زیری

زیری عبارت از ناهمواری های کوچکی است که در بافت سطح دیده شده و معمولاً ناشی از ذات فرایندهای تولیدی می باشد. به بیان دیگر زیری عبارت از مجموعه ای از ناهمواری های سطحی با فواصل بسیار کوچک بوده که بر موج اعوجاج سوار می شوند.

^{۱۶} پهنانی زبری

پهنانی زبری عبارت از فاصله بین نوک دو بر جستگی یا دو فرو رفتگی متوالی بر روی پروفیل زبری بوده که در راستای اسکن سطح اندازه گیری شده و بر حسب میکرو اینچ یا میکرومتر بیان می شود.

^{۱۷} میانگین ارتفاع زبری

در حالت کلی به میانگین مقادیر ارتفاع پستی و بلندی های زبری میانگین ارتفاع زبری گفته می شود و مقدار آن بر حسب میکرو اینچ، میکرومتر و یا کلاس کیفیت زبری با N1 تا N12 بیان می شود. بیان زبری به صورت کلاس کیفیت زبری معمولاً به جای مقادیر زبری میانگین و با هدف جلوگیری از تفسیر نادرست صورت می گیرد، شکل (۲۵).

| RECOMMENDED ROUGHNESS AVERAGE VALUES | | N. SERIES OF ROUGHNESS GRADE NUMBERS |
|--|-------------------|---|
| MICROINCHES μin. | MICROMETERS μm | |
| 2000 | 50 | N12 |
| 1000 | 25 | N11 |
| 500 | 12.5 | N10 |
| 250 | 6.3 | N9 |
| 125 | 3.2 | N8 |
| 63 | 1.6 | N7 |
| 32 | 0.8 | N6 |
| 16 | 0.4 | N5 |
| 8 | 0.2 | N4 |
| 4 | 0.1 | N3 |
| 2 | 0.05 | N2 |
| 1 | 0.025 | N1 |

شکل (۲۵) روش های مرسوم برای نمایش میانگین ارتفاع زبری.

اعوجاج

اعوجاج عبارت از پستی و بلندی های با فواصل بزرگتر نسبت به زبری بوده و معمولاً ناشی از تغییر شکل، ارتعاش، چتر، فرایند حرارتی و یا کرنش های ناشی از تاب برداشتن ماشین یا قطعه کار می باشند.

^{۱۸} طول نمونه گیری

^{۱۶}-Roughness Width

^{۱۷}-Roughness Height

طراحی فرایند ساخت

یکی از مشکلات در فرایند اندازه‌گیری پارامترهای بافت سطح عبارت از جدا کردن اعوجاج از زبری می‌باشد. از طرف دیگر اختلاف بین زبری و اعوجاج اصولاً از جنس تفاوت در طول موج بوده تا تفاوت در عمق ناهمواری‌ها و لذا به طولی از یک سطح که فقط شامل زبری‌های سطحی باشد عنوان طول نمونه گیری اطلاق می‌گردد. در حالت کلی مقدار این طول با توجه به سطحی که قرار است کنترل شود و از استاندارد B.S. 1134 استخراج می‌گردد. لازم به ذکر است که طول نمونه گیری بر حسب میکرو اینچ و یا میکرومتر بیان شده و مشخصاً باید بزرگتر از پهنای زبری باشد.

در رابطه با سطوح سنگزنانی شده طول نمونه گیری به طور معمول برابر با $0/8$ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. در عین حال برای قطعات کوچک، مثل رینگ پیستون، استفاده از طول $0/25$ میلیمتر مناسب تر خواهد بود. همچنین به عنوان یک قانون کلی می‌توان گفت که در رابطه با قطعاتی که با استفاده از ابزار تک لبه تولید می‌شوند، مقدار طول نمونه گیری بایستی بزرگتر از مقدار پیش روی در نظر گرفته شود.

در حالت کلی اگر یک سطح اعوجاج نداشته باشد، هر مقداری که به عنوان طول نمونه گیری انتخاب گردد، نتایج یکسانی را به همراه خواهد داشت. از طرف دیگر با افزایش اعوجاج سطح، مقدار عددی بافت سطح با افزایش طول نمونه گیری افزایش می‌یابد.

جهت تعامل^{۱۸}

جهت تعامل نمادی است که نشان می‌دهد خطوط حاصل از حرکت ابزار بر Shi بر روی قطعه کار، خطوط زبری را به چه شکل و در چه جهتی ایجاد کرده است. بنابراین جهت تعامل جهت الگوی غالب سطح را نشان داده و به طور کلی به روش تولید سطح مربوط می‌شود. نمادهای جهت تعامل در شکل (۲۶) نشان داده شده است.

خراس‌های سطحی^{۱۹}

اصطلاح خراس‌های سطحی به مواردی از قبیل ترک‌ها و یا خراس‌های موجود بر سطح قطعه اطلاق می‌گردد. بدینهی است که اثر خراس‌های سطحی در فرایند محاسبه ارتفاع زبری اثری ندارد.

¹⁸-Cut-off Length

¹⁹-Lay

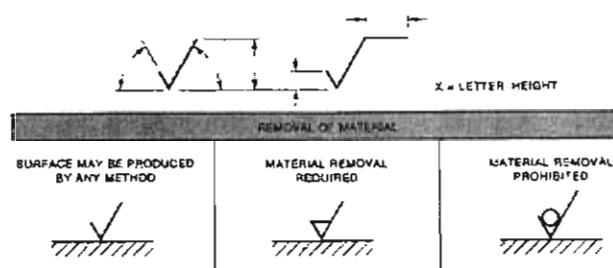
²⁰-Flaw

| SYMBOL | DESCRIPTION | EXAMPLE |
|--------|--|---------|
| — | LAY PARALLEL TO THE LINE REPRESENTING THE SURFACE TO WHICH THE SYMBOL IS APPLIED | |
| ⊥ | LAY PERPENDICULAR TO THE LINE REPRESENTING THE SURFACE TO WHICH THE SYMBOL IS APPLIED | |
| X | LAY ANGULAR IN BOTH DIRECTIONS TO THE LINE REPRESENTING THE SURFACE TO WHICH THE SYMBOL IS APPLIED | |
| M | LAY MULTIDIRECTIONAL | |
| C | LAY APPROXIMATELY CIRCULAR RELATIVE TO THE CENTER OF THE SURFACE TO WHICH THE SYMBOL IS APPLIED | |
| R | LAY APPROXIMATELY RADIAL RELATIVE TO THE CENTER OF THE SURFACE TO WHICH THE SYMBOL IS APPLIED | |
| P | LAY NONDIRECTIONAL, FITTED, OR PROTUBERANT | |

شکل (۲۶) نمادهای مورد استفاده برای نشان دادن جهت تابیل سطح.

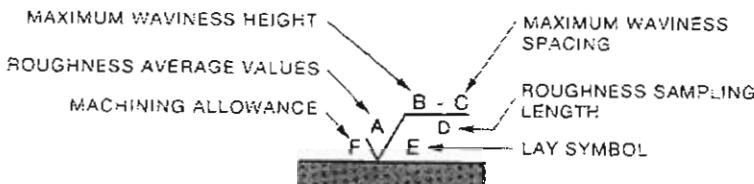
۲-۳-۲- نمایش پارامترهای بافت سطح

در حالت کلی برای نمایش بافت سطح بر روی نقشه طراحی از سیستم نمادگذاری مطابق شکل (۲۷) استفاده می‌گردد.



شکل (۲۷) نمادهای مورد استفاده برای نمایش بافت سطح بر روی نقشه طراحی.

در صورتی که بافت سطح مورد نظر از طریق برداشت ماده حاصل شود، مابقی پارامترهای مورد نیاز برای توصیف بافت سطح مطابق شکل (۲۸) بیان خواهد شد. در این حالت ضروری است که نوک نماد مورد استفاده دقیقاً متوجه سطح مورد نظر باشد.



شکل (۲۸) نمادهای مورد استفاده برای نمایش پارامترهای بالات سطح بر روی نقشه طراحی.

۴-۳-۲- آنالیز اسکن سطح

هدفی که در این بخش دنبال می‌شود آن است که با استفاده از یک معیار عددی مناسب امکان ارزیابی درجه همواریت یک سطح فراهم شود. در عمل بیش از ۵۰ پارامتر مختلف وجود دارند که با استفاده از آنها می‌توان پارامترهای سطح یک قطعه را ارزیابی نمود و همین امر انتخاب پارامترهای سطحی مناسب را با دشواری هایی رویرو نموده است.

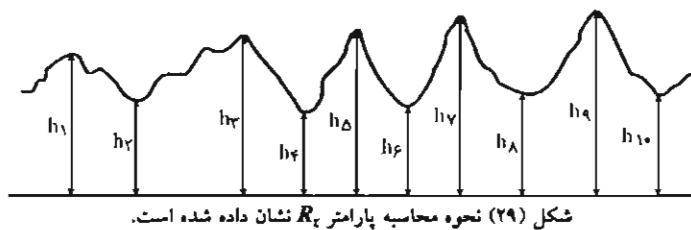
امروزه کشورهای مختلف تکنیک‌های متفاوتی را به منظور ارزیابی زیری سطح به کار می‌برند. به عنوان نمونه انگلستان و بسیاری از کشورهای مشترک المنافع و همچنین ایالات متحده تا پیش از ۱۹۵۵، از معدل ارتفاعات به عنوان مبنای برای سنجش زیری استفاده می‌کردند. امروزه سوند، آلمان و بسیاری از کشورهای اروپایی ارتفاع قله تا دره ناهمواری‌های زیری را به کار می‌برند و این در حالی است که آمریکا و بسیاری دیگر از کشورها از جذر میانگین مربعات استفاده می‌کنند. در ادامه مرواری اجمالی بر پرکاربردترین تکنیک‌های آنالیز اسکن سطح صورت خواهد گرفت.

۴-۳-۱- ارتفاع قله تا دره ناهمواری‌های زیری (R_z)

در حالت کلی این روش به عنوان ساده‌ترین معیار ارزیابی زیری سطح شناخته می‌شود. ایراد اصلی این روش آن است که مقدار به دست آمده به عنوان ارتفاع قله تا دره به دلیل آنکه تقریباً همیشه می‌تواند استثنای داشته باشد نمی‌تواند به عنوان یک معیار تمام عیار برای ارزیابی سطح در نظر گرفته بشود. از این رو برای غلبه بر این عیب به جای ارتفاع یک نقطه از میانگین ارتفاعات ۱۰ نقطه استفاده می‌شود.

^{۲۱}-Peak to Valley Height

برای این منظور، مطابق شکل (۲۹) خطی به موازات جهت کلی اسکن سطح رسم شده و ۵ نقطه با بیشترین ارتفاع و ۵ نقطه با کمترین ارتفاع در بین نقاط اسکن سطح، انتخاب می‌شوند. در ادامه متوسط فاصله قله تا دره ناهمواری‌ها با R_z نشان داده و از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

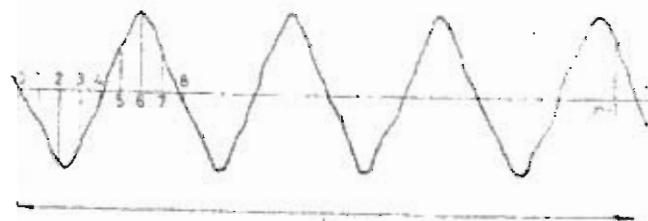


شکل (۲۹) نحوه محاسبه پارامتر R_z نشان داده شده است.

$$R_z = \frac{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) - (h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10})}{\Delta} \quad (1)$$

۲-۴-۳-۲- جذر میانگین مربعات^{۲۲} ($h_{r.m.s}$)

این روش تا سال ۱۹۵۵ در امریکا مورد استفاده بود اما پس از آن روش خط میانگین جایگزین آن شد. در این روش، مطابق شکل (۳۰) از ریشه دوم میانگین مربعات عرض نقاط اندازه گیری شده سطح نسبت به یک خط متوسط به عنوان معیار اندازه گیری زیری استفاده می‌شود و از عبارت $h_{r.m.s}$ برای نمایش آن استفاده می‌شود.



شکل (۳۰) نمایش گرالبکی $h_{r.m.s}$ نشان داده شده است.

در این صورت چنانچه فاصله نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴، ... و n یکسان بوده و ارتفاع متناظر با این نقاط به ترتیب $h_n, h_2, h_3, h_4, \dots$ و h_1 باشد، می‌توان نوشت:

$$h_{r.m.s} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2}{n}} = \left(\frac{\int_0^L h^2 dl}{L} \right)^{1/2} \quad (2)$$

²²-Root Mean Squares

۳-۴-۳-۲- خط مرکزی و میانگین^{۲۳} (R_a)

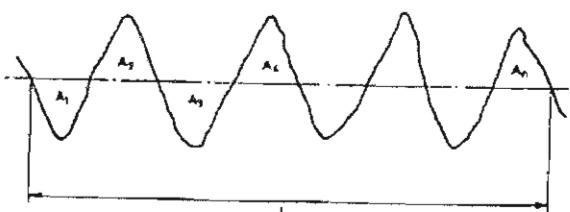
معیار ارزیابی به کمک R_a استاندارد قابل قبول در بریتانیا و از سال ۱۹۵۵، در امریکا بوده است. این کمیت به صورت متوسط ارتفاعات نسبت به یک خط میانگین در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در محاسبه معدل ارتفاعات عرض نقاط سطح صرف نظر از علامت آنها در روابط استفاده می‌شوند. بنابراین با توجه به شکل (۳۰) می‌توان نوشت:

$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (3)$$

مشکلی که در این حالت در رابطه با تعیین مقدار R_a وجود دارد آن است که عملاً استفاده از رابطه (۳) فرایندی طاقت فرسا بوده و چنانچه فواصل بین نقاط یکسان نباشد ممکن است حتی نقاط با اهمیت سطح نزیر نادیده گرفته شوند. از این رو برای رفع این مشکل می‌توان مقدار R_a را با توجه به رابطه زیر نیز محاسبه نمود.

$$R_a = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{L} \quad (4)$$

در رابطه فوق $\sum A$ عبارت از مجموع مساحت‌های بالا و زیر خط میانگین بوده و L طول مسیر اسکن می‌باشد. بنابراین نخستین گام در تعیین مقدار R_a ، عبارت از تعیین موقعیت خط میانگین می‌باشد. بنا به تعریف خط میانگین به خطی اطلاق می‌گردد که تفاضل مساحت‌های نواحی واقع در بالا و پایین آن در محدوده ۰/۵٪ قرار داشته باشد، شکل (۳۱).



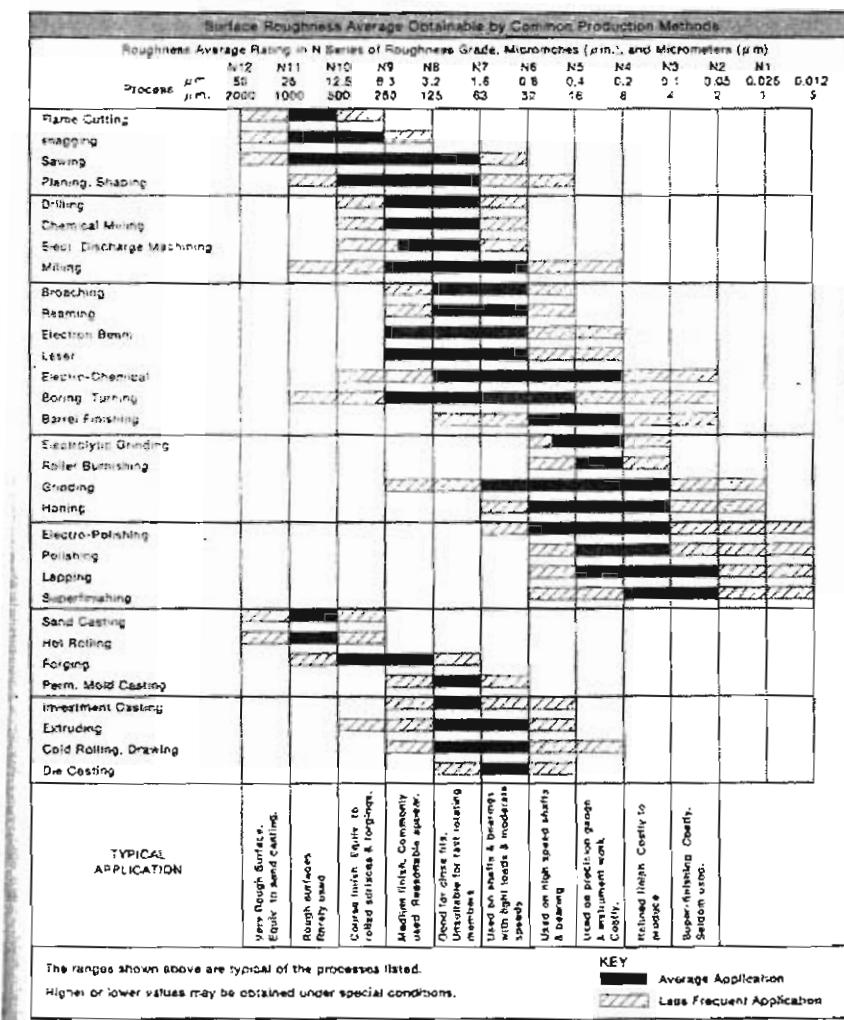
شکل (۳۱) نمایش گراییکی نحوه تعیین خط میانگین نشان داده شده است.

^{۲۳}-Center Line Average Method (C.L.A.)

۳-۵-۲- میزان زیری سطح قابل حصول در عملیات های تولیدی مختلف

میزان زیری سطح قابل حصول در عملیات تراشکاری و فرزکاری در محدوده $0.01 \mu m$ تا $0.2 \mu m$ بوده و این محدوده در عملیات سنگ زنی به اندازه دانه های ساینده و همچنین سرعت پیشروی سنگ سنباده وابسته بوده و در محدوده $0.01 \mu m$ تا $0.06 \mu m$ تغییر می کند.

در حالت کلی در میان روش های برآورده برداری، لپینگ صاف ترین سطح را ایجاد می کند. این روش معمولاً در صنایع خودروسازی و در مواردی که لازم باشد دو سطح تخت در مجاورت هم، در برابر نفوذ روغن آب بندی شوند، استفاده می شود. در حالت کلی زیری سطح حاصل از لپینگ در محدوده $0.005 \mu m$ تا $0.07 \mu m$ قرار دارد.



شکل (۳۲) زیری سطح قابل حصول در عملیات های تولیدی مختلف.

فصل سوم: نحوه انتخاب فرآیند ساخت اولیه

کارگاه آموزشی طراحی فرآیند ساخت

طراحی فرآیند ساخت

در حالت کلی هر فرآیند ساخت مزایا، قابلیتها و عدویتهای خاص خود را داشته و بنابراین میتوان هزینه یک قطعه را به حداقل رساند مشروط به اینکه اجزاء، ابعاد و ترانسهاي آن با قابلیتهاي يكی از فرآيندهای موجود تطابق داشته باشد. در این فصل تلاش میشود که با استفاده از یک رویکرد سیستماتیک مبتنی بر ملاحظات اقتصادی، فرآیند اولیه ساخت برای تولید یک عضول انتخاب شود.



دانشکده مهندسی
مکانیک دانشگاه صنعتی
امیرکبیر

مقدمه

در حالت کلی برای یک مساله طراحی، یک راه حل واحد وجود نداشته بلکه، مجموعه‌ای گسترده از پاسخ‌های احتمالی وجود دارند که در بین این حل‌های ممکن، طراح مناسب‌ترین حالت را انتخاب خواهد کرد. این پاسخ‌ها می‌توانند از حوزه‌های مختلف علوم مهندسی و با کاربرد مفاهیم مختلف به وجود آمده باشند. در این بین آنچه برای طراح محدودیت ایجاد می‌کند عبارت از قیودی است که از ناحیه قوانین فیزیکی، محدودیت در دسترسی به منابع و همچنین آینین نامه‌ها اعمال می‌شوند.

در واقع مهندس طراح حل کننده یک مساله است که پاسخ آن عبارت از یک قطعه جدید می‌باشد. او باید این قطعه را چنان طراحی کند که از یک سو خواسته‌های مشتری را بطرف کرده و از سوی دیگر در این روند اهدافی از قبیل طراحی یک محصول با کیفیت مناسب و قیمت ارزان نیز محقق گردد. در نهایت حل یک مساله طراحی در قالب ترسیمات مهندسی و به کمک تلرانس گذاری ابعادی و هندسی بیان می‌شود.

مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهند که هزینه مرحله طراحی، مشتمل بر هزینه طراحی جزئیات، تست و طراحی فرآیند ساخت، در حدود ۱۵ درصد هزینه قطعه بوده و این در حالی است که هزینه مرحله ساخت در حدود ۸۵ درصد آن می‌باشد. از طرفی هر فرآیند ساخت مزایا، قابلیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود را داشته و بنابراین می‌توان هزینه یک قطعه را به حداقل رساند مشروط به اینکه فیچرها، ابعاد و تلرانس‌های آن با قابلیت‌های یکی از فرآیندهای موجود تطابق داشته باشد. در غیر این صورت هزینه ممکن است به شدت افزایش یافته و یا حتی ساخت قطعه غیرممکن شود. در این فصل تلاش خواهد شد که ضمن معرفی فرآیندهایی که به طور معمول در فرآیندهای ساخت استفاده می‌شوند، خواننده با نحوه انتخاب فرآیندهای اولیه ساخت آشنا شود.

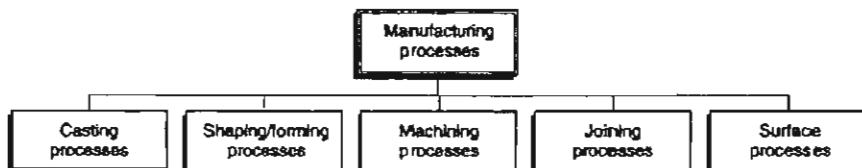
۱-۳- دسته‌بندی کلی فرآیندهای ساخت

در حالت کلی گستره انتخاب فرآیندهای ساخت بسیار متنوع و وسیع بوده و هر یک از این فرآیندها قابلیت‌های خاص خود را دارند. صرف نظر از قابلیت‌های ذاتی هر فرآیند، همواره بیش از یک فرآیند قادر خواهد بود که نیازمندی‌های قطعه را مرتفع نماید. بنابراین آشنایی با انواع مختلف فرآیندهای ساخت موجود ضروری می‌باشد.

در عمل، فرآیندهای ساخت را می‌توان به ۵ دسته کلی شامل (۱) ریخته‌گری^۱، (۲) شکل دهن^۲، (۳) اتصالات^۳ (۴) ماشین کاری^۴ و (۵) فرآیندهای سطحی^۵، همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده، تقسیم‌بندی نمود.

^۱ - Casting

صفحه | ۲



شکل (۱) دسته‌بندی کلی فرآیندهای ساخت.

اخیراً کاربرد یک روش جدید شکل‌دهی تحت عنوان شکل‌دهی با اضافه کردن ماده نیز روند رو به رشدی داشته است. در طی این روش مواد به صورت مرحله‌ای اضافه می‌شوند تا اینکه نهایتاً تمامی قسمتها تشکیل شوند. این روش اغلب برای نمونه سازی سریع استفاده می‌شود. در حالت کلی انتخاب فرآیندهای اولیه ساخت، بر اساس تعداد قطعات و پیچیدگی شکلی آنها صورت می‌گیرد:

اثر تعداد قطعات

به عنوان یک قانون کلی، اولویت روش‌های ساخت بر اساس ملاحظات اقتصادی، به ترتیب زیر می‌باشد:
تعداد قطعات زیاد (تا ۲۰۰۰ عدد یا بیشتر)

فرآیندهای شکل‌دهی

فرآیندهای ریخته‌گری

شکل‌دهی از طریق اتصال قسمت‌ها

فرآیندهای ماشین‌کاری

شکل‌دهی از طریق مونتاژ

توجه کنید که با این تعداد قطعه، استفاده از روش شکل‌دهی با افزودن ماده چندان مناسب نیست.

تعداد قطعات کم (تا ۵۰ عدد)

فرآیندهای ماشین‌کاری

شکل‌دهی از طریق اتصال قسمت‌ها

فرآیندهای شکل‌دهی

شکل‌دهی از طریق مونتاژ

شکل‌دهی با افزودن ماده

² - Forming and Shaping

³ - Joining

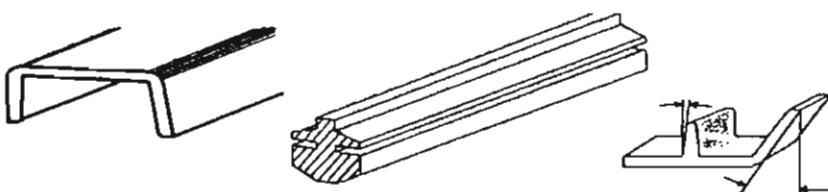
⁴ - Machining

⁵ - Surface Processes

توجه کنید که با این تعداد قطعه، استقاده از فرآیندهای ریخته‌گری چندان مناسب نیست.
در مواردی که تعداد قطعات متوسط باشد، لازم است که برای هر حالت جداگانه محاسبه هزینه صورت بگیرد؛
در عین حال برای قطعات ساده، حد بالایی تعداد پایین را تا ۱۵۰ افزایش داده و حد پایینی تعداد بالا را تا ۱۰۰۰
قطعه کاهش می‌دهند. همچنین حد بالایی قطعات پیچیده تا ۱۵۰۰ عدد قابل کاهش است.

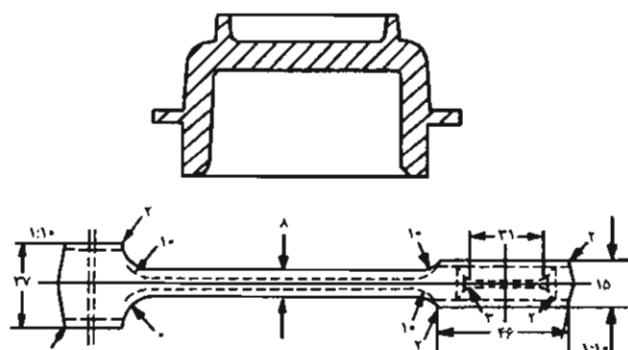
اثر پیچیدگی شکلی

در حالت کلی انواع قطعات مختلف از نقطه نظر پیچیدگی شکلی به چهار دسته تقسیم می‌شوند:
الف) قطعات ساده^۶؛ این دسته شامل قطعاتی است که سطح مقطع آنها در طول محور اصلی ثابت بوده و هیچ
قسمت برجسته جانبی نداشته باشند، شکل (۲).



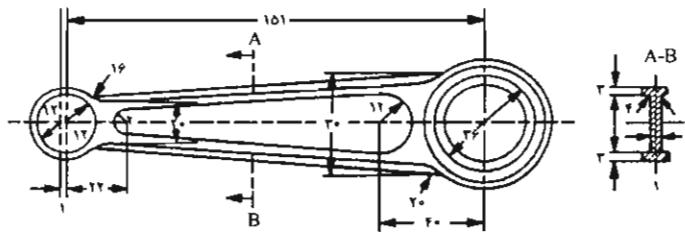
شکل (۲) نمونه‌ای از قطعات ساده.

ب) قطعات باز^۷؛ این گروه شامل قطعاتی است که می‌توان آنها را توسط یک صفحه حداکثر به دو قسمت مشابه تقسیم نمود. در این صورت هیچ یک از قسمتها نباید از دیگری بزرگتر باشند و هیچ برجستگی هم بر روی دیوارهای وجود ندارد، شکل (۳).



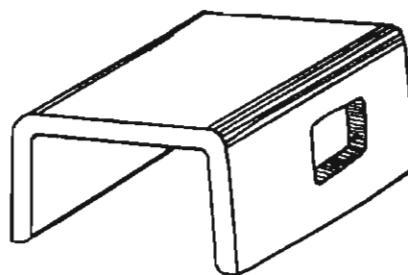
⁶-Mono

⁷-Open



شکل (۳) نمونه‌ای از قطعات باز.

ج) قطعات پیچیده^۸: قطعات این دسته مشابه قطعات باز بوده با این تفاوت که می‌توانند دارای اجزای جانبی نیز باشند، شکل (۴).



شکل (۴) نمونه‌ای از قطعات پیچیده.

د) قطعات خیلی پیچیده^۹: قطعه دارای قسمتهایی با شکل دلخواه است و می‌تواند دارای سوراخهای داخلی نیز باشد.

اکنون اگر حروف A, F, E, D, C, B به ترتیب نشان دهنده فرآیندهای ریخته‌گری، شکل دهی، ماشین‌کاری، اتصالات، مونتاژ و شکل‌دهی از طریق اضافه کردن مواد باشند، با توجه به تعداد تولید و پیچیدگی شکلی قطعات، می‌توان با کمک جدول (۱)، فرآیند ساخت اولیه مناسب را انتخاب نمود. در این جدول داده‌ها بر اساس تقدم چیزهای شده‌اند به طوری که کد بالایی تقدم بیشتری دارد.

جدول (۱) جدول انتخاب فرآیندهای اولیه ساخت با توجه به پیچیدگی شکلی قطعه.

| ساده | باز | پیچیده | خیلی پیچیده |
|-------|-------|--------|-------------|
| تعداد | تعداد | تعداد | تعداد |
| <180 | >1000 | <100 | >2000 |
| | | <50 | <50 |
| | | >1000 | <100 |
| | | | >1000 |

⁸-Complex⁹-Very Complex

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D | B | C | B | C | A | E | B |
| E | E | D | A | D | B | D | D |
| B | D | B | D | B | C | C | E |
| C | C | E | C | E | D | A | C |
| A | A | F | E | F | E | B | A |
| - | - | A | - | A | - | F | F |

برای روشن شدن مطلب، با استفاده از چند مثال نمونه نحوه استفاده از جدول (۱)، معرفی خواهد شد.

- اولین اولویت در بین فرآیندهای ساخت مناسب برای تولید ۸۰ قطعه با پیچیدگی شکلی باز، عملیات ماشین کاری، کد C، می باشد.
- اولین اولویت در بین فرآیندهای ساخت مناسب برای تولید ۳۰۰۰ قطعه با شکلی پیچیده، عملیات ریخته گری، کد A، می باشد. بدیهی است که اگر واحد تولیدی امکان ساخت این قطعه را نداشته باشد، با توجه به جدول (۱) می توان از فرآیندهای شکل دهنده، کد B، استفاده کرد. در نهایت اینکه اولویت سوم برای تولید این قطعه استفاده از فرآیندهای ماشین کاری، کد C، می باشد.
- اولویت فرآیندهای ساخت مناسب برای تولید ۸۰۰ قطعه با شکلی پیچیده، به ترتیب استفاده از فرآیندهای ماشین کاری، کد C، و عملیات ریخته گری، کد A، می باشد. بدیهی است که اگر واحد تولیدی امکان ریخته گری این قطعه را نداشته باشد، از فرآیندهای ماشین کاری استفاده می شود. همچنین اگر اگر هر دو انتخاب در دسترس باشند محاسبات اقتصادی تعیین کننده فرآیند انتخابی خواهد بود. لازم به یادآوری است که تعداد تولیدی این قطعه به گونه ای است که عملاً در قالب ستون های جدول قابل بیان نمی باشد.

۲-۳- فرآیندهای ریخته گری

در شکل دهی از مذاب به روش ریخته گری، قطعه خام تا رسیدن به حالت مذاب گرم شده و سپس مذاب حاصل به داخل قالب ریخته شده و یا با اعمال فشار به درون قالب هدایت می شود. از جمله محدودیت های این روش می توان به بالا بودن هزینه ساخت قالب، دقت ابعادی پایین و کیفیت نامناسب سطوح قطعه تولیدی اشاره کرد. از طرف دیگر پس از ساخت قالب هزینه تولید فقط شامل هزینه عملیات ریخته گری و تامین مواد خام خواهد بود. در مجموع می توان چنین نتیجه گیری کرد که ریخته گری قطعات روشی مناسب برای تولید انبوه خواهد بود.

در حالت کلی با توجه به تنوع فرآیندهای ریخته گری، تقریباً قطعات مختلف به هر شکل و اندازه ای را می توان با استفاده از این فرآیندها تولید نمود. در واقع، استفاده از فرآیندهای ریخته گری یکی از سریع ترین روش های تبدیل قطعه خام به قطعه نهایی می باشد. علاوه بر آن، استفاده از فرآیند ریخته گری مناسب می تواند نیاز به

فرآیندهای ثانویه را کاهش دهد. در عین حال، همانند همه فرآیندهای ساخت، بهترین نتایج و حالات اقتصادی در صورتی محقق می‌شود که طراح، فرآیندهای مختلف را بشناسد و بتواند مناسب‌ترین را انتخاب نماید.

۱-۲-۳- معروفی فرآیندهای ریخته‌گری

فرآیندهای ریخته‌گری در بردارانده استفاده از مواد مذاب، معمولاً فلز، می‌باشد. این ماده مذاب سپس در داخل حفره قالب ریخته شده تا پس از خنک شدن، شکل نهایی را به خود بگیرد. با وجود آنکه فرآیند توصیف شده در فوق نسبتاً ساده بوده اما، فرآیند ریخته‌گری به خاطر استفاده از فلز مذاب از متالورژی کاملاً پیچیده‌ای برخوردار می‌باشد.

در حالت کلی فرآیندهای ریخته‌گری را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود:

- ریخته‌گری در قالب‌های موقت^{۱۰}
- ریخته‌گری در قالب‌های دائم^{۱۱}

در فرآیندهای ریخته‌گری در قالب‌های موقت، برای برداشتن قطعه ریخته‌گری به ناچار قالب تخرب می‌شود. نمونه‌های متداول مواد مصرفی در ساخت قالب عبارت از ماسه، گچ و سرامیک‌های مخلوط با یک ماده چسبنده می‌باشند. به بیان دیگر محدودیت اصلی قالب‌های موقت این است که نمی‌توان آنها را مجدداً مورد استفاده قرار داد. با وجود آنکه این محدودیت در تعداد کم قابل قبول است اما در حالت کلی فرآیندهای قالب‌های دائم برای حجم تولیدات بالا مناسب‌تر هستند. در عین حال، از آنجا که در فرآیندهای ریخته‌گری با قالب‌های دائم، خود قالب مجدداً استفاده می‌شود، طراحی آن بایستی به گونه‌ای باشد که به سادگی بتوان قطعه ریخته‌گری را از آن جدا نمود. به طور معمول قالب‌های دائم از جنس فلز ساخته می‌شوند تا بتوانند استحکام خود را در درجه حرارت‌های بالا حفظ کنند.

دلایل استفاده از فرآیندهای ریخته‌گری در حالات کلی عمدتاً ناشی از موارد زیر می‌باشد:

- توانایی تولید اشکال پیچیده با حفره‌های داخلی و یا مقاطع توخالی.
- توانایی تولید قطعات بسیار بزرگ.
- توانایی شکل دهی به موادی که با استفاده از فرآیندهای دیگر به دشواری شکل دهی می‌شوند.
- اقتصادی‌ترین روش تولید در تعداد بالای قطعات.

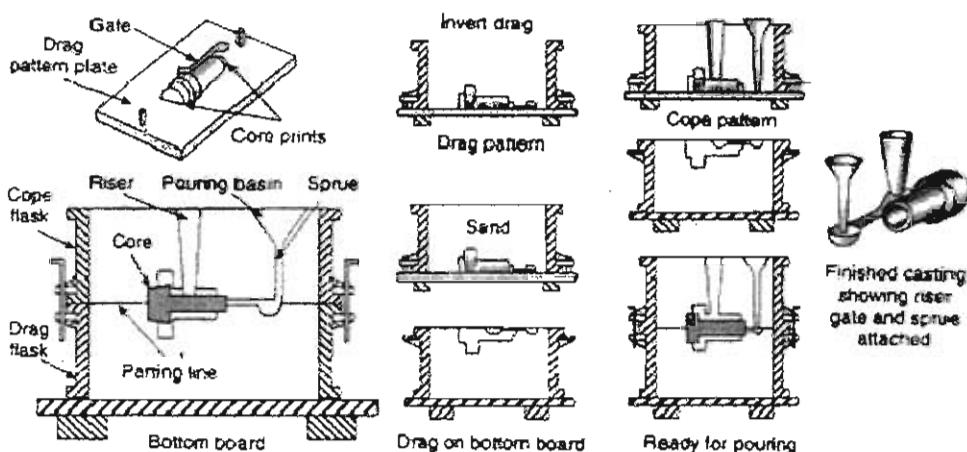
الف) ریخته‌گری در قالب موقت

ریخته‌گری در ماسه

¹⁰ - Expendable Mould Processes
¹¹ - Permanent Mould Processes

طراحی فرایند ساخت

این روش قدیمی‌ترین و در عین حال پراستفاده‌ترین فرآیند ریخته‌گری می‌باشد. در این روش یک الگو به شکل موردنظر و در دو نیمه ساخته می‌شود. سپس نیمه بالایی، فنجان، و نیمه پایینی با استفاده از ماسه مرطوب آغشته به چسب ماسه، سیلیکات، متراکم و فشرده می‌شوند. در مرحله بعد الگوها برداشته شده و نیمه‌های قالب بر هم قرار داده می‌شوند. در نهایت فلز مذاب از طریق لوله‌ای که در حین فشردن ماسه در داخل آن تعییه شده، به داخل حفره قالب ریخته می‌شود. پس از آنکه انجماد صورت گرفت، قالب برای بیرون آوردن قطعه تخریب می‌گردد. فرآیند و تجهیزات این روش ریخته‌گری در شکل (۵) نشان داده شده است. این روش عمدتاً برای تولید اشکال ساده استفاده می‌شود اما می‌توان آن را به طور گسترده در ساخت قطعات پیچیده از قبیل بلوك موتورها، منیقلدها، بدنه ماشین ابزارها و محفظه‌های پمپ‌ها استفاده کرد.



شکل (۵) فرآیند ریخته‌گری در ماسه همراه با تجهیزات آن.

ریخته‌گری دقیق

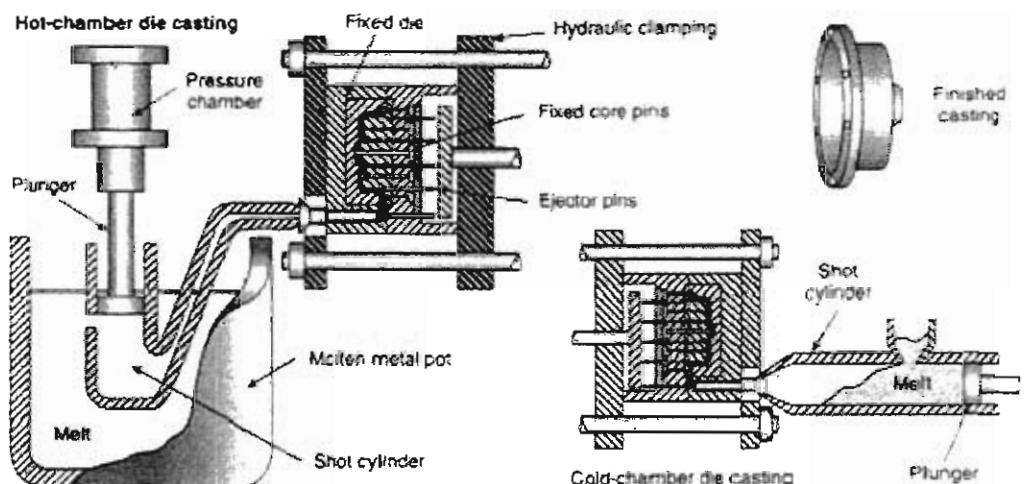
این روش گاهی تحت عنوان فرآیند ریخته‌گری با مو ماضید شونده^{۱۲} هم نامیده می‌شود. در این روش الگوی قطعه از طریق تزریق مو می‌ریزیں ترمoplاستیک به یک قالب یا ماتریس ایجاد می‌شود. سپس الگو برداشته شده و با یک دوغاب از ماده نسوز که معمولاً نوعی سرامیک است، پوشش داده می‌شود. پس از ایجاد پوشش با ضخامت مناسب و خشک کردن آن، الگو ذوب شده و بیرون می‌رود. در نهایت قلب سرامیکی ایجاد شده با فلز مذاب پر می‌شود. پس از انجماد هم قالب برای برداشتن قطعه ریخته‌گری شده شکسته می‌شود.

ب) ریخته‌گری در قالب دائم

¹²-Lost Wax Process

ریخته‌گری تحت فشار^{۱۳}

این روش عمدهاً برای حجم تولید بالا استفاده می‌شود. در این حالت یک قالب یا ماتریس از جنس فلز ماشین کاری شده و سپس فلز مذاب تحت فشار به فضای داخل قالب ریخته می‌شود. پس از انجاماد، قالب باز شده و قطعه برداشته می‌شود. در حالت کلی دو نوع اصلی از قالب‌های تحت فشار وجود دارند: (الف) قالب با محفظه داغ^{۱۴} و (ب) قالب با محفظه خنک^{۱۵}. اختلاف عمده بین این دو قالب آن است که در قالب‌های با محفظه داغ ابتدا فلز مذاب در داخل یک حفره سیفون مانند وارد شده و سپس با اعمال فشار به داخل قالب هل داده می‌شود اما در قالب با محفظه خنک ابتدا فلز مذاب در داخل یک محفظه استوانه‌ای خنک ریخته شده و سپس با استفاده از یک پلانتجر به داخل قالب فرستاده می‌شود، شکل (۶).



شکل (۶) فرآیند ریخته‌گری تحت فشار همراه با تجهیزات آن (الف) در محفظه داغ (ب) در محفظه خنک.

۳-۲-۲- نحوه انتخاب فرآیندهای ریخته‌گری مناسب

فرآیندهای ریخته‌گری که به طور معمول استفاده می‌شوند عبارت از ریخته‌گری در ماسه، ریخته‌گری دائمی، ریخته‌گری تحت فشار و ریخته‌گری دقیق می‌باشند. اطلاعات ارائه شده در جدول (۲) به شما در انتخاب فرآیند مناسب کمک خواهد کرد. در حالت کلی توجه داشته باشید که فرآیندهای ریخته‌گری ممکن است به

^{۱۳}-Die Casting or Pressure Die Casting

^{۱۴}-Hot Chamber

^{۱۵}-Cold Chamber

نهایی جوابگوی نیازمندی‌های قطعه از نظر دقت‌های ابعادی و یا صافی سطح نباشد که در این گونه موارد با فرآیندهای تکمیلی همراه می‌شوند.

جدول (۲) نحوه انتخاب فرآیند ریخته‌گری.

| جنس | هزینه قالب | پایین | متوسط | ۲۵ تا ۷۲۵ | ۱ تا ۷۲۵ | ۰/۱۰ ± | ۰/۰۵ ± | ۰/۰۵ میلیمتر | ۰/۰۵ میلیمتر | ۰/۰۵ کیلوگرم | ۰/۰۵ کیلوگرم | ناراندازه | هر اندازه | مواد سبک | تقریباً همه مواد | جنس | ریخته‌گری در ماسه | ریخته‌گری در قالب دائم | ریخته‌گری تحت فشار | ریخته‌گری دقیق |
|-----------------------------|------------|-------|-------|-----------|----------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|------------------|-----|-------------------|------------------------|--------------------|----------------|
| اندازه یا وزن | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| مینیمم ضخامت مقطع | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| دقت (میلیمتر) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| زیری سطح (R_a) میکرومتر | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| هزینه قالب | | بالا | متوسط | ۷۲۵ تا ۲۵ | ۱ تا ۷۲۵ | ۰/۰۵ ± | ۰/۰۵ ± | ۰/۰۵ میلیمتر | ۰/۰۵ میلیمتر | ۰/۰۵ کیلوگرم | ۰/۰۵ کیلوگرم | ناراندازه | هر اندازه | مواد سبک | تقریباً همه مواد | جنس | ریخته‌گری در ماسه | ریخته‌گری در قالب دائم | ریخته‌گری تحت فشار | ریخته‌گری دقیق |

در ادامه برای روشن شدن مطالب و همچنین آشنایی با نحوه استفاده از جدول (۲) یک مثال نمونه ارائه خواهد شد.

مثال: مطلوب است تعیین فرآیند اولیه ساخت برای تولید ۲۵۰۰ عدد از قطعه پیچیده‌ای از جنس برنز، با وزن ۴ کیلوگرم، کمترین ضخامت ۱/۲ میلیمتر، کوچکترین ترانس ابعادی $mm\ 0/1 \pm 0/05$ و کمترین زیری سطح برابر با $2 \mu m$ که بر حسب معیار R_a اندازه‌گیری شده است.

حل

sisteme‌های ریخته‌گری موجود گنجایش ۱۰ کیلوگرم مذاب در هر ضرب را داشته و معمولاً ۲ قطعه را در یک قالب جای می‌دهند. از طرف دیگر ساخت هر قالب به طور تقریبی هزینه‌ای در حدود ۲۵۰۰۰۰۰ تومان داشته و می‌توانند در حدود ۱۰۰ عملیات ضرب را در مدت یک ساعت انجام دهند. از طرف دیگر هر ساعت استفاده از کارخانه در حدود ۶۰۰۰۰ تومان هزینه خواهد داشت. اکنون با فرض اینکه قیمت ماده خام کیلویی ۸۰۰ تومان باشد، هزینه ساخت به صورت تقریبی برابر است با:

$$\text{هزینه قالب} = 2500000 \text{ تومان}$$

$$\text{هزینه اپراتور} = 250000 \times 60 / (2 \times 100) = 750000 \text{ تومان}$$

$$\text{هزینه قطعه خام (با فرض ۲۰ درصد ضایعات)} = 1/2 \times 0/8 \times 4 \times 250000 = 960000 \text{ تومان}$$

جمعماً ۳۵۴۰۰۰۰ تومان

هزینه هر قطعه ۱۴۱۴۰ تومان

در عین حال ساخت این قطعه به روش ماشین کاری ۲۵ دقیقه طول می‌کشد. مجدداً با همان دستمزد و هزینه قطعه خام می‌توان نوشت:

هزینه اپراتور ۶۲۵۰۰۰۰ تومان

هزینه قطعه خام (با فرض ۲۰ درصد ضایعات) ۹۶۰۰۰۰ تومان

جمعماً ۷۲۱۰۰۰۰ تومان

هزینه هر قطعه ۲۸۸۴۰ تومان

فرآیند تکمیلی

در حالت کلی پارامترهای مربوط به جنس، اندازه قطعه و ضخامت مقطع، اجباری و غیر اختیاری هستند. اگر فرایند مورد نظر با یکی از آنها سازگار نباشد، باید از آن فرایند چشم پوشی کرد و انتخاب بعدی را فرض نمود. همچنین اگر فرایند مورد نظر نتواند پارامترهای دقت ابعادی، زیری سطح یا ترانس را ارضاء کند، آنالیز قیمت برای کاربرد اولویت بعدی انجام می‌گیرد.

به طور معمول زیری سطح یا ترانس به خاطر نیازمندی بخش‌های خاصی از قطعه مقادیر بسته‌ای را اختیار می‌کنند. به عبارت دیگر قسمت‌هایی از قطعه که با قطعه دیگری در تماس نبوده و یا قسمت‌های خارجی آن چندان نیازمند مقادیر بسته زیری سطح یا ترانس‌های ابعادی نیستند. اما در رابطه با سایر ابعاد در صورت نیاز یک سری فرآیندهای تکمیلی در نظر گرفته می‌شوند که مساله خود باعث افزایش قیمت ساخت خواهد شد. در عین حال، قیمت کلی ساخت به مراتب کمتر از انتخاب فرایند دیگر خواهد بود.

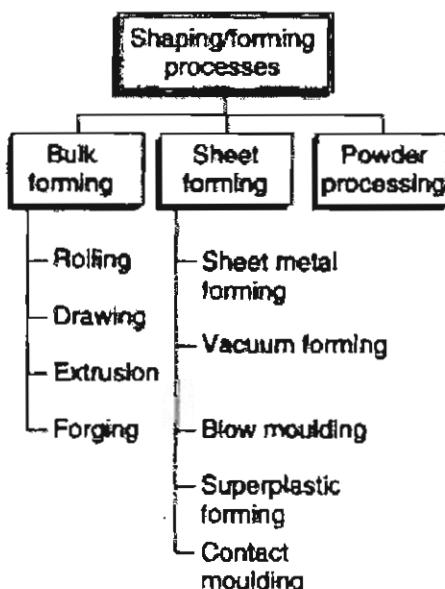
۳-۳- فرآیندهای شکل دهنده

در فرآیندهای شکل دهنده، یک بیلت جامد از ماده مورد نظر، معمولاً با اعمال نیرو، به شکل مورد نظر تبدیل می‌شود. با وجود آنکه با استفاده از فرآیندهای شکل دهنده می‌توان شکل‌های متنوعی را تولید نمود اما این فرآیندها به اندازه ریخته گری انعطاف پذیر نمی‌باشند. در عین حال ریزساختار قطعات تولید شده به روش شکل دهنده سبب بهبود در خواص مکانیکی این دسته از قطعات می‌شود.

طراحی فرایند ساخت

۱-۳-۳- دسته‌بندی فرآیندهای شکل‌دهی

در حالت کلی می‌توان فرآیندهای شکل‌دهی را در قالب سه دسته فرآیند کلی شامل فرآیندهای حجمی^{۱۶}، شکل‌دهی ورق^{۱۷} و فرآیندهای پودری^{۱۸} مطابق شکل (۷) تقسیم‌بندی نمود.



شکل (۷) دسته‌بندی کلی فرآیندهای شکل‌دهی.

الف) فرآیندهای شکل‌دهی حجمی

فرآیندهای شکل‌دهی حجمی معمولاً تحت عنوان فرآیندهای تغییر شکل^{۱۹} شناخته می‌شوند. این به خاطر آن است که گستره وسیعی از فرآیندهای شکل‌دهی در اثر تغییر شکل ناشی از بارگذاری فشاری ناشی از ابزار به اجرا در می‌آیند. در واقع بسیاری از فرآیندهای این دسته به سبب اعمال بار فشاری، دچار تغییراتی در شکل، به ویژه در سطح مقطع خود می‌شوند. بدین ترتیب معلوم می‌شود که موادی که داکتیل باشند، برای شکل‌دهی حجمی مناسب هستند. عبارت حجمی در این تعریف به معنای آن است که نسبت مساحت جانبی به ضخامت قطعه کوچک است.

به طور معمول فرآیندهای حجمی دربردارنده کار گرم مواد بوده، یعنی گرما بر آنها اعمال می‌گردد. این پردازش فلزات در درجه حرارتی بالاتر از درجه حرارت تبلور مجدد آنها صورت می‌گیرد. درجه حرارت تبلور مجدد

^{۱۶} - Bulk Forming

^{۱۷} - Sheet Forming

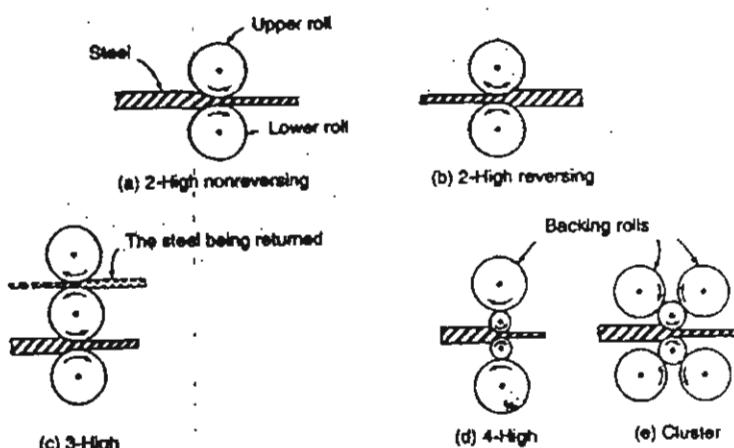
^{۱۸} - Powder Processing

^{۱۹} - Deformation Processes

درجه حرارتی است که در آن کریستال‌های جدید از یک ساختار واپیچیده شکل می‌گیرند. این مطلب به معنای آن است که در حین تغییر شکل هیچ تاثیر زیانبخشی بر خواص مکانیکی ماده وارد نخواهد آمد. فرآیندهای شکل‌دهی حجمی شامل نورد، کشش، اکسیروزن و آهنگری بوده و در بین این فرآیندها نورد گرم پرکاربردترین فرآیند می‌باشد.

عملیات نورد

این فرایند ارزان‌ترین شیوه شکل‌دهی مواد به حساب می‌آید. با استفاده از این عملیات می‌توان قطعاتی به شکل میلگرد، تسمه و ورق تولید نمود؛ برای این منظور قطعاتی که به صورت شمش هستند به فضای بین دو گلتک کشیده شده و پس از آنکه مساحت مقطع آنها کاهش یافته، از طرف دیگر خارج می‌شوند. بدیهی است که کاهش سطح مقطع در اثر نیروهای فشاری عملیات شکل‌دهی بوده و بنابراین طول شمش پس از تغییر شکل افزایش خواهد یافت، شکل (۸).



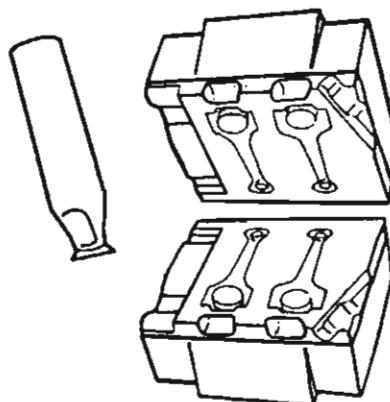
شکل (۸) شماتیک عملیات نورد.

نکته‌ای که در این حالت قابل ذکر است آنکه اصولاً همه مواد قابلیت عملیات شکل‌دهی را ندارند. بنابراین فرآیند نورد فقط مختص قطعاتی با شکل ساده بوده و علاوه بر این قطعه نورد بایستی از نقطه نظر خواص مکانیکی استحکام کششی، سختی و قابلیت شکل پذیری در وضعیتی مناسب قرار داشته باشد. از دیگر محدودیت‌های این فرآیند ترک‌هایی هستند که در حین اجرای فرآیند نورد گرم^{۲۰} به وجود می‌آیند و می‌توانند مساله ساز شوند. در عین حال فرآیند نورد قادر است که قطعاتی با باند ترانسیسته را ایجاد نماید.

²⁰-Hot Rolling

^{۲۱} فرآیند آهنگری

یک روش شکل دهی قطعات است که در آن قطعه ای فلز با استفاده از چکش کاری و یا پرسکاری، معمولاً پس از گرم کردن، به شکل مورد نظر تبدیل خواهد شد، شکل (۹). اعمال گرما در این عملیات از یک طرف سبب کاهش نیروی فشاری مورد نیاز برای اجرای ا操یراتور شده و از طرف دیگر سبب بهبود خواص پلاستیسته قطعه کار خواهد شد. در ادامه می توان با استفاده از ا操یراتور کشش طول و سطح مقطع چنین قطعه ای را به ترتیب افزایش و یا کاهش داده و یا با استفاده از ا操یراتور کله زنی^{۲۲} طول آن را کاهش داد. از نقطه نظر خواص مکانیکی قطعات آهنگری شده نسبت به قطعات ریخته گری برتری دارند و به همین دلیل قطعاتی را که در معرض تنفس های شدید قرار دارند با استفاده از روش آهنگری تولید می کنند.



شکل (۹) شماتیک عملیات آهنگری در قالب بسته.

در عین حال، فرآیند آهنگری نیز محدودیت های خاص خود را دارد؛ ساخت قالب های آهنگری بسیار گران تر از قالب های ریخته گری بوده و از طرف دیگر بسیاری از قطعات پیچیده و دارای حفره های داخلی را که با استفاده از روش ریخته گری به راحتی قابل تولید هستند با استفاده از روش آهنگری نمی توان تولید نمود. همچنین آهنگری در قالب های بسته از نظر ابعادی دارای محدودیت بوده و بنا به دلایلی از جمله سایش قالب مساله کنترل ابعادی قطعات تولیدی با محدودیت های جدی همراه می باشد.

در حالت کلی سه نوع عملیات آهنگری وجود دارند: (الف) آهنگری در قالب بسته^{۲۳}، (ب) آهنگری در قالب باز^{۲۴} و (ج) آهنگری در قالب بسته با حفره ای برای فلش^{۲۵}. تجهیزات مورد استفاده در آهنگری در قالب باز

²¹-Forging

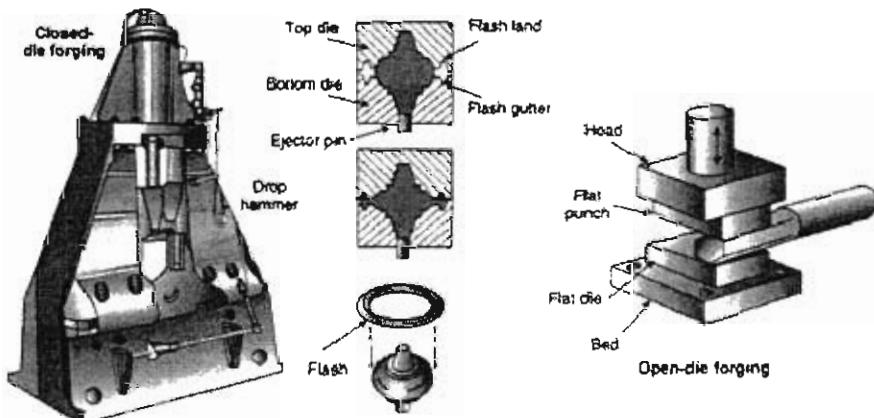
²²-Upsetting

²³-Closed Die Forging

²⁴-Open Die Forging

²⁵-Impression Forging

می‌تواند مشتمل بر یک سندان ثابت و چکش باشد و یا توسط یک پرس غول پیکر مجهز به کنترل کامپیوتروی انجام گردد. در حالت کلی فقط شکل‌های ساده را می‌توان با آهنگری در قالب‌های باز تولید نمود. آهنگری در قالب بسته از ماشین‌های پرس استفاده می‌کند و در عین حال قادر به تولید هندسه‌های پیچیده‌تر نیز می‌باشد. نکته اساسی در رابطه با طراحی قالب‌های آهنگری بسته، حصول اطمینان از پرشدن قالب بدون ایجاد فشار اضافه بر آن می‌باشد. در حالت کلی برای غلبه بر محدودیت یاد شده حفره‌ای برای فلش در داخل قالب تعییه می‌گردد، شکل (۱۰).

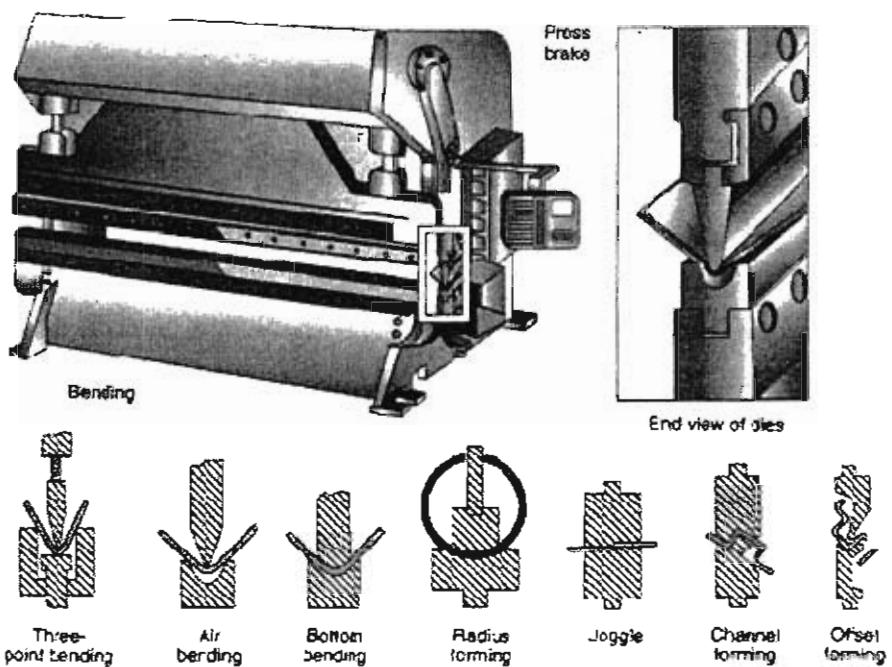


شکل (۱۰) فرآیندهای آهنگری.

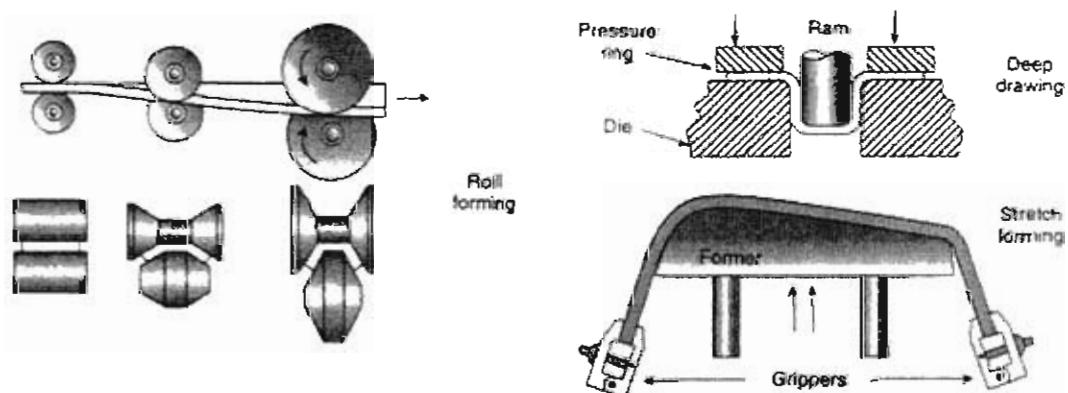
ب) فرآیندهای شکل دهی ورق

این فرآیندها دربردارنده استفاده از قطعات اولیه‌ای است که نسبت مساحت جانبی به ضخامت در آنها بسیار بزرگ می‌باشد. در این حالت تغییر در شکل معمولاً به خاطر خمش، اتساع و یا بارهای برشی می‌باشد. بنابراین، در بیشتر فرآیندهای شکل دهی از ورق تغییر شکل در اثر بارهای کششی به وجود می‌آید. همانند فرآیندهای شکل دهی حجیم، شکل دهی از ورق نیز نیازمند آن است که ماده به صورت طبیعی داکتیل بوده تا به طور موفقیت آمیزی شکل دهی گردد. در حالت کلی فرآیندهای مختلفی به منظور شکل دهی سرد از ورق فلزی وجود دارند. معمول ترین این فرآیندها کشش عمیق، خمکاری، شکل دهی غلتکی و اتساع می‌باشند، شکل (۱۱) و (۱۲).

طراحی فرآیند ساخت



شکل (۱۱) فرآیند خمکاری یک ورق فلزی.



شکل (۱۲) فرآیندهای شکل دهنده غلتکی، کشن عیق و اتساع.

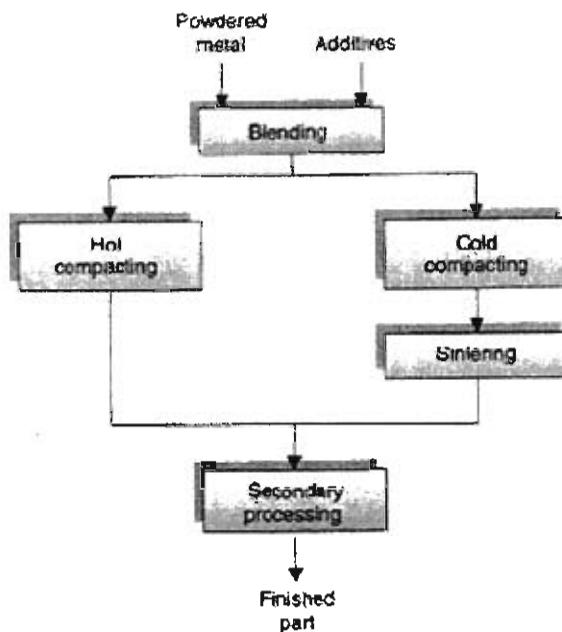
ج) شکل دهنی از پودر

که تحت عنوان متالورژی پودر هم نامیده می‌شود، عبارت از شکل دهنی پودرهای فلزی با استفاده از فشار یا درجه حرارت، و در پاره‌ای از موارد اعمال هردی آنها، می‌باشد. فرآیند متالورژی پودر واقعی به طور معمول در بردارنده چندین گام بوده که با یک سری فرآیندهای ثانویه همراه هستند. اولین گام عبارت از مخلوط کردن پودرهای فلزی با هر ماده افزودنی مورد نیاز از قبیل روانکارها و یا مواد چسباننده می‌باشد. فشرده کردن پودرهای مخلوط شده به دو صورت سرد و گرم انجام شده و به دنبال این مرحله انجام می‌شود. در حالت

فشرده سازی سرد، فقط فشار به پودر فلزی وارد می‌گردد و این در شرایطی است که در فشرده سازی گرم، هم حرارت و هم فشار به صورت همزمان اعمال می‌شوند.

به طور معمول قطعاتی که فشرده سازی گرم می‌شوند نیاز به فرآیندهای مکمل نخواهند داشت. در عین حال، در حالت فشرده سازی سرد پس از اتمام فرآیند، قطعه تحت تاثیر فرآیندی موسوم به پخت قرار می‌گیرد. این کاربرد کترول شده حرارت است که اجازه می‌دهد که چسب متالورژیکی بین پودر ذرات فلزی شکل بگیرد. درجه حرارتی که در این حالت استفاده می‌شود در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد درجه حرارت ذوب فلزات سازنده می‌باشد. پس از مرحله پخت، در صورت نیاز، فرآیندهای مکمل اجرا می‌شوند.

کلیات مربوط به فرآیند متالورژی پودر در شکل (۱۳)، نشان داده شده است. این روش در فرآیندهای ساخت کوچک، هندسه‌های پیچیده و مواردی که دیگر روش‌ها به سختی قابل کاربرد هستند، به کار می‌رود و قطعات تولیدی معمولاً به فرآیندهای مکمل نیازمند نخواهند بود.



شکل (۱۳) مراحل مختلف تولید قطعات به روش متالورژی پودر.

از نقطه نظر تجهیزات فشرده سازی، سیستم نیازمند یک دستگاه پرس است که قادر باشد که نیروهایی را در محدوده ۱ تا ۱/۷ مگانیوتن اعمال کنند. در عین حال، در بیشتر موارد ظرفیت پرس مورد نیاز کمتر از یک مگانیوتن می‌باشد. برای قطعات بزرگ، پرس‌هایی با ظرفیت ۴۵ مگانیوتن نیز ممکن است استفاده بشوند.

۳-۲- نحوه انتخاب فرآیندهای شکل دهی مناسب

در حالت کلی می توان معمول ترین روش های شکل دهی را مطابق نمادگذاری زیر، کدبندی نمود:

- *G11*: نورد
- *G12*: اکستروژن
- *G13*: قالب زنی برای کاهش سطح مقطع^{۲۶}
- *G14*: آهنگری
- *G21*: چرخکاری
- *G22*: کشش عمیق
- *G23*: خمکاری
- *G24*: پرسکاری

اکتون با استفاده از جداول (۳)، (۴) و (۵) می توان به مهندس طراح فرایند در انتخاب فرایند مناسب، کمک کرد. سطر اول در تمامی جدول ها نشان دهنده قابلیت هر یک از فرآیندها در ایجاد دقت ابعادی و زبری سطح می باشد. این داده ها برای فرآیندهای کار گرم و کار سرد تدوین شده اند. سطرهای بعدی قطعه کار را از نظر پیچیدگی شکلی، (قطعات ساده، باز، پیچیده و خیلی پیچیده)، تقسیم بندی می کنند. همچنین اعداد موجود در جداول نشان دهنده تقدم و اولویت فرآیندهای مختلف از نقطه نظر اقتصادی می باشند. به عنوان مثال عدد یک نشان دهنده اولین حق تقدم در یک سطر می باشد. همچنین در مواردی که فرآیند قادر به انجام منظور ما نباشد، از یک علامت ضربدر استفاده شده است.

انتخاب فرایند همچنین به تعداد قطعات موردنیاز وابسته است. در این بخش برای انتخاب بین فرآیندهای شکل دهی از یک ضریب نسبی تعداد استفاده می شود:

- فاکتور متنسب به تعداد پایین: همان تعداد تعریف شده در جدول (۲) می باشد.
- فاکتور متنسب به تعداد متوسط: ۵۰٪ بالاتر از تعداد پایین می باشد.
- فاکتور متنسب به تعداد بالا: دو برابر تعداد پایین می باشد.

بنابراین مراحل لازم جهت انتخاب فرآیند پیشنهادی از روندی به شرح زیر برخوردار می باشد:

گام (۱)؛ ضریب نسبی تعداد را مشخص نموده و جدول مناسب را انتخاب نمایید. برای تعداد پایین، متوسط و بالا به ترتیب از جداول (۳)، (۴) و (۵) استفاده نمایید.

گام (۲)؛ پیچیدگی شکل را مشخص کرده و وارد جدول مربوط به آن شوید.

گام (۳)؛ با توجه به ضخامت مقطع، سطر مناسب از جدول را انتخاب نمایید.

گام (۴)؛ در سطر انتخابی حرکت کنید تا اولین اولویت، کوچکترین عدد، را پیدا کنید.

²⁶-Swaging

گام (۵)؛ اطمینان حاصل کنید که فرایند انتخاب شده، دقت ابعادی و صافی سطح را جوابگو باشد. در غیر این صورت موله (۴) را مجدداً تکرار نمایید.

در حالت کلی، با وجود اینکه تعداد قطعات عامل مهمی در انتخاب نوع فرآیند شکل دهنی می‌باشد، اما در عمل ممکن است چندین فرایند منتخب برای ساخت مثلاً یک میله وجود داشته باشد. به عنوان نمونه در تولید پروفیل‌های *U* شکل، فرایندهای مختلفی از قبیل نورد، اکستروژن و ... را می‌توان به کار گرفت. نورد از اکستروژن سریع‌تر است اما ابزارهای آن گران‌تر می‌باشد. در ادامه برای روشن شدن مطالب از یک مثال نمونه استفاده خواهد شد.

جدول (۳) نحوه انتخاب فرآیند شکل دهنی مناسب در حالت تعداد قطعات پایین.

| | G11 | G12 | G13 | G14 | G21 | G22 | G23 | G24 |
|--|----------------|-----------------|----------------|------|------------------|-----------------|------------------|-----|
| Cold work | | | | | | | | |
| Accuracy ^۱ (mm) | 0.20 | 0.25 | 0.10 | X | 1.1 ^۲ | 0.20 | 0.35 | 0.2 |
| Surface finish (μm) R_s | 1.5 | 1.0 | 2.5 | X | 1.5 ^۳ | 1.0 | 0.8 ^۴ | 1.0 |
| Hot work | | | | | | | | |
| Accuracy ^۱ (mm) | 0.30 | 0.38 | 0.15 | 0.20 | 2.0 | X | X | X |
| Surface finish (μm) R_s | 12.5 | 1.5 | 12.5 | 3.2 | 4.0 | X | X | X |
| Mono | | | | | | | | |
| Long parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 3 | 2 | 1 ^۵ | X | X | X | X | X |
| thin section | 4 | 3 | 1 ^۶ | X | X | X | 2 | X |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 3 | 2 | 1 ^۷ | X | X | X | 4 | X |
| thin section | 4 | 3 | 2 ^۸ | X | X | X | 1 | X |
| Short parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 3 ^۹ | 2 ^{۱۰} | X | X | X | X | 1 | 4 |
| thin section | 3 ^۹ | 2 ^{۱۰} | X | X | X | X | 1 | 4 |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 3 ^۹ | 2 ^{۱۰} | X | X | X | X | 1 | 4 |
| thin section | 4 ^۹ | 3 ^{۱۰} | X | X | X | X | 1 | 2 |
| Open | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 3 | 2 ^{۱۱} | 1 | 5 ^{۱۲} | 4 |
| Thin section | X | X | X | 4 | 3 ^{۱۳} | 1 | 2 ^{۱۴} | 5 |
| Complex | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 2 | X | 1 ^{۱۵} | 4 ^{۱۶} | 3 |
| Thin section | X | X | X | 2 | X | 1 ^{۱۵} | 4 ^{۱۶} | 3 |
| Very complex | | | | | | | | |
| Thin section | X | X | X | X | X | X | 2 ^{۱۷} | 1 |

Notes:

- ^۱ – a subsequent process is required.
- ^۲ – only for symmetrical cross-sections (bars, rod, tubes).
- ^۳ – usually open only to one side of the parting line.
- ^۴ – this is an average value. Actual value depends on size.
- ^۵ – special applications can go down to 0.3 mm.
- ^۶ – depends on the raw material surface finish.

طراحی فرآیند ساخت

مثال؛ مطلوب است تعیین فرآیند اولیه ساخت برای تولید ۱۶۰۰ عدد از قطعه‌ای U شکل، با ضخامت دیواره $3/5$ میلیمتر، طول 10 متر، کوچکترین تolerانس ابعادی $mm \pm 0/5$ و کمترین زیری سطح برابر با $13 \mu m$ که بر حسب معیار R_a اندازه‌گیری شده است.

حل

قطعات U شکل از نظر شکل یک قطعه ساده محسوب می‌شوند. با توجه به جدول (۳-۷)، برای قطعات ساده و برای تعداد بیشتر از ۱۰۰۰ عدد، فرآیندهای شکل‌دهی پیشنهاد می‌شود. اکنون 5 مرحله زیر برای رسیدن به پاسخ مناسب دنبال می‌شوند:

گام (۱)؛ ضریب نسبی تعداد برابر با $=1/6$ $1600/1000$ بوده و بنابراین تعداد متوسط محسوب می‌شود و از جدول (۷-۷) استفاده می‌شود.

گام (۲)؛ شکل ساده است.

گام (۳)؛ قطعه بلند بوده و مقطعی نازک و یکنواخت دارد.

گام (۴)؛ اولین اولویت، عملیات اکستروژن می‌باشد.

گام (۵)؛ دقت ابعادی و صافی سطح جوابگوی نیازمندی‌های قطعه کار می‌باشد.
بنابراین فرآیند اکستروژن انتخاب می‌شود.

۴-۳- ابزار مورد استفاده در فرآیندهای شکل‌دهی و ریخته گری

در حالت کلی از ابزاری با عنوان *Mould* در فرآیندهای ریخته گری و از ابزاری با عنوان *Die* در فرآیندهای شکل‌دهی و ریخته گری استفاده می‌شود. معادل فارسی این دو کلمه "قالب" می‌باشد اما از نقطه نظر فنی این دو کلمه معادل نیستند. عبارت از قالبی است که مواد مذاب به داخل آن ریخته می‌شوند. از طرف دیگر *Die* به قالبی اطلاق می‌شود که ماده مذاب یا فلز جامد تحت فشار به داخل قالب رانده می‌شوند؛ به عنوان مثال می‌توان به قالب‌های مورد استفاده در فرآیندهای آهنگری، مهرزنی و یا قالب‌های فرآیند ریخته گری تحت فشار اشاره نمود. بدیهی است که در این دست فرآیندهای تولیدی طراحی قالب مهم ترین سیکل پروسه طراحی خواهد بود.

جدول (٤) تحریه انتخاب فرآیند شکل دهن مناسب در حالت تعداد قطعات متوسط.

| | G11 | G12 | G13 | G14 | G21 | G22 | G23 | G24 |
|--|------|------|----------------|------|------------------|------|------------------|-----|
| Cold work | | | | | | | | |
| Accuracy ^۱ (mm) | 0.20 | 0.25 | 0.10 | X | 1.1 ^۴ | 0.20 | 0.35 | 0.2 |
| Surface finish (μm) R_a | 1.5 | 1.0 | 2.5 | X | 1.5 ^۳ | 1.0 | 0.8 ^۳ | 1.0 |
| Hot work | | | | | | | | |
| Accuracy ^۱ (mm) | 0.30 | 0.38 | 0.15 | 0.20 | 2.0 | X | X | X |
| Surface finish (μm) R_a | 12.5 | 1.5 | 12.5 | 3.2 | 4.0 | X | X | X |
| Mono | | | | | | | | |
| Long parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 2 | 1 | 3 ^۱ | X | X | X | X | X |
| thin section | 2 | 1 | 4 ^۱ | X | X | X | 3 | X |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 2 | 1 | 3 ^۱ | X | X | X | 4 | X |
| thin section | 2 | 1 | 4 ^۱ | X | X | X | 3 | X |
| Short parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 2* | 1* | X | X | X | X | 3 | 4 |
| thin section | 3* | 2* | X | X | X | X | 1 | 4 |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 3* | 2* | X | X | X | X | 1 | 4 |
| thin section | 4* | 3* | X | X | X | X | 1 | 2 |
| Open | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 2 | 3 ^۲ | 1 | 5* | 4 |
| Thin section | X | X | X | 3 | 2 ^۲ | 1 | 5* | 4 |
| Complex | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 2 | X | 1* | 4* | 3 |
| Thin section | X | X | X | 2 | X | 1* | 4* | 3 |
| Very complex | | | | | | | | |
| Thin section | X | X | X | X | X | X | 5* | 4 |

Notes:

- * – a subsequent process is required.
- ^۱ – only for symmetrical cross-sections (bars, rod, tubes).
- ^۲ – usually open only to one side of the parting line.
- ^۳ – this is an average value. Actual value depends on size.
- ^۴ – special applications can go down to 0.3 mm.
- ^۵ – depends on the raw material surface finish.

جدول (۵) نحوه انتخاب فرآیند شکل دهنده مناسب در حالت تعداد قطعات بالا.

| | G11 | G12 | G13 | G14 | G21 | G22 | G23 | G24 |
|--|----------------|----------------|----------------|------|------------------|----------------|------------------|-----|
| Cold work | | | | | | | | |
| Accuracy ³ (mm) | 0.20 | 0.25 | 0.10 | X | 1.1 ⁴ | 0.20 | 0.35 | 0.2 |
| Surface finish (μm) R_s | 1.5 | 1.0 | 2.5 | X | 1.5 ⁵ | 1.0 | 0.8 ⁵ | 1.0 |
| Hot work | | | | | | | | |
| Accuracy ³ (mm) | 0.30 | 0.38 | 0.15 | 0.20 | 2.0 | X | X | X |
| Surface finish (μm) R_s | 12.5 | 1.5 | 12.5 | 3.2 | 4.0 | X | X | X |
| Mono | | | | | | | | |
| Long parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 1 | 2 | 3 ¹ | X | X | X | X | X |
| thin section | 1 | 2 | 4 ¹ | X | X | X | 3 | X |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 1 | 2 | 3 ¹ | X | X | X | 4 | X |
| thin section | 2 | 1 | 4 ¹ | X | X | X | 3 | X |
| Short parts with: | | | | | | | | |
| uniform cross | | | | | | | | |
| thick section | 1 [*] | 2 [*] | X | X | X | X | 3 | 4 |
| thin section | 2 [*] | 3 [*] | X | X | X | X | 1 | 4 |
| variable cross | | | | | | | | |
| thick section | 3 [*] | 2 [*] | X | X | X | X | 1 | 4 |
| thin section | 4 [*] | 3 [*] | X | X | X | X | 1 | 2 |
| Open | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 1 | 3 ¹ | 2 | 5 [*] | 4 |
| Thin section | X | X | X | 2 | 3 ¹ | 1 | 5 [*] | 4 |
| Complex | | | | | | | | |
| Thick section | X | X | X | 1 | X | 2 [*] | 4 [*] | 3 |
| Thin section | X | X | X | 2 | X | 1 [*] | 4 [*] | 3 |
| Very complex | | | | | | | | |
| Thin section | X | X | X | X | X | X | 2 [*] | 1 |

Notes:

- ¹ – a subsequent process is required.
- ² – only for symmetrical cross-sections (bars, rods, tubes).
- ³ – usually open only to one side of the parting line.
- ⁴ – this is an average value. Actual values depend on size.
- ⁵ – special applications can go down to 0.3 mm.
- ^{*} – depends on the raw material surface finish.

فصل چهارم: نحوه انتخاب فرایند
ماشینکاری مناسب

کارگاه آموزشی طراحی فرایند ساخت

طراحی فرایند ساخت



در حال حاضر فرآیندهای ماشینکاری، پرکاربردترین فرآیندهای صنعتی را به خود اختصاص میدهند. این تولیدات صنعتی را به خاطر تنوع شکلی و درجه دقی است که میتوان با استفاده از این دسته فرآیندها نسبت به دیگر فرآیندهای تولیدی از قبیل ریخته‌گری، آهنگری و متالورژی پودر به دست آورد.

دانشکده مهندسی
مکانیک دانشگاه صنعتی
امیرکبیر

در حال حاضر فرآیندهای ماشین کاری، پرکاربردترین فرآیندهای ساخت بوده و در حدود ۸۰ درصد حجم تولیدات صنعتی را به خود اختصاص می‌دهند. این امر عمدتاً به خاطر تنوع شکلی و درجه دقتی است که می‌توان با استفاده از این دسته فرآیندها نسبت به دیگر فرآیندهای تولیدی از قبیل ریخته‌گری، آهنگری و متالورژی پودر به دست آورد. از طرف دیگر بسیاری از قطعات که تولید آنها با استفاده از ریخته‌گری و یا آهنگری می‌باشد، فرم نهایی خود را با عملیات ماشین کاری پیدا می‌کنند. در عین حال قطعاتی هم وجود دارند که کاملاً از طریق فرآیندهای ماشین کاری تولید می‌شوند.

در حالت کلی تنوع شکلی و دقت قابل حصول توسط فرآیندهای ماشین کاری دلیل اصلی کاربرد آنها می‌باشد. بیش از این، دلایل مشخص دیگر برای استفاده از فرآیندهای ماشین کاری عبارتند از:

- نیاز به دقت ابعادی و پرداخت سطحی بهتر نسبت به آنچه که در فرآیندهای ریخته‌گری و یا دیگر فرآیندهای شکل‌دهی به تنهایی قابل حصول می‌باشد.
 - نیاز به پرداخت قطعاتی که عملیات حرارتی می‌شوند.
 - در ساخت دسته قطعات کوچک، ماشین کاری اقتصادی‌ترین روش تولید می‌باشد.
- در عین حال، یک سری محدودیت‌های جدی نیز در رابطه با فرآیندهای ماشین کاری وجود دارند:
- اتلاف مواد به دلیل ماهیت طبیعی فرآیند.
 - نیاز به انرژی، سرمایه گذاری و نیروی کار بیشتر به ازای یک حجم تولید مشخص نسبت به دیگر روش‌ها.
 - نیاز به مدت زمان بیشتری برای برداشت مواد به ازای یک حجم تولید مشخص نسبت به دیگر فرآیندهای تولیدی.

صرف نظر از این محدودیت‌ها، امروزه فرآیندهای ماشین کاری به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته و نقشی غیر قابل انکار را در فرآیندهای ساخت ایفا می‌کنند.

۴-۱- دسته‌بندی فرآیندهای ماشین کاری

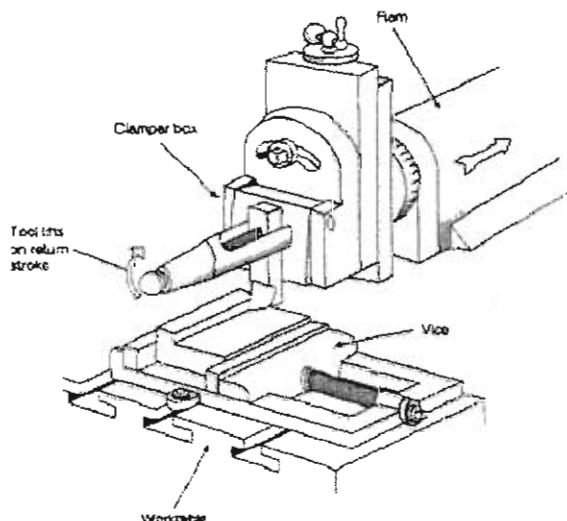
در حالت کلی فرآیندهای ماشین کاری را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

- فرآیندهای برش که از ابزار برشی استفاده می‌کنند.
- فرآیندهایی که از ابزارهای ساینده استفاده می‌کنند.
- فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی.

الف) فرآیندهای برشی

فرآیندهای برشی به نوبه خود و بسته به اینکه حرکت اولیه به ابزار داده می‌شود و یا به قطعه کار به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند:

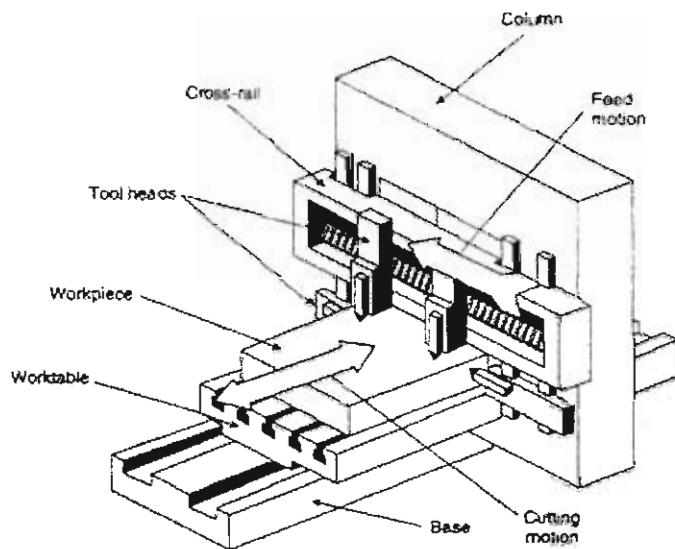
صفحه تراش با حرکت اصلی به ابزار^۱: در این حالت حرکت اولیه به ابزار داده شده که یک حرکت خطی است و حرکت پیشروی به قطعه کار داده می‌شود؛ برای این منظور قطعه کار به میز کار بسته شده و میز کار به صورت عرضی نسبت به ابزار و در فاصله بین دو کورس مطابق شکل (۱) پیشروی می‌کند. ماشین‌های صفحه تراش عمدتاً برای قطعات نسبتاً کوچک استفاده می‌شوند.



شکل (۱) دستگاه صفحه تراش با حرکت اصلی به ابزار.

صفحه تراش با حرکت اصلی به میز^۲: در این حالت حرکت اولیه که یک حرکت خطی است به قطعه کار داده می‌شود که به میز کار متصل است. همچنین حرکت پیشروی به ابزار داده می‌شود، شکل (۲). این فرآیند کاملاً مشابه فرآیند صفحه تراش با حرکت اصلی به ابزار بوده و به طور معمول برای قطعات بزرگتر استفاده می‌شود.

¹-Shaping Machine
²-Planing Machine

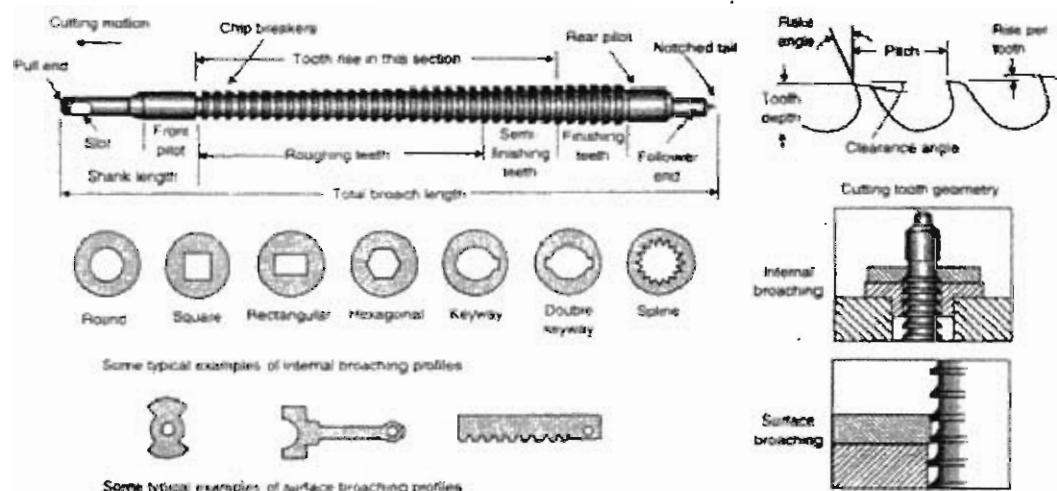


شکل (۲) دستگاه صفحه تراش با حرکت اصلی به میز.

خانکشی^۳؛ در این حالت ابزار در عرض قطعه کار جابجا شده و پیش روی از طریق افزایش در اندازه دندانه های ابزار و پهن شدگی تدریجی آنها تامین می شود. بنابراین عملیات خان کشی را می توان بر روی هر دوی سطوح داخلی و خارجی اجرا کرد. این عملیات مشابه فرآیندهای صفحه تراشی بوده و تفاوت آنها در این است که عملیات خانکشی یک سطح را در یک کورس تولید می کند اما فرآیندهای صفحه تراشی یک سطح را طی مجموعه ای از چند کورس تولید می کنند.

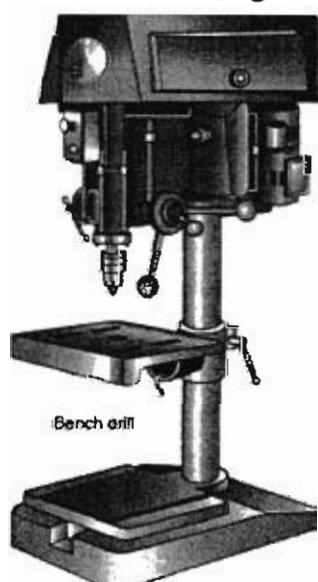
در حالت کلی با استفاده از عملیات خانکشی می توان پروفیل های قاعده متند از قبیل دایره، مربع، مستطیل، شش ضلعی، جانخار و یا پروفیل های اسپلاین را تولید نمود. همچنین ابزارهای خانکشی ممکن است در عملیات های خشن تراشی و یا پرداختکاری نیز مورد استفاده قرار بگیرند. بعضی نمونه های مرسوم ابزارهای خانکشی پروفیل ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

³-Broaching



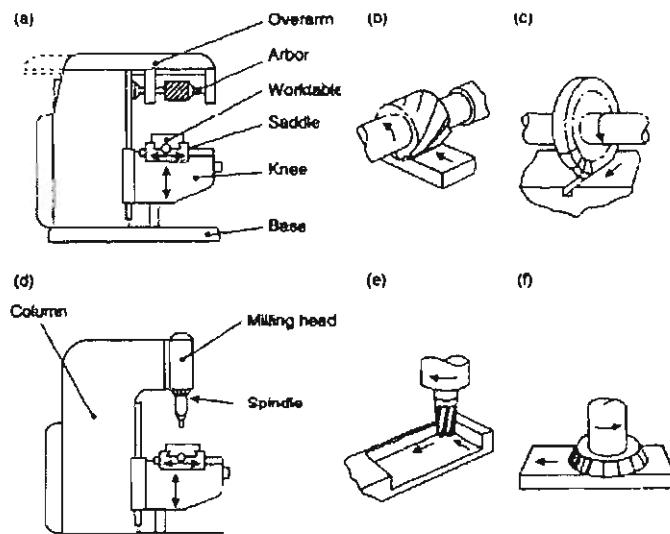
شکل (۳) ابزارهای خانکشی.

سوراخکاری؛ در این دسته از ماشین آلات حرکت اولیه دوران مته بوده و سپس مته به داخل قطعه کار تغذیه می شود. عده ماشین های مته به صورت عمودی هستند، شکل (۴). معمول ترین ابزار مورد استفاده برای ایجاد سوراخ های مته های مارپیچ هستند. این مته ها به صورت دو، سه و یا چهار لبه ساخته می شوند. از مته های دو لبه عمده اتاً در سوراخکاری قطعات جامد استفاده می شود و از مته های سه و چهار لبه نیز غالباً برای بزرگ کردن قطر سوراخ هایی که قبلاً ایجاد شده، استفاده می شود.



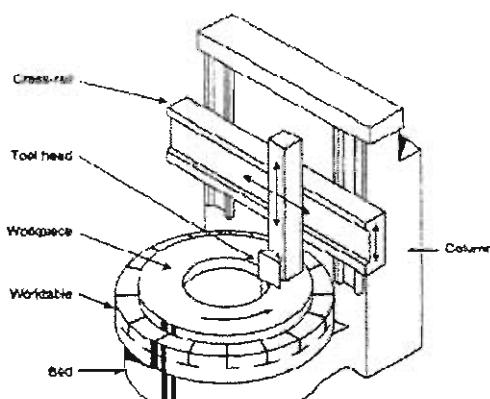
شکل (۴) دستگاه مته رومیزی.

فرز کاری؛ در این نوع ماشین ابزار تیغه فرز می‌چرخد و قطعه در حالی که به میز کار بسته شده، به ابزار تغذیه می‌شود. ماشین‌های فرز همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده می‌توانند افقی یا قائم باشند.



شکل (۵) ماشین‌ها و عملیات‌های فرز کاری (الف) ماشین فرز افقی (ب) فرز کاری غلتکی (ج) شبار تراشی (د) ماشین فرز عمودی (ه) نیز فرز انگشتی (و) نیز فرز کف نواش.

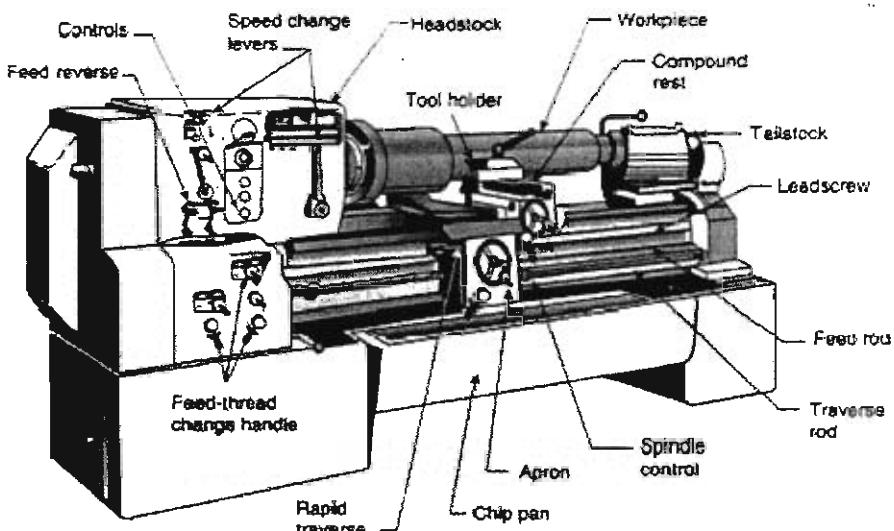
بورینگ؛ در این حالت بسته به ماشین و کاربرد آن، دوران ابزار و قطعه کار هر دو ممکن هستند. به طور معمول، برای هندسه‌های پیچیده قطعه کار چرخانده می‌شود. در حال حاضر ماشین‌های بورینگ دقیق در ابعاد و انواع مختلف و در دو نوع افقی و قائم عرضه می‌شوند، شکل (۶). همچنین ابزارهای بورینگ را می‌توان بر روی ماشین‌های تراش نیز مورد استفاده قرار داد.



شکل (۶) دستگاه بورینگ عمودی.

فرآیند بورینگ در عمل یک عملیات تراشکاری داخلی بوده و به دو روش اجرا می‌شود؛ نوع اول بورینگ استوانه‌ای نامیده می‌شود و از آن برای تولید سطوح استوانه‌ای استفاده می‌شود. نوع دیگر عملیات عبارت از بورینگ مخروطی بوده و از آن برای تولید سطوح مخروطی استفاده می‌شود.

تراشکاری؛ در این حالت حرکت اصلی دوران قطعه کار بوده و ابزار برشی نیز حرکت پیش روی را انجام می‌دهد. از نقطه نظر تجهیزات کترلی در حالت کلی چهار نوع ماشین تراش وجود دارد: کترل دستی، نیمه خودکار، تمام خودکار و کامپیوترا. در عین حال اغلب ماشین‌هایی که امروزه در کارگاه‌ها مشاهده می‌شوند نمونه‌هایی با کترول دستی بوده و بیشتر تراش‌های رومیزی^۴، جعبه دندۀ ای^۵ و نمونه‌های بر جکدار^۶ هستند. در شکل (۷) تصویری از یک ماشین تراش جعبه دندۀ ای نشان داده شده است. تراش رومیزی نسبت به نمونه‌های جعبه دندۀ ای کوچکتر بوده و قابل نصب بر روی میز می‌باشدند. همچنین در تراش‌های بر جکدار مرغک با یک بر جک ابزارگیر که معمولاً شش گوش است و بر روی آن می‌توان همزمان شش ابزار را نصب نمود، جایگزین شده است. بر جک ابزارگیر بر روی کشویی عرضی نصب می‌شود. بنابراین، می‌تواند در امتداد محور Z و همچنین به صورتی عرضی و در امتداد محور X حرکت نماید. لازم به یادآوری است که ماشین‌های بر جکدار با ماشین‌های تراشی که در آنها ابزار فقط در امتداد محور Z جابجا می‌شود^۷ متفاوت هستند.



شکل (۷) ماشین تراش جعبه دندۀ ای.

⁴-Bench Lathe

⁵-Engine Lathe

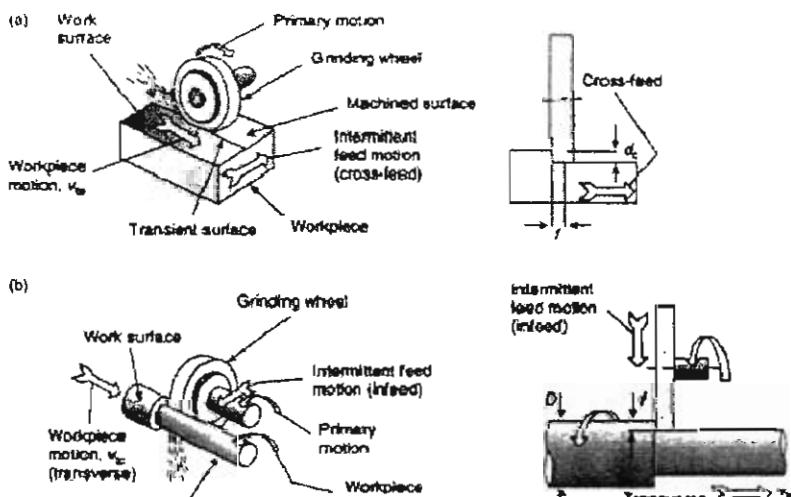
⁶-Turret Lathe

⁷-Capstan

ماشین کپی تراش یا کانتور تراش یک ماشین نیمه خودکار است که امکان کپی برداری از یک نمونه را فراهم می‌کند. همچنین یک ماشین تراش خودکار ماشینی است که سیستم کنترل دستی آن با مکانیسم‌های جایگزین شده و عمدها در دو نوع با اسپیندل افقی و قائم عرضه می‌شود. نمونه‌هایی از ماشین‌های تراش وجود دارد که سیستم تغذیه قطعه در آنها خودکار می‌باشد^۱; در این ماشین‌ها قطعه خام به صورت اتوماتیک و پس از آنکه قطعه قبلی کامل شد، تغذیه می‌شود. این روش سابق بر این عمدها برای تولید قطعات رزووه شده استفاده می‌شد اما امروزه برای تولید گسترده وسیعی از قطعات استفاده می‌شود. امروزه بسیاری از قطعاتی را که قبلًا با استفاده از ماشین‌های نیمه خودکار و تمام خودکار تولید می‌شدند، با استفاده از ماشین‌های کنترل عددی و یا ماشین‌سترهای تولید می‌کنند. در چنین ماشین‌هایی جابجایی و کنترل ماشین ابزار از طریق یک کامپیوتر و یا به کمک موتورهای پله‌ای صورت می‌گیرد.

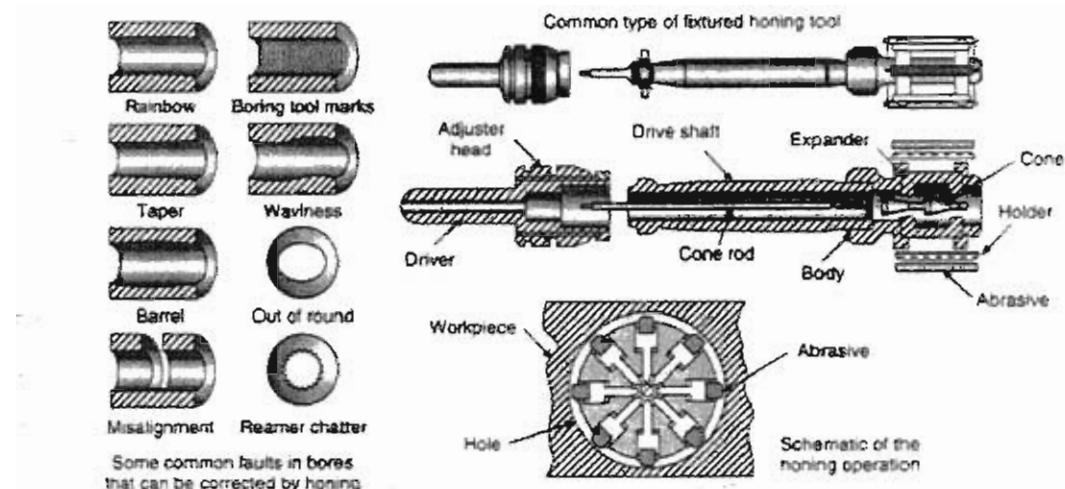
ب) فرآیندهای سایشی

دلیل اصلی استفاده از فرآیندهای سایشی عبارت از بهبود پرداخت سطوح قبلًا ماشین کاری شده می‌باشد. بنابراین، این فرآیندها عمدها فرآیندهای نهایی نیز نامیده می‌شوند. سنگ زنی؛ در حالت کلی فرآیندهای سنگ زنی از تنوع و تجهیزات متنوعی برخوردار هستند. معمول ترین ابزار مورد استفاده در این حالت عبارت از چرخ سنگ‌ها می‌باشند. این وسائل برای هر دوی فرآیندهای سنگ زنی سطوح تخت و استوانه‌ای، مطابق شکل (۸)، مورد استفاده قرار می‌گیرند.



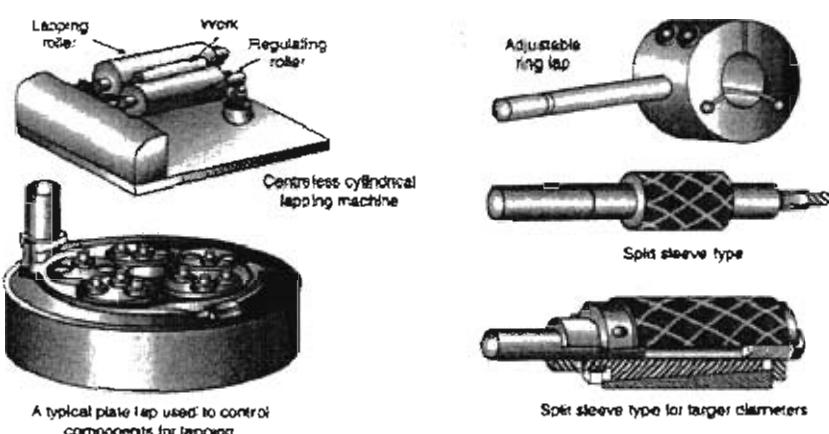
شکل (۸) فرآیند سنگ زنی تخت و استوانه‌ای.

هونینگ^۹؛ در این حالت از سنگ‌های ساینده بر روی یک ماندرل باز شونده برای برداشت مقادیر بسیار جزئی از سطح قطعات استفاده می‌شود، شکل (۹). کاربرد عمده این روش پرداخت سطوح سوراخ‌ها می‌باشد. در عین حال، این روش در پاره‌ای از موارد در رابطه با سطوح خارجی تخت و یا استوانه‌ای و یا برای برداشتن لبه‌های ابزارهای برشی نیز استفاده می‌شود.



شکل (۹) فرآیند هونینگ و تجهیزات.

لپینگ^{۱۰}؛ این روش در ابتدا برای سطوح تخت و استوانه‌های خارجی استفاده می‌شد. اما امروزه سطوح داخلی را نیز می‌توان با استفاده از ماشین‌های لپینگ بدون مرغک پرداخت نمود، شکل (۱۰).



شکل (۱۰) فرآیند لپینگ و تجهیزات.

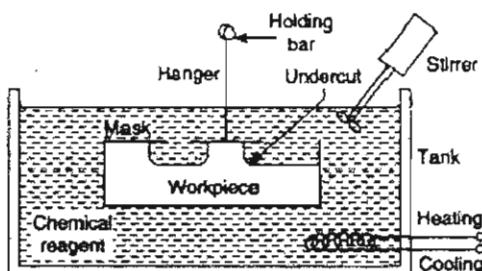
^۹-Honing
^{۱۰}-Lapping

پولیش^{۱۱}؛ این عملیات با استفاده از دیسک‌ها و یا تسممهایی که از جنس چرم و یا پارچه بوده و بر روی آنها پوششی از پودرهای ساینده قرار گرفته، انجام می‌شود. در حالت کلی در یک عملیات سایش ظریف، ذرات مواد از سطح برداشته شوند و این در حالی است که گرمای ناشی از اصطکاک سبب نرم و براق شدن سطح می‌گردد. این عمل ترکیبی سبب ایجاد یک سطح صاف و براق می‌گردد.

با芬یگ^{۱۲}؛ این عملیات مشابه عملیات پولیش بوده با این تفاوت که دیسک‌های استفاده شده در این حالت معمولاً نرم تر بوده و همچنین پودر ساینده نیز نرم تر بوده و این امکان را فراهم می‌کند که سطحی به مراتب هموارتر ایجاد گردد.

ج) فرآیندهای ماشین کاری غیرستی

فرز کاری شیمیایی^{۱۳}؛ در این روش ماده با استفاده از واکنش شیمیایی برداشته می‌شود. در این صورت چنانچه ماده با ماسک پوشیده شده باشد، ماشین کاری نخواهد شد. همچنین پس از تکمیل فرآیند، به منظور جلوگیری از واکنش بیشتر و برداشت ناخواسته ماده، قطعات کاملاً تمیز می‌شوند. این روش ابتدا در صنایع هوافضا و برای برداشت مواد از پوسته پنل‌ها به منظور کاهش وزن آنها صورت می‌گرفت. در شکل (۱۱) شماتیک این فرآیند نشان داده شده است.



شکل (۱۱) شماتیک فرز کاری شیمیایی.

ماشین کاری الکترو شیمیایی^{۱۴}؛ در این روش ماده از طریق الکترولیز از قطعه برداشته می‌شود و در واقع عکس عملیات آبکاری فلزات می‌باشد. برای این منظور قطعه در یک سیال الکترولیتی غوطه‌ور شده و ابزار به عنوان

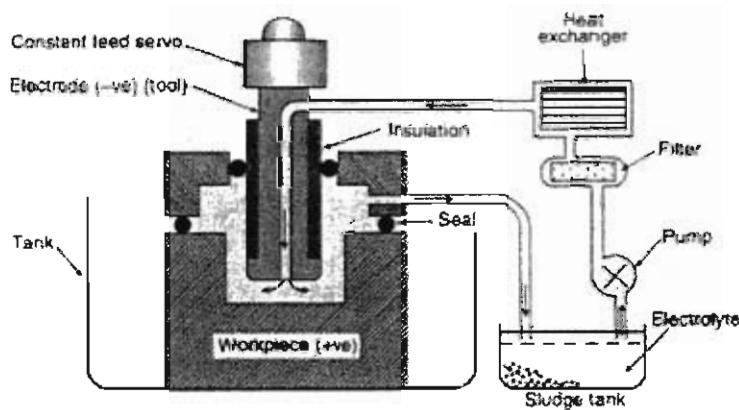
¹¹-Polishing

¹²-Buffing

¹³-Chemical Milling

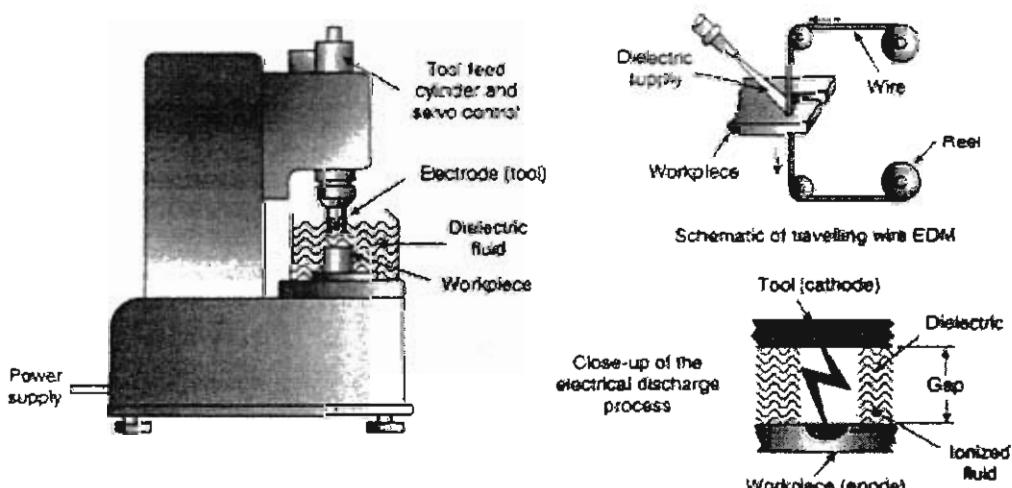
¹⁴-Electro Chemical Machining (ECM)

الکترود منفی و قطعه کار به عنوان الکترود مثبت عمل می‌کنند. در نهایت ماده در اثر واکنش الکتروشیمیابی حل شده و به شکل ابزار در می‌آید. شماتیک این فرآیند نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲) شماتیک ماشین کاری الکتروشیمیابی.

ماشین کاری تخلیه الکتریکی^{۱۰}؛ در این حالت ابزار و قطعه به عنوان الکترود عمل می‌کنند. ماده قطعه کار در اثر جرقه ناشی از تخلیه الکتریکی ایجاد شده توسط منبع تغذیه، بخار می‌شود. همچنین از یک سیال دی-الکتریک نیز به منظور خنک کردن سیستم استفاده می‌شود. نمونه‌ای از یک دستگاه اسپارک در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳) شماتیک ماشین کاری تخلیه الکتریکی.

^{۱۰}-Electro Discharge Machining (EDM)

طراحی فرایند ساخت

۴-۲- نحوه انتخاب فرآیندهای ماشین کاری مناسب

اولین گام در مورد انتخاب نوع فرایند ماشینکاری عبارت از تصمیم گیری در مورد انتخاب فرآیند برآده برداری پایه می باشد. برای این منظور فرآیندهای برآده برداری اصلی مطابق جدول (۱)، بر اساس قابلیت فرایند تولید هندهای مختلف، به سه گروه شامل قطعات متقارن دوار^{۱۶}، قطعات منشوری^{۱۷} و قطعات با هنده خاص از قبیل سوراخ ها و رزووه ها تقسیم بندی می شوند.

جدول (۱) فرآیندهای ماشینکاری مبنای بر اساس توانایی تولید هندهای مختلف تقسیم بندی شده اند.

| گروه های شکلی اصلی | | | |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------------|--|
| قطعات متقارن دوار | قطعات منشوری | قطعات با هنده خاص (سوراخ و رزووه) | |
| تراشکاری | فرزکاری | سوراخکاری | |
| سنگ زنی | برقو زدن | سنگ زنی | |
| هونینگ | بورینگ | هونینگ | |
| فرزکاری محیطی | لپینگ | لپینگ | |
| سنگ زنی | پولیش | پولیش | |
| پرداختکاری کوبشی ^{۱۸} | | | |
| خانکشی | | | |
| قلابریز کاری | | | |
| فرزکاری | | | |

در این حالت ممکن است قطعه ای دارای فیچرهای متعددی بوده که لزوماً در یک دسته بندی قرار نداشته و هر یک به صورت جداگانه و بر روی یک ماشین تولید می شوند. همچنین لازم به ذکر است که انتخاب نهایی نوع فرآیند کاملاً به دقت قطعه مورد نظر وابسته می باشد. به بیان دیگر مهمترین پارامتر در انتخاب نوع تکنولوژی ماشینکاری عبارت از زیری سطح و تلرانس های هندسی و ابعادی حاصل از آن فرایند است. مقادیر زیری قابل حصول در اثر اعمال فرایندهای ماشینکاری مختلف، در جدول (۲) گردآوری شده است. از دیگر عوامل مؤثر در انتخاب فرایند ماشینکاری می توان به ساختار کلی، وزن، جنس و عملیات حرارتی قطعه و همچنین به حجم تولید و شرایط کارگاهی اشاره کرد.

^{۱۶}-Round Symmetrical

^{۱۷}-Prismatic

^{۱۸}-Burnishing

جدول (۲) محدوده زیری های قابل حصول در فرآیندهای ماشینکاری مختلف.

| فرآیند | قطعات متقارن دوار | قطعات منشوری | سوراخ ها و رزوه ها |
|------------------|--------------------------------|--------------|--------------------|
| فرآیند | قطعات متقارن دوار | قطعات منشوری | سوراخ ها و رزوه ها |
| تراشکاری | ماشین تراش | ۲۵/۰ | ۰/۸ |
| سنگ زنی | ماشین سنگ | ۱/۶ | ۰/۱ |
| هونینگ | هونن | ۰/۸ | ۰/۱ |
| پولیش | ماشین پولیش | ۰/۵ | ۰/۱ |
| لیپنگ | ماشین لیپنگ | ۰/۵ | ۰/۰۵ |
| فرزکاری | ماشین فرز | ۲۵/۰ | ۰/۸ |
| سنگ زنی | ماشین سنگ | ۱/۶ | ۰/۱ |
| هونینگ | هونن | ۰/۸ | ۰/۱ |
| پولیش | ماشین پولیش | ۰/۵ | ۰/۱ |
| لیپنگ | ماشین لیپنگ | ۰/۵ | ۰/۰۵ |
| سوراخ کاری | ماشین تراش و مته | ۲۵/۰ | ۱/۶ |
| برقو کاری | ماشین تراش و فرز، مته ستونی | ۶/۳ | ۰/۸ |
| بورینگ | ماشین تراش | ۱۰/۰ | ۰/۸ |
| فرزکاری محیطی | ماشین فرز | ۱۵/۰ | ۰/۸ |
| سنگ زنی | ماشین سنگ | ۱/۶ | ۰/۱ |
| پرداختکاری کویشی | ماشین پلیس زدایی | ۰/۴ | ۰/۲ |
| خانکشی | ماشین خانکشی | ۶/۳ | ۰/۸ |
| فرزکاری | ماشین فرز | ۲۵/۰ | ۰/۸ |

در حالت کلی توانایی فرآیندهای مختلف برای ایجاد یک زیری سطح مخصوص به عوامل زیادی بستگی دارد. به عنوان مثال در عملیات رو تراشی سطح نهایی به پارامترهایی تغییر نرخ پیشروی، سرعت برش، شرایط

ابزار، خنک کاری و صلبیت ماشین بستگی داشته و یا در عملیات سنگزنانی، زبری سطح نهایی به سرعت محیطی سنگ، سرعت دوران قطعه، نرخ پیشروی، اندازه ذرات ساینده و جنس چسب سنگ بستگی دارد. همچنین ترتیب فرآیند ها برای هر گروه شکلی بر اساس تقدم و محدودیتهای تکنولوژیکی است. به عبارت دیگر اگر فرآیندی که در ابتدا انتخاب شده نتواند جوابگوی زبری سطح مورد نیاز باشد ممکن است یک فرآیند تکمیلی اضافه شود که لزوماً جایگزین فرآیند اول نخواهد شد.

تلرانس ابعادی نیز اثری شبیه به زبری سطح دارد. در حالت کلی می‌توان رابطه ای را بین تلرانس ابعادی و زبری سطح در نظر گرفت، جدول (۳). این مطلب به معنای آن است که برای رسیدن به یک تلرانس ابعادی، یک زبری سطح حداقل مورد نیاز می‌باشد. در حالت کلی طراح فرآیند می‌تواند با استفاده از جدول (۳)، تلرانس ابعادی را به زبری سطح معادل و یا بالعکس تبدیل نماید.

جدول (۳) تبدیل تلرانس ابعادی به زبری سطح معادل و یا بالعکس.

| تلرانس دوطرفه معادل (mm) \pm صالی سطح (mm) | |
|--|----------|
| >0.20 | <0.005 |
| ۰.۸۲ | ۰.۰۱۰ |
| ۰.۴۵ | ۰.۰۱۵ |
| ۰.۸۰ | ۰.۰۲۰ |
| ۱.۰ | ۰.۰۳۰ |
| ۱.۳۲ | ۰.۰۴۰ |
| ۱.۶۰ | ۰.۰۵۰ |
| ۱.۸۰ | ۰.۰۶۰ |
| ۲.۱۲ | ۰.۰۸۰ |
| ۲.۵۰ | ۰.۱۰۰ |
| ۳.۷۵ | ۰.۱۵۰ |
| ۵.۰۰ | ۰.۲۰۰ |
| ۶.۲۵ | ۰.۲۵۰ |
| ۹.۱۲ | ۰.۳۵۰ |
| ۱۲.۵۰ | ۰.۶۰۰ |
| ۲۵.۰۰ | ۱.۰۰۰ |

در رابطه با تلرانس های هندسی نیز مقادیر قابل حصول در اثر استفاده از فرآیندهای مختلف ماشینکاری در

جدول (۴) نشان داده شده است. در عین حال بایستی به این نکته توجه شود که تلرانس هندسی حاصل از یک عملیات ماشینکاری به پارامترهایی از قبیل نحوه گیره بندی قطعه کار نیز وابسته می باشد.

جدول (۴) محدوده تلرانس های هندسی قابل حصول در فرایندهای ماشینکاری مختلف.

| فرایند پایه | توازی | تعامد | هم محوری | مقدار تلرانس هندسی (mm) | زاویه |
|-----------------|--------|-------|-------------|-------------------------|-------|
| تراشکاری | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ - ۰/۰۱ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ |
| فرزکاری | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | - | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ |
| سوراخکاری | ۰/۲ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۱ |
| بورینگ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ |
| سنگ زنی | ۰/۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ |
| هونینگ یا لپینگ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ |
| پرداخت نهایی | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۲ |

بنابراین با استفاده از داده های موجود در جداول (۲) و (۴) می توان فرایند ماشینکاری پایه را انتخاب کرد. در صورتی که فرآیند انتخاب شده پاسخگوی تلرانس مورد نیاز بر روی نقشه قطعه باشد، هیچ فرآیند تکمیلی مورد نیاز نخواهد بود ولی چنانچه این فرایند نتواند تلرانس هندسی مورد نیاز را تامین کند، بایستی فرایندهای دیگری اضافه شوند. همچنین وقتی بیش از یک فرآیند برای ماشینکاری یک قطعه مورد نیاز باشد، تلرانس ابعادی و زیری سطح تا زمانی که فرآیند اول در حال خشن تراشی قطعه برای فرآیند دوم است، می تواند افزایش یابد. دلیل این امر به خاطر آن است که این مقادیر به طور مستقیم روی ابعاد قطعه نهایی تاثیر نمی گذارند و فقط نقش آماده سازی قطعه را بر عهده دارند.

در حالت کلی قوانین زیر می توانند سبب تسریع در فرایند تصمیم سازی در مورد فرایندهای انتخابی بشوند:

(۱) در نقشه تولید، برای فرایند اول زیری سطح را که نمی تواند توسط فرایند اول تولید شود به بیشینه فرایندهای بعدی افزایش دهید.

(۲) برای تعیین اضافه ماشینکاری، ابعاد اصلی قطعه را به اندازه ۱۰ برابر تلرانس معادل با زیری سطح جدید تغییر دهید. این تغییر در ابعاد بیرونی خود را به صورت افزایش بعد و در ابعاد درونی در قالب کاهش بعد نشان خواهد داد.

(۳) تلرانس ابعادی را از حاصل ضرب تلرانس معادل در ضریب ۲ بدست آورید. اگر نتیجه از تلرانس اصلی بزرگتر بود، از آن بعنوان تلرانس برای ابعاد بهینه شده استفاده کنید و اگر نتیجه کوچکتر از تلرانس اصلی بود، از همان تلرانس اصلی استفاده کنید.
در ادامه برای روشن شدن مطلب، از دو مثال نمونه استفاده خواهد شد.

مثال (۱): یکی از ابعاد خارجی قطعه ای متقارن و دوار باشی مقداری برابر $0/15 \pm 60$ با و زیری سطح، بر حسب R_a برابر با $0/5 \mu m$ داشته باشد. فرایند پیشنهادی برای ماشینکاری بعد مورد نظر را مشخص نماید.
حل

فرایند اولیه؛ قطعه متقارن و دوار بوده و بنابراین با مراجعه به جدول (۲) می توان گفت که اولین فرایند ماشینکاری تراشکاری می باشد. از طرفی زیری سطح متناظر با تلرانس اصلی، یعنی $0/15$ ، از جدول (۳) برابر با $\mu m 3/75$ خواهد بود. مقدار زیری معادل از زیری مورد نیاز، یعنی $\mu m 0/5$ ، بیشتر بوده و لذا بنا بر قاعده (۱) مقدار زیری سطح برابر با $0/5 \mu m$ ملاک عمل خواهد بود. از طرفی کمترین مقدار زیری قابل حصول در عملیات تراشکاری برابر با $0/8 \mu m$ بوده و بنابراین فرایند تکمیلی مورد نیاز می باشد.

فرایند تکمیلی؛ مجدداً با استفاده از جدول (۲) فرایند تکمیلی، سنگزنانی، تعیین خواهد شد. کمترین مقدار زیری قابل حصول در فرایند سنگزنانی $0/1 \mu m$ و بیشترین مقدار آن $1/6 \mu m$ می باشد. پس فرایند سنگزنانی را می توان برای تولید قطعه مورد نظر مورد استفاده قرار داد. از طرفی مقدار زیری در عملیات تراشکاری هم برابر با بیشترین مقدار زیری عملیات سنگ زنانی، یعنی $1/6 \mu m$ ، قرار داده می شود. از جدول (۳) تلرانس معادل با زیری $1/6 \mu m$ ، برابر با $0/05 mm$ بوده و در نتیجه بر طبق قاعده (۲) مقدار اضافه ماشینکاری برابر با $= 0/5 \times 10 = 0/05 mm$ خواهد بود.

ملاحظات؛ در عملیات تراشکاری مقدار بعد برابر با $0/5 mm$ خواهد بود. از طرفی مقدار تلرانس معادل برابر با $0/1 mm = 0/05 \times 2$ بوده که از تلرانس اصلی بعد $0/15 mm$ ، کوچکتر بوده و لذا بر اساس قاعده (۳) از همان تلرانس اصلی استفاده خواهد شد.

خلاصه؛ قطعه کار در مرحله نخست برای رسیدن به حالت $R_a 0/15 \mu m$ ؛ $1/6 \mu m \pm 0/05 mm$ روتراشی شده و سپس برای رسیدن به حالت $R_a 0/05 \mu m$ ؛ $0/05 \mu m \pm 0/05 mm$ سنگ زنانی می گردد.

مثال (۲)؛ یکی از ابعاد قطعه منشوری تخت بایستی مقداری برابر $mm ۰/۰۱ \pm ۸۵$ و زیری سطح، بر حسب R_a برابر با $\mu m ۰/۵$ داشته باشد. همچنین ضروری است که سطح حاصل از عملیات ماشینکاری نسبت به سطح مبنای خود تلرانس هندسی موازی بودن برابر با $۰/۰۰۰۸$ داشته باشد. فرایند پیشنهادی برای ماشینکاری بعد مورد نظر را مشخص نماید.

حل

فرایند اولیه؛ قطعه منشوری بوده و بنابراین با مراجعه به جدول (۲) می‌توان گفت که اولین فرایند ماشینکاری فرزکاری می‌باشد. از طرفی زیری سطح متناظر با تلرانس اصلی از جدول (۳) برابر با $\mu m ۰/۳۲$ خواهد بود. مقدار زیری معادل از زیری مورد نیاز، یعنی $\mu m ۰/۵$ ، کمتر بوده و لذا بنا بر قاعده (۱) مقدار زیری سطح برابر با $\mu m ۰/۳۲$ ملکی عمل خواهد بود. از طرفی کمترین مقدار زیری قابل حصول در عملیات فرزکاری برابر با $\mu m ۰/۸$ بوده و بنابراین فرایند تکمیلی مورد نیاز می‌باشد.

اولین فرایند تکمیلی؛ مجدداً با استفاده از جدول (۲) فرایند تکمیلی، سنگزرنی، تعیین خواهد شد. کمترین مقدار زیری قابل حصول در فرایند سنگزرنی $\mu m ۰/۱$ و بیشترین مقدار آن $\mu m ۱/۶$ می‌باشد. پس فرایند سنگ زنی را می‌توان برای تولید قطعه مورد نظر استفاده قرار داد. از طرفی باید مساله کنترل تلرانس هندسی نیز مورد توجه قرار بگیرد. بر اساس جدول (۴)، چنین نتیجه گیری می‌شود که فرایند سنگ زنی قادر است سطوحی با تلرانس توازنی به اندازه $mm ۰/۱$ را ایجاد نماید. بدیهی است که این مقدار جوابگوی نیاز قطعه، یعنی $mm ۰/۰۰۰۸$ ، نمی‌باشد و بنابراین فرایند تکمیلی دیگری نیز مورد نیاز خواهد بود.

دومین فرایند تکمیلی؛ با استفاده از جدول (۲) فرایند تکمیلی دوم، لپینگ، انتخاب می‌شود. بر اساس داده‌های جدول (۴) فرایند لپینگ می‌تواند سطوحی موازی با تلرانس موازی بودن $mm ۰/۰۰۰۵$ را ایجاد کند که به مراتب بهتر از مقدار مورد نیاز، یعنی $mm ۰/۰۰۰۸$ ، می‌باشد. بنابراین ترتیب فرآیند‌های پیشنهادی عبارت از فرزکاری، سنگ زنی و هوونینگ می‌باشد.

ملاحظات؛ با توجه به اطلاعات جدول (۲) ممکن است چنین تصور شود که در عمل می‌توان عملیات لپینگ را جایگزین عملیات سنگ زنی کرد. به بیان دیگر ممکن است چنین تصور شود با توجه به اینکه کمترین زیری سطح در عملیات فرزکاری، $\mu m ۰/۸$ ، با بیشترین مقدار زیری سطح در عملیات لپینگ، $\mu m ۰/۸$ ، برابر است لذا عملیات لپینگ می‌تواند جایگزین سنگ زنی شود. در واقع به دلیل آنکه همپوشانی بین این دو عملیات به

مقدار کافی نیست، این جایگزینی توصیه نمی شود. به بیان بهتر می توان گفت که عملیات سنگزنی بین فرایندهای فرزکاری و هونینیگ همپوشانی مناسبی ایجاد می کند.

مقدار زیری در عملیات سنگ زنی برابر با بیشترین مقدار زیری عملیات لینگ، یعنی $\mu m_{0.08}$ ، قرار داده می شود. از جدول (۳) ترانس معادل با زیری $\mu m_{0.08}$ ، برابر با $mm_{0.02}$ بوده و در نتیجه بر طبق قاعده (۲) مقدار اضافه ماشینکاری برابر با $mm_{0.02 \times 10 = 0.2}$ خواهد بود. در نتیجه در عملیات سنگ زنی مقدار بعد برابر با $mm_{0.02 \times 2 = 0.04}$ خواهد بود. از طرفی مقدار ترانس معادل برابر با $mm_{0.02 \times 2 = 0.04}$ بوده که از ترانس اصلی بعد، $mm_{0.01}$ بزرگتر بوده و لذا بر اساس قاعده (۳) از همان ترانس معادل استفاده خواهد شد.

مقدار زیری در عملیات فرزکاری برابر با بیشترین مقدار زیری عملیات سنگ زنی، یعنی $\mu m_{0.16}$ ، قرار داده می شود. از جدول (۳) ترانس معادل با زیری $\mu m_{0.16}$ ، برابر با $mm_{0.05}$ بوده و در نتیجه بر طبق قاعده (۲) مقدار اضافه ماشینکاری برابر با $mm_{0.05 \times 10 = 0.5}$ خواهد بود. در نتیجه در عملیات فرزکاری مقدار بعد برابر با $mm_{0.05 \times 2 = 0.1}$ خواهد بود. از طرفی مقدار ترانس معادل برابر با $mm_{0.05 \times 2 = 0.1}$ بوده که از ترانس اصلی بعد، $mm_{0.04}$ بزرگتر بوده و لذا بر اساس قاعده (۳) از همان ترانس معادل استفاده خواهد شد.

خلاصه: قطعه کار در مرحله نخست برای رسیدن به حالت $R_a : \mu m_{0.1} \pm 0.01 mm$ فرزکاری شده و سپس برای رسیدن به حالت $R_a : \mu m_{0.05} \pm 0.04 mm$ سنگ زنی می گردد. در نهایت عملیات لینگ بعد مورد نظر را به مقدار ذکر شده در نقشه قطعه، $R_a : \mu m_{0.032} \pm 0.01 mm$ خواهد رساند.

جدول (۱) مقدار به عنوان تابعی از زیری سطح و پیشروی تراش.

Feed and maximum depth of cut as a function of surface roughness

| R_s (μm) | f_{max} (mm/rev) | a_{max} (mm) Brinell hardness (BHN) | | | | | |
|----------------------|-----------------------|--|------|------|------|------|------|
| | | 100 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| 0.8 | 0.08 | 0.64 | 0.37 | 0.31 | 0.26 | 0.24 | 0.22 |
| 1.0 | 0.10 | 0.80 | 0.46 | 0.39 | 0.33 | 0.30 | 0.27 |
| 2.0 | 0.20 | 1.61 | 0.93 | 0.77 | 0.67 | 0.59 | 0.51 |
| 3.0 | 0.30 | 2.41 | 1.38 | 1.16 | 1.00 | 0.89 | 0.80 |
| 4.0 | 0.36 | 3.22 | 1.85 | 1.54 | 1.34 | 1.18 | 1.06 |
| 5.0 | 0.40 | 4.02 | 2.31 | 1.93 | 1.67 | 1.48 | 1.33 |
| 6.0 | 0.44 | 4.82 | 2.77 | 2.32 | 2.00 | 1.77 | 1.59 |
| 7.0 | 0.48 | 5.63 | 3.23 | 2.70 | 2.34 | 2.07 | 1.86 |
| 8.0 | 0.51 | 6.43 | 3.69 | 3.09 | 2.67 | 2.36 | 2.12 |
| 9.0 | 0.54 | 7.23 | 4.15 | 3.48 | 3.00 | 2.66 | 2.39 |
| 10.0 | 0.57 | 8.04 | 4.62 | 3.86 | 3.34 | 2.9 | 2.65 |
| 11.0 | 0.60 | 8.84 | 5.08 | 4.25 | 3.67 | 3.2 | 2.92 |
| 12.0 | 0.62 | 9.65 | 5.54 | 4.63 | 4.01 | 3.5 | 3.18 |
| 13.0 | 0.65 | 10.45 | 6.00 | 5.02 | 4.34 | 3.8 | 3.45 |

جدول (۲) مقدار a_{min} به عنوان تابعی از پیشروی و عمق برش.

a_{min} as a function of feed and depth of cut:

| Feed (mm/rev) | Depth of cut (mm) | | | | | | |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 |
| 0.10 | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.20 | — | — | — |
| 0.20 | 0.15 | 0.17 | 0.19 | 0.23 | 0.26 | — | — |
| 0.30 | 0.17 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.39 | 0.43 | — |
| 0.40 | — | 0.28 | 0.30 | 0.38 | 0.46 | 0.54 | 0.60 |
| 0.50 | — | 0.32 | 0.36 | 0.45 | 0.54 | 0.63 | 0.71 |
| 0.60 | — | — | 0.41 | 0.52 | 0.62 | 0.73 | 0.82 |
| 0.70 | — | — | 0.46 | 0.58 | 0.70 | 0.82 | 0.92 |
| 0.80 | — | — | 0.51 | 0.64 | 0.77 | 0.90 | 1.01 |
| 0.90 | — | — | — | 0.81 | 0.97 | 1.13 | 1.30 |
| 1.00 | — | — | — | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 |

| Feed (mm/rev) | Depth of cut (mm) | | | | | | |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 |
| 0.10 | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.20 | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.30 | 0.61 | 0.74 | 0.86 | — | — | — | — |
| 0.40 | 0.76 | 0.92 | 1.06 | 1.24 | 1.37 | — | — |
| 0.50 | 0.90 | 1.08 | 1.26 | 1.46 | 1.61 | 1.80 | 2.00 |
| 0.60 | 1.03 | 1.24 | 1.45 | 1.65 | 1.83 | 2.03 | 2.27 |
| 0.70 | 1.16 | 1.39 | 1.62 | 1.85 | 2.08 | 2.31 | 2.55 |
| 0.80 | 1.28 | 1.54 | 1.79 | 2.03 | 2.30 | 2.56 | 2.82 |
| 0.90 | 1.32 | 1.58 | 2.27 | 2.59 | 2.92 | 3.24 | 3.56 |
| 1.00 | 2.00 | 2.40 | 2.80 | 3.20 | 3.60 | 4.00 | 4.40 |

الگوریتم بهینه تعداد پاس‌های ماشینکاری در عملیات تراش هدف از این الگوریتم تعیین تعداد پاس‌های ماشینکاری به انضمام تعیین عمق و پیشروی در هر پاس است به گونه‌ای که:

اولاً: تعداد پاس‌های ماشینکاری حداقل باشد.

ثانیاً: از ماکریزم مقادیر سرعت، پیشروی و عمق برداشت در هر پاس استفاده شده باشد.

ثالثاً: نیازمندی‌های قطعه از نقطه نظر صافی سطح و ترانس‌های ابعادی بر آورده شده باشد.

(الف) فرایندهایی که در یک پاس ماشینکاری می‌شوند.

فرض کنید که داشته باشیم:

| | |
|-------|--------------------------|
| W_G | بعد قطعه خام (بعد نهایی) |
| W | بعد نهایی |
| a_n | مقدار ماده قابل برداشت |

گام (۱): مقدار $a_{s,\max}$ را از جدول (۱) و یا از رابطه زیر تعیین کنید:

$$a_{s,\max} = \frac{v R_a}{BHN}$$

در این حالت توصیه می‌شود که مقادیر $a_{s,\max}$ و $f_{s,\max}$ نیز همزمان از جدول (۱) خوانده شوند:

$$\begin{cases} R_a \\ BHN \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_{s,\max} \\ f_{s,\max} \end{cases}$$

همچنین توصیه می‌گردد که مقادیر زیر نیز تعیین شود:

$$\begin{cases} a_{c,\min(finish)} = \frac{F_{\text{finish}}}{C_p f_{s,\max}} \\ a_{c,\min(rough)} = \frac{F_{\text{rough}}}{C_p f_{s,\max}} \end{cases}$$

گام (۲): اگر $a_n < a_{s,\max}$ باشد، فرایند در قالب یک پاس ماشینکاری قابل اجرا بوده و پارامترهای عمق

و پیشروی به صورت زیر تعیین می‌شوند:

| عمق برداشت |
|------------|
| $a = a_n$ |

با توجه به مقدار عمق، سختی قطعه کار و مقدار زیری سطح خواسته شده مقدار $a_{s,\max}$ را از جدول (۱) تعیین نموده و

آن را به عنوان انتخاب کند.

گام (۳)؛ با توجه به فرایند قبلی تولیدی، مثل ریخته گری یا آهنگری، بایستی لزوماً رابطه $a_n > a_{s\min}$ برقرار باشد تا عملیات ماشینکاری بتواند نا درستی‌های قبلی را بر طرف کند. در غیر این صورت فرایند امکان پذیر نمی‌باشد.

(ب) فرایندهایی که در دو پاس ماشینکاری می‌شوند.

گام (۱)؛ رابطه تایید $a_n < a_{s\max}$ می‌شود.

گام (۲)؛ کمیت a_{sm} را از رابطه زیر تعیین کنید:

$$a_{sm} = a_{s\max} - a_{s\min}$$

گام (۳)؛ با داشتن a_{sm} به سراغ جدول (۲) بروید. در این جدول همه العانهایی که $a_{s\min}$ آنها کوچکتر یا مساوی a_{sm} باشد را به صورت سه تایی مرتب ($a_{s\min}, f, a$) لیست کرده و آن سه تایی مرتبی که بزرگترین عمق برخشی را داشته باشد، انتخاب کرده و مقدار عمق متناظر با آن را با a_s نشان دهید.

گام (۴)؛ مقدار a_s را به صورت زیر اصلاح کنید:

$$a_s = \min \{a_s, 1/100 a_{c\min}\}$$

گام (۵)؛ کمیت P_G را محاسبه نمایید:

$$P_G = a_n - a_{s\max}$$

گام (۶)؛ مقدار P_G را با a_s مقایسه کنید:

$$P_G \leq a_s$$

فرایند در دو پاس ماشینکاری می‌شود.

$$P_G > a_s$$

فرایند در بیش از دو پاس ماشینکاری می‌شود.

گام (۷)؛ بنابراین یک پاس خشن و یک پاس پرداخت خواهیم داشت:

گام (۱-۷)؛ محاسبه Q : با داشتن $a_{sm} = a_{s\min}$ و $a = P_G$ به عنوان پیشروی و $a = P_G$ به سراغ جدول (۲) بروید و

مقدار جدید $a_{s\min}$ را Q بگیرید.

گام (۲-۷)؛

| | |
|--|------------|
| $a_i = a_{\min} + Q$ مقدار را از جدول (۱) تعیین کنید. | پاس پرداخت |
| $a_i = a_n - a_s$ مقدار را از جدول (۲) تعیین کنید. | پاس خشن |

(ج) فرایندهایی که با سه پاس یا بیشتر ماشینکاری می شوند:
شرایط حاکم بر مساله در این حالت به صورت زیر است:

$$P_G > a_s$$

$$a_n > a_{s \max}$$

گام (۱): محاسبه تعداد پاس ها

$$B = \frac{a_n - a_s}{1/37 a_{c \min(rough)}}$$

$$B_i = \lfloor B \rfloor + 1$$

$$\text{Number of passes} = B_i + \text{semi finish} + \text{finish}$$

گام (۲): عمق برش در هر مرحله

$$a_p = \frac{a_n - a_s}{B_i}$$

در صورتی که شرط $a_p \leq a_{c \min(rough)}$ برقرار باشد:

$$(1) \text{ تعداد } B_i \text{ پاس خشن با عمق } a = a_{c \min} \text{ و پیشروی } f = f_{a \max}$$

$$(2) \text{ آخرین پاس خشن با عمق } a = a_n - 1/37 \text{ و پیشروی } f = f_{a \max}$$

(3) پاس نیمه پرداخت با عمق $a = 1mm$ و پیشروی که از جدول (۲) تعیین می شود.

(4) پاس پرداخت با عمق $a = 0.37$ و پیشروی که از جدول (۱) تعیین می شود.

در صورتی که شرط $a_p > a_{c \min(rough)}$ برقرار باشد:

$$(1) \text{ تعداد } B_i \text{ پاس خشن با عمق } a = a_p \text{ و پیشروی } f = f_{a \max} \left(\frac{a_{c \min}}{a_p} \right)^{1/37}$$

$$P_{G(new)} = P_{G(old)} - B_i \times a_p$$

$$a_{n(new)} = a_{n(old)} - B_i \times a_p$$

(۲) خشن نهایی

| عمق | |
|---------------------------|--|
| بیش روی | |
| $a_i = a_{n(new)} - a_n$ | |
| از جدول (۲) تعیین می شود. | |

(۳) پرداخت نهایی: در جدول (۲)، عمق را برابر $P_{G(new)}$ گرفته و با داشتن $a_{s \min} = a_{s \max} - a_{a \min}$ سطر و ستونی مناسب را انتخاب کرده و درایه Q را بگیرید. اکنون خواهید داشت:

| عمق | |
|---------------------------|--|
| بیش روی | |
| $a_i = a_{a \min} + Q$ | |
| از جدول (۱) تعیین می شود. | |